

**EVOLUCIÓN RECIENTE DE LOS DRENAJES DE LOS RÍOS CHICAMOCHA Y  
SUÁREZ**

**YENNY CAROLINA GARCÍA GONZÁLEZ  
MARIELIN AÑEZ MEDINA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FALCUTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE GEOLOGÍA  
BUCARAMANGA  
2017**

**EVOLUCIÓN RECIENTE DE LOS DRENAJES DE LOS RÍOS CHICAMOCHA Y  
SUÁREZ**

**YENNY CAROLINA GARCÍA GONZÁLEZ  
MARIELIN AÑEZ MEDINA**

**Modalidad del Proyecto – Trabajo de Investigación  
Trabajo de grado para optar el título de Geólogo**

**Director:**

**ELISEO TESÓN DEL HOYO  
Geólogo Ph.D.**

**Codirectores:**

**VICTOR MANUEL CABALLERO ORTIZ  
Geólogo MSc.**

**LUCÍA STRUTH IZQUIERDO  
Geóloga Ph.D.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FALCUTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE GEOLOGÍA  
BUCARAMANGA**

**2017**

## DEDICATORIA

A Dios y a mis seres queridos.

*“When you are inspired by some great purpose, some extraordinary project, all your thoughts break their bonds: Your mind transcends limitations, your consciousness expands in every direction, and you find yourself in a new, great, and wonderful world.*

*Dormant forces, faculties and talents become alive, and you discover yourself to be a greater person by far that you ever dreamed yourself to be”*

*“Cuando estás inspirado por algún gran propósito, por algún proyecto extraordinario, los pensamientos rompen su barrera, la mente trasciende su limitaciones, la conciencia se expande en todas las direcciones y te encuentras en un mundo nuevo y maravilloso.*

*Las fuerzas, las facultades y los talentos dormidos cobran vida y te das cuenta de que eres mucho más grande de lo que jamás hubieras soñado.”*

Patañjali

Yenny Carolina

## DEDICATORIA

*Este trabajo va dedicado primeramente a DIOS por cada día de vida regalado, que aunque cada día trae su afán sé que cada uno de ellos viene lleno de enseñanzas, pero sobre todo le agradezco por darme la fortaleza y sabiduría para afrontar cada momento difícil presente hasta el día de hoy.*

*A mis padres Bolmar Añez y Indira Medina por su apoyo incondicional y porque sin ellos no habría sido posible este logro. Gracias porque a pesar de mis falencias nunca dudaron de mí, porque sabían que tenía el mejor de los ejemplos, ellos mis padres las personas más emprendedoras que conozco, este Título más que mío es suyo con mucho amor.*

*Marielin*

## AGRADECIMIENTOS

A mi mamá especialmente por acompañarme en cada etapa de mi vida, gracias por tu amor y soporte porque eres una de las personas más importantes, sé que esperaste con ilusión que alcanzara mi título profesional y a ti más que a nadie te debo este gran logro. A Lucila, quien me ha apoyado en momentos difíciles, por tratarme como una hija más y permitirme disfrutar de tu amor de madre.

A mi padre, mi hermana y mi sobrina, que aunque no frecuento mucho, me acompañaron sus deseos para que yo pudiera culminar con esta etapa. A mis demás familiares que me dieron fortaleza para seguir con mis propósitos.

A Eliseo Tesón por su propuesta del tema de trabajo y dirección del proyecto, a Victor Caballero por brindar su apoyo y compartir sus conocimientos, a Lucia Struth que a pesar de la distancia fue paciente en enseñarme. A estas tres personas agradezco su acompañamiento en el desarrollo de proyecto, su excelente actitud de trabajo y por creer en mi potencial; aún en momentos de dificultad recibí una gran motivación de parte de ustedes.

A Laura, Silvia, Viviana y Yesika, mis grandes amigas y compañeras de la universidad, porque de una u otra manera contribuyeron en varias maneras para finalizar mi trabajo. A Jorge Christancho por su consejo, apoyo y asesoría, la colaboración prestada contribuyó a culminar satisfactoriamente con mi proyecto.

A Christian por enseñarme a apreciar la grandeza de las cosas sencillas de la vida, por creer en mis capacidades y demostrarme lo valiosa que soy como persona. Por darme ánimo en todo tiempo y por el apoyo incondicional, del cual estaré infinitamente agradecida.

Finalmente quiero agradecer a las personas que creyeron en mí y me brindaron sus buenos deseos en este trabajo.

*Yenny Carolina*

## AGRADECIMIENTOS

*El autor expresa sus agradecimientos a:*

*Eliseo Tesón, Lucia Struth, Víctor Caballero y Yenny García por sus conocimientos, experiencia y apoyo para que el trabajo concluyera de la mejor manera. MUCHAS GRACIAS POR LA ORIENTACION.*

*A los docentes de la escuela de Geología por cada una de las enseñanzas que me otorgaron durante este periodo tan sufrido pero maravilloso que fue la Universidad, gracias por sus conocimientos, son de los mejores profesionales de Geología.*

*Por ultimo pero no menos importante quiero agradecerle a cada una de las personas que hizo parte de esta etapa de mi vida, a mis compañeros de carrera los cuales aunque no de nombres aquí, saben que fueron parte fundamental durante este proceso, también a esas personas que en los dos últimos dos años se volvieron parte de mi familia mis compañeros de trabajo en Minesa, los que me ayudaron a conocer el ambiente laboral. Este agradecimiento es para alguien especial mi apoyo los últimos 7 años en Bucaramanga Juan Carlos Carrillo gracias por estar ahí en los momentos difíciles gracias por tu incondicionalidad y por tu paciencia hacia mí, gracias a ti y tu familia por el cariño ofrecido.*

*Marielin*

## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	20
1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	22
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	22
1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA .....	23
1.3 JUSTIFICACIÓN .....	23
2. OBJETIVOS.....	26
2.1 GENERAL.....	26
2.2 ESPECÍFICOS .....	26
3. MARCO TEÓRICO .....	27
3.1 REORGANIZACIÓN DE LA RED DE DRENAJE.....	27
3.1.1 Conceptos fundamentales .....	27
3.1.2 Modelo de incisión fluvial y perfil longitudinal en cauces de lecho rocoso .....	34
3.1.3 Características de la reorganización de la red de drenaje y tipo de evidencias	40
3.1.4 La importancia de la reorganización del drenaje y su modelo de evolución en orógenos de inversión tectónica. ....	44
4. GENERALIDADES .....	49
4.1 LOCALIZACIÓN .....	49
4.2 ANTECEDENTES .....	50
4.3 MARCO GEOLÓGICO .....	54
4.3.1 Regional.....	54
4.3.2 Estratigrafía .....	59
4.3.2.1 Complejo Bucaramanga.....	60
4.3.2.2 Formación Silgará.....	61
4.3.2.3 Cuarzomonzonita de Río-Negro.....	62
4.3.2.4 Cuarzomonzonita Mogotes .....	62
4.3.2.5 Granito de Pescadero .....	63
4.3.2.6 Formación Jordán .....	63
4.3.2.7 Formación Girón .....	64
4.3.2.8 Formación Los Santos .....	64
4.3.2.9 Formación Rosa Blanca.....	65
4.3.2.10 Formación Paja.....	65
4.3.2.11 Formación Tablazo .....	66
4.3.2.12 Formación Simití .....	66
4.3.2.13 Formación Areniscas de Chiquinquirá.....	66
4.3.2.14 Formación La Luna .....	67
4.3.2.15 Formación Umir .....	69
4.3.2.16 Formación Lisama .....	70
4.3.2.17 Grupo Chorro.....	71
4.3.2.18 Depósitos aluviales .....	73
4.3.2.19 Grupo Mesa y Meseta de Bucaramanga.....	73

4.4	MARCO TECTÓNICO .....	76
4.4.1	Falla Bucaramanga .....	76
4.4.2	Falla del Suárez .....	77
4.5	CUENCAS HIDROGRÁFICAS .....	78
4.5.1	Cuenca del río Sogamoso.....	80
4.5.1.1	Cuenca del río Chicamocha.....	80
4.5.1.2	Cuenca del río Suárez .....	80
4.5.2	Cuenca del río Lebrija .....	81
5.	METODOLOGÍA .....	82
6.	RESULTADOS.....	85
6.1	CARTOGRÁFICA TEMÁTICA GENERAL Y LOCAL .....	85
6.1.1	Geología .....	85
6.1.2	Precipitación promedio.....	89
6.1.3	Clasificación del clima.....	91
6.2	OBSERVACIONES TOPOGRÁFICAS .....	93
6.2.1	Parámetros del terreno .....	93
6.2.2	Depresiones en el perfil de la divisoria de aguas .....	97
6.3	OBSERVACIONES FLUVIALES .....	99
6.3.1	Generación de la red de drenaje .....	99
6.3.2	Extracción de los perfiles longitudinales.....	102
6.3.3	Reconstrucción de paleoperfiles .....	108
7.	ANÁLISIS.....	113
7.1	ANÁLISIS TOPOGRÁFICO .....	113
7.1.1	Distribución de la red de drenajes y estructuras tectónicas en la pendiente regional.....	113
7.1.2	Depresiones en la divisoria de aguas.....	114
7.1.3	Identificación de evidencias geomorfológicas .....	116
7.2	ANÁLISIS FLUVIAL.....	117
7.2.1	Distribución y comportamiento de los knickpoints en el área de estudio .....	117
7.2.2	Perfiles fluviales y paleoperfiles asociados a la plataforma de las Mesas .....	123
7.3	REORGANIZACIÓN DE LA RED DE DRENAJE .....	126
7.3.1	Disposición del patrón de drenaje .....	126
7.3.1.1	Características de los drenajes longitudinales .....	127
7.3.1.2	Características de los drenajes transversales .....	131
7.3.2	Evidencias de captura fluvial.....	135
7.3.3	Reorganización del drenaje y mecanismos .....	137
7.3.4	Comparativa con el modelo de Babault et al. (2013) .....	140
8.	DISCUSIONES .....	147
8.1	EVIDENCIAS GEOMORFOLÓGICAS .....	147
8.1.1	Elbows y wind gaps .....	147
8.1.2	Otro tipo de evidencias geomorfológicas.....	151
8.2	EVIDENCIAS ESTRAFIGRÁFICAS.....	152

8.2.1	Depósitos fluviales .....	152
8.2.2	Origen de los depósitos en la Mesa de Bucaramanga .....	155
8.3	ESTIMACIÓN DE LA TASA DE INCISIÓN .....	158
8.4	ORDEN SECUENCIAL DE LA CAPTURA DEL SUÁREZ Y CHICAMOCHA .	159
8.5	EVOLUCIÓN DEL PAISAJE Y REORGANIZACIÓN A FUTURO DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	160
8.6	LOS PARÁMETROS QUE CONTROLAN LA INCISIÓN FLUVIAL .....	164
8.7	EVOLUCIÓN DE LOS RÍOS CHICAMOCHA Y SUÁREZ .....	171
8.7.1	Cretácico tardío – Paleoceno .....	171
8.7.2	Eoceno.....	172
8.7.3	Oligoceno.....	174
8.7.4	Mioceno .....	175
8.7.5	Evolución reciente.....	176
8.7.5.1	Plioceno – Pleistoceno.....	176
8.7.5.2	Holoceno (Presente).....	179
9.	CONCLUSIONES .....	182
10.	RECOMENDACIONES .....	185
	BIBLIOGRAFÍA.....	187
	ANEXOS.....	201

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Representación de una corriente jerarquizada (orden de secuencia de Strahler) .....	28
Figura 2. Representación gráfica de un perfil longitudinal de un río en equilibrio y en desequilibrio .....	29
Figura 3. Migración de los knickpoints .....	31
Figura 4. Tasa de incisión a largo plazo de la caída del nivel base respecto al tiempo ....	31
Figura 5. Representación de los procesos de decapitación de la corriente y captura fluvial .....	41
Figura 6. Capturas fluviales del trazado del río Shennandoah a lo largo de Blue Ridge...	43
Figura 7. Etapas del modelo evolutivo de la red de drenaje en un orógeno de inversión .	46
Figura 8. Localización de la zona de estudio. Sector las mesas de Bucaramanga, Lebrija, Los Santos, San Gil y Zapatoca.....	49
Figura 9. Configuración placa Neotectónica de los Andes del Norte y la Región del Caribe .....	56
Figura 10. Modelo secuencial del desarrollo tectónico regional para la Cordillera Oriental, el Valle Medio del Magdalena y la cuenca los Llanos .....	58
Figura 11. Cuencas del área de estudio de la vertiente Magdalena medio .....	79
Figura 12. Esquema metodológico .....	84
Figura 13. Mapa geológico del sector de las Mesas .....	86
Figura 14. Mapa geológico y divisoria de aguas principales de las cuencas Chicamocha, Suárez, Sogamoso y Lebrija.....	88
Figura 15. Precipitación promedio anual [mm].....	90
Figura 16. Mapa de clasificación climática de Caldas Lang .....	92
Figura 17. Mapa de pendiente local .....	95
Figura 18. Pendiente regional y estructuras tectónicas principales .....	96
Figura 19. Depresiones en la divisoria de aguas en vista perfil y planta .....	98
Figura 20. Red de drenaje .....	100
Figura 21. Perfiles longitudinales cuenca Sogamoso (A) y cuenca Lebrija (B).....	105
Figura 22. Perfil longitudinal del río Suárez.....	106
Figura 23. Perfil longitudinal del río Chicamocha .....	107
Figura 24. Perfil longitudinal del río Lebrija .....	108
Figura 25. Proyección del paleocauce entre un nivel base del río Suarez y la cabecera de la quebrada La Gacha .....	110
Figura 26. Proyección de los paleocauces entre algunos niveles base del río Chicamocha y la cabecera de la Quebrada Grande (1).....	110
Figura 27. Proyección de un paleocauce entre un nivel base de la quebrada Zapatoca y la cabecera de la quebrada La Angula .....	111
Figura 28. Proyección de un paleocauce entre un nivel base de la quebrada Zapatoca y la cabecera de la quebrada Grande (2) .....	112

Figura 29. Distribución de la pendiente local y litología en las depresiones en la divisoria .....	114
Figura 30. Knickpoints y paleoperfiles asociados a la depresión 1 (A) y la depresión 2 (B) .....	115
Figura 31. Ubicación de codos de capturas y depresiones que afectan al trazado fluvial Chicamocha-Sogamoso.....	117
Figura 32. Representación de los knickpoints en vista de planta .....	119
Figura 33. Relación de los knickpoints con la litología y estructuras tectónicas .....	121
Figura 34. Relación de los knickpoints con la pendiente regional .....	122
Figura 35. Knickpoints de los afluentes de la cuenca Sogamoso (A) y vista ampliada (B) .....	125
Figura 36. Knickpoints de los afluentes de la cuenca Lebrija .....	126
Figura 37. Pendiente regional, estructuras tectónicas y drenajes para área de estudio extendida.....	129
Figura 38. Disposición de los bloques tectónicos en la región de la Mesas .....	134
Figura 39. Bloquediagrama del DEM con exageración vertical de cuatro veces .....	142
Figura 40. Imagen detallada del codo de captura del río Chicamocha .....	148
Figura 41. Morfología de las visuales de los polígonos A y B sobre la divisoria de aguas entre las cuencas Lebrija y Chicamocha-Sogamoso.....	150
Figura 42. Evidencias estratigráficas de captura fluvial a partir de otros autores .....	154
Figura 43. Incisión fluvial del paleocauce del río Suárez.....	158
Figura 44. Mapa de valores chi ( $\chi$ ) enfocado a la divisoria de aguas de las cuencas Lebrija y Chicamocha-Sogamoso.....	161
Figura 45. Representación de una posible captura fluvial .....	163
Figura 46. Evolución reciente de los ríos Chicamocha y Suárez.....	181

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Principales factores de formación de los knickpoints.....	32
Tabla 2. Características principales de los estadios de evolución de la red de drenaje en orógenos de inversión (Babault et al. 2013).....	48
Tabla 3. Litologías del Departamento de Santander .....	59
Tabla 4. Cuencas de estudio de la vertiente hidrográfica del Magdalena medio .....	78
Tabla 5. Precipitación promedio anual [mm] periodo 1976-2005.....	91
Tabla 6. Clasificación climática Caldas Lang (2012) para la zona de estudio .....	93
Tabla 7. Identificación de las depresiones sobre el perfil de la divisoria de aguas .....	97
Tabla 8. Nomenclatura de la red de drenaje .....	101
Tabla 9. Comparación de alturas entre la topografía y los cauces de los ríos principales .....	102
Tabla 10. Descripción de los perfiles longitudinales en el área de estudio .....	103
Tabla 11. Knickpoints de los afluentes identificados en la zona de estudio.....	118
Tabla 12. Porcentaje composicional de clastos asociados al Granito de Pescadero.....	153
Tabla 13. Estimación de la tasa de incisión del río Suárez .....	159
Tabla 14. Estimación de la pendiente promedio del cauce por cuenca .....	165
Tabla 15. Relación de orden de los parámetros de la ecuación de incisión fluvial por cuenca .....	165

## LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Mapa Geológico. Vertiente Magdalena Medio sobre la Cordillera Oriental. Escala 1:1.000.000.....	201
Anexo B. Mapa Geológico. Sector nororiental departamento de Santander. Región de las Mesas. Escala 1:300.000.....	201
Anexo C. Red de Drenaje. Sector Nororiental departamento de Santander. Región de las Mesas. Escala 1:250.000.....	201

## RESUMEN

**TITULO:** EVOLUCIÓN RECIENTE DE LOS DRENAJES DE LOS RÍOS CHICAMOCHA Y SUÁREZ\*

**AUTOR:** YENNY CAROLINA GARCÍA GONZÁLEZ\*\*  
MARIELIN AÑEZ MEDINA\*\*

**PALABRAS CLAVES:** REORGANIZACIÓN DEL DRENAJE, RÍO CHICAMOCHA, RÍO SUÁREZ, REGIÓN DE LA MESAS

### DESCRIPCIÓN:

La región de las Mesas se deriva de una plataforma inicial. Esta estructura tabular ha sido fragmentada y levantada por la actividad de las Fallas del Suárez y Bucaramanga, formando una cuenca en forma de cuña llamada Dovela de Bucaramanga. Anteriormente, los ríos principales Chicamocha y Suárez describían un patrón de drenaje longitudinal, alineado a las fallas y estructuras incipientes. Estos ríos depositaban su material en la dovela para constituir más tarde la principal fuente de sedimentos de la Formación Bucaramanga. La red fluvial tiende a establecer su equilibrio geométrico y durante los procesos de reorganización experimenta eventos de captura fluvial. Además, el levantamiento del terreno y la incisión profunda de los ríos establecen la configuración actual de la red de drenaje en la región de la Mesas.

Con ayuda de softwares SIG y herramientas tecnológicas recientes, se modeló la red de drenaje de los ríos Suárez, Chicamocha, Sogamoso y Río de Oro junto con algunos de sus afluentes, exportando sus respectivos perfiles longitudinales. Adicionalmente, se analizaron rasgos topográficos que evaluarán las depresiones en la divisoria.

Se lograron identificar evidencias geomorfológicas como codos de captura y valles abandonados. Además, los perfiles fluviales revelaron knickpoints y paleocauces asociados al nivel base fluvial de las mesas. Lo anterior junto con la consulta bibliográfica aporta una serie de evidencias que afianzan la propuesta de la captura fluvial de los ríos Chicamocha y Suárez. La reorganización fluvial en el área de estudio difiere al modelo de Babault et al. (2013), respecto a la pendiente regional no juega un papel importante en el drenaje transversal por tratarse de una zona de meseta. Por ende, se especula que los factores de control de la red fluvial identificados podrían ser encontrados en zonas axiales de mesetas pertenecientes a otros orógenos de inversión.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Geología. Director: Eliseo Tesón del Hoyo, Ph. D. Geología.

## ABSTRACT

**TITLE:** CHICAMOCHA AND SUÁREZ DRAINAGE RECENT EVOLUTION \*

**AUTHOR:** YENNY CAROLINA GARCÍA GONZÁLEZ\*\*  
MARIELIN AÑEZ MEDINA\*\*

**KEYWORDS:** DRAINAGE REARRANGEMENT, CHICAMOCHA RIVER, SUÁREZ RIVER, MESAS REGION

### DESCRIPTION:

The Mesas region is derived from an initial plateau. This tabular structure has been broken and uplifted by Suárez and Bucaramanga Faults activity, forming a wedge-shaped tectonic basin (called Dóvela de Bucaramanga). Formerly, Chicamocha and Suárez rivers had a longitudinal pattern controlled by tectonic structures developed and major faults. Chicamocha and Suárez had deposited their sediment materials in the Dóvela to constitute lately the main source of fluvial sediments for the Bucaramanga deposit (Bucaramanga Formation). The fluvial network tends to achieve its geometric equilibrium and during its reorganization processes, it undergoes stream capture events. In addition, deep fluvial incision and uplifting events determine the current drainage network configuration in the Mesas region.

With the assistance of SIG softwares and other recent technologies, the drainage network of Suárez, Chicamocha, Sogamoso and Río de Oro rivers was modelled with some of its tributaries, extracting their longitudinal river profiles. Also, topographic features were analysed and anomalous depressions were identified in the elevation profile of the main divide.

Geomorphic evidences like elbows of capture and wind gaps were obtained. The longitudinal river profiles show that knickpoints and paleostreams can be related to the base level in the Mesas region. Results obtained in this work and others studies provides evidences that support the proposal for the Chicamocha and Suárez captures. The model of drainage network evolution in the area of interest differs with the model proposed by Babault et al. (2013), in relation to regional slope does not play an important role in controlling transversal drainage since the study area is in a plateau domain, the inner Eastern Cordillera. It suggests that control factors of the drainage river can be found in plateau regions which belong to others inversion orogens.

---

\* Bachelor Thesis

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Geología. Director: Eliseo Tesón del Hoyo, Ph. D. Geology

## INTRODUCCIÓN

El trabajo de investigación que se presenta a continuación, tiene como objetivo estudiar la evolución reciente de los ríos Chicamocha y Suárez y, y si estos sufrieron eventos de captura que pudieron ser responsables del modelado fluvial de los cañones que se observan en la zona de estudio. Se encontraron referencia de trabajos previos acerca de la reorganización fluvial en orógenos de inversión tanto de la Cordillera Oriental como de cadenas montañosas similares, así como del desarrollo de una red consecuente en la región de las Mesas. Se plantea los siguientes interrogantes: ¿La red de drenaje ha tenido su configuración actual desde el inicio de la formación de estos cañones?, de lo contrario, ¿Qué procesos geológicos involucrados dieron inicio en la modificación de la red fluvial que lograron alcanzar la configuración de la red de drenaje actual? Para dar respuesta a lo anterior, se realizó dos tipos de análisis: uno topográfico que permitió extraer los parámetros de la superficie del terreno y ubicación de depresiones en la divisoria de aguas, el otro fluvial en el que se logró la extracción de la red de drenajes y los perfiles longitudinales, además de la reconstrucción de los paleoperfiles. La identificación de evidencias geomorfológicas de reorganización fluvial y eventos de captura cotejada con resultados de estudios bibliográficos consultados, se obtuvo la evolución reciente de la red de drenaje de la zona de estudio y la ubicación de sitios donde ocurrieron capturas fluviales. Este trabajo tiene un aporte significativo en las discusiones, donde se abarca ampliamente sobre las evidencias geomorfológicas y estratigráficas de las capturas fluviales, el orden secuencial de los eventos de captura y el comportamiento de la reorganización de drenaje a futuro y su posible respuesta al paisaje.

Este sector de la zona de estudio denominado como la zona de las Mesas, se caracteriza por presentar grandes cañones incididos por los ríos principales como el Suárez, Chicamocha y Sogamoso, describiendo un paisaje con belleza natural y con cualidades estéticas que lo consolida como uno de los sitios turísticos más

importantes del país; el Cañón del Chicamocha se encuentra dentro de un proceso en aras de ser declarado como Patrimonio Mundial por la UNESCO, donde el Gobierno Nacional logró incluirla en la Lista Tentativa. El aporte científico del presente estudio contribuiría al cumplimiento de uno de los criterios postulados como bien natural, especialmente porque trata de la evolución geológica reciente que dio origen al modelado fluvial del Cañón del Chicamocha.

# 1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

## 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Conocer la evolución de la red de drenaje que conforman los ríos Chicamocha y Suárez generaría un impacto científico al entender la formación del Cañón del Chicamocha a través de la evolución de su modelado fluvial, cuya información podría aportar valiosamente a su declaratoria como Geoparque de acuerdo a los lineamientos de la UNESCO (Marshall *et al.*, 2014<sup>1</sup>). Según el marco histórico, Julivert (1958<sup>2</sup>) ha planteado una hipótesis sobre cómo ha evolucionado la red hidrográfica en la región de Las Mesas, argumentando que dicha zona fue una plataforma primitiva, la cual empezó a elevarse. De esta forma, se definió un nuevo marco estructural en el cual se diferenciaron diferentes bloques tectónicos los cuales influyeron en la geometría de la red hidrográfica.

Teniendo en cuenta la carencia de trabajos investigativos en materia de evolución fluvial de la zona de estudio, es necesario asociar los procesos geomorfológicos que dieron origen a los recursos paisajísticos, hídricos y fluviales de los ríos Chicamocha y Suarez. Con el fin de conocer la evolución reciente de los mismos, se plantean las siguientes preguntas: ¿La red de drenaje en esta área ha tenido desde un inicio la configuración que observamos hoy en día? Y en caso negativo, ¿Qué ha iniciado el cambio en la red y cómo se ha producido? Para responder a estas preguntas, es necesario hacer un estudio detallado de la evolución de la red fluvial en base a modelos digitales, comparándolo a su vez con las interpretaciones

---

<sup>1</sup> MARSHALL, Duncan et al. Elaboración de propuestas de inscripción en la Lista del Patrimonio Mundial. Segunda edición. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization - UNESCO, 2014. Versión en español de la obra original *Preparing World Heritage Nominations, Second edition*, 2011. p. 1-150. ISBN 978-92-3-301029-1. Disponible en internet: <<http://whc.unesco.org/en/preparing-world-heritage-nominations>>.

<sup>2</sup> JULIVERT, Manuel. La Morfoestructuras de la zona de las Mesas SW de Bucaramanga (Colombia S.A.). Boletín geológico. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 1958. no. 1, p. 7-43.

de Julivert (1958<sup>3</sup>) y el modelo de evolución de drenaje propuesto por Babault *et al.* (2013<sup>4</sup>) y Struth *et al.* (2015<sup>5</sup>).

## 1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Se inició una recopilación bibliográfica de trabajos preexistentes realizados en la zona de estudio para ser comparados con algunos resultados obtenidos en este estudio y dimensionar los alcances que se puedan lograr. La aplicación de nuevas herramientas, inexistentes en el tiempo de desarrollo de los trabajos previamente mencionados, permitirá obtener unos resultados más representativos de la dinámica de la red de drenaje.

El presente trabajo emplea información secundaria basando su estudio en el procesamiento de imágenes satelitales, tratamiento de datos geoespaciales y empleo de modelos numéricos. A partir del análisis de las características fluviales, topográficas, geomorfológicas y estructurales del terreno, se identifican potenciales evidencias de captura fluvial, proceso que repercute en la evolución de la red de drenaje en la zona de estudio.

## 1.3 JUSTIFICACIÓN

El estudio de la evolución de los cauces de los ríos Chicamocha y Suárez, de su sistema de drenaje y por tanto del paisaje actual ayudará a comprender, generar conocimiento y conciencia en la sociedad de los cambios que nuestro paisaje santandereano ha sufrido a través del tiempo, la necesidad de preservarlos y prevenir eventos futuros. La reorganización de la red de drenaje fluvial y los procesos

---

<sup>3</sup> *Ibíd.*, p. 23-38.

<sup>4</sup> BABAULT, Julien *et al.* Shortening, structural relief and drainage evolution in inverted rifts: insights from the Atlas Mountains, the Easter Cordillera of Colombia and the Pyrenees. The Geological Society of London [online]. 18 June 2013, vol. 377, p. 141-158. Available from internet: <<http://sp.lyellcollection.org/content/early/2013/06/14/SP377.14>>.

<sup>5</sup> STRUTH, Lucía *et al.* Drainage reorganization during mountain building in the river system of the Eastern Cordillera of the Colombian Andes. Geomorphology [online]. 12 November 2015, vol. 250, p. 370-383. Available from internet: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.09.012>>.

asociados, como la captura de cauces, la depositación de sedimentos y la erosión pueden generar modificaciones en el paisaje, el microclima, en la distribución terrestre y acuática de la fauna y flora (Bishop, 1995<sup>6</sup>; Albert y Crampton, 2010<sup>7</sup>), la destinación del uso del suelo y disponibilidad de recursos hídricos.

El conocimiento científico adquirido en este trabajo en base a información de índole geológica, geomorfológica e hidrológica, contribuirá a fortalecer de manera significativa el esquema del Plan de Ordenamiento Territorial de sector estudiado. Conocer la historia de la formación de los Cañones del Suárez y Chicamocha contribuye en el conocimiento de los recursos escénicos y paisajísticos los cuales apoyan la iniciativa de declarar un Geoparque en los términos de la UNESCO. La realización de este trabajo contribuirá a la planificación del turismo sostenible en la región y en el Departamento de Santander al crear conciencia sobre los procesos geomorfológicos y geológicos a escala de tiempo del orden de miles de años (Struth, 2016<sup>8</sup>).

Como alcance del presente estudio se ha modelado la red de drenaje a partir de un Modelo Digital de Elevaciones (DEM), el cual incluye los cauces del Chicamocha, Suárez y río de Oro, así como sus respectivos afluentes principales. A partir de la mencionada información fluvial, se evaluaron las características topográficas del terreno y se extrayeron los perfiles longitudinales de los ríos, a partir de los cuales se pudo calcular para cada uno el paleoperfil a partir de la ecuación teórica de los ríos en estado de equilibrio. Estos resultados son la base para el análisis de la dinámica fluvial, el cual hemos realizado a partir de los perfiles y paleoperfiles, extrayendo una serie de evidencias topográficas y fluviales las cuales promueven y

---

<sup>6</sup> BISHOP, Paul. Drainage rearrangement by river capture, beheading and diversion. *Progress in Physical Geography* [online]. 1995, vol. 19, no. 4, p. 449-473. Available from Internet: <<http://ppg.sagepub.com/content/19/4/449.full.pdf+html>>.

<sup>7</sup> ALBERT, James and CRAMPTON, William. The geography and ecology of diversification in Neotropical freshwaters. *Nature Education Knowledge* [online]. 2010, vol. 1, p. 13-19. Available from Internet: <<http://www.nature.com/scitable/knowledge/library/the-geography-and-ecology-of-diversification-in-15667887>>. Citado por PASTOR, Alvar. Las capturas fluviales: contextos, causas y consecuencias. Una explicación de los procesos de captura fluvial en distintos contextos geológicos. *Revista de Geografía Espacios* [online]. 2013, vol. 3, no. 5, p. 27-41. Available from Internet: <[http://www.revistaespacios.cl/pdf/n5/03\\_pastor\\_espacios\\_05.pdf](http://www.revistaespacios.cl/pdf/n5/03_pastor_espacios_05.pdf)>.

<sup>8</sup> STRUTH, Lucía. Evolution of fluvial drainage during mountain building in the Eastern Cordillera of the Colombian Andes. Ph. D. Thesis. June 2016, Universitat Autònoma Barcelona. Department de Geologia p. 1-114.

responden a la pregunta acerca del dinamismo o equilibrio de la reorganización del drenaje en la zona de estudio. Sin embargo, a todo modelo se le atribuyen limitaciones y, en este caso, se relacionan con el estado, precisión y valor agregado de los datos requeridos, y a su vez, de la existencia y confiabilidad de los mismos, así como de la resolución del DEM.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 GENERAL

Estudiar la evolución reciente de los cañones del río Chicamocha y río Suarez y determinar su relación con un posible evento de captura de estos cauces por parte del río Sogamoso.

### 2.2 ESPECÍFICOS

- ✓ Estudiar un caso específico de la evolución de la red de drenaje de un orógeno de inversión tectónica a partir del modelo propuesto por Babault *et al.* (2013).
- ✓ Modelar la red de drenaje por medio de software y herramientas SIG.
- ✓ Generar los perfiles longitudinales de los cauces de ríos Chicamocha y Suárez y comparar los niveles base con algunas terrazas de la zona de estudio para entender la evolución reciente de los cauces.
- ✓ Localizar, analizar y caracterizar los rasgos geomorfológicos que evidencien los eventos de captura fluvial (*wind gaps, knickpoints, etc.*).

### 3. MARCO TEÓRICO

#### 3.1 REORGANIZACIÓN DE LA RED DE DRENAJE

##### 3.1.1 Conceptos fundamentales

Una red de drenaje es la organización jerárquica que inicia en los afluentes (orden inferior) y se dirigen a los ríos principales (orden superior); se conforma de un sistema colector principal de una cuenca (Figura 1) (Ibisate, 2004<sup>9</sup>; Burbank and Anderson, 2011<sup>10</sup>) y desarrolla una disposición geométrica característica por su observación en vista de planta llamado patrón de drenaje (De Pedraza, 1996)<sup>11</sup>. Con el paso de tiempo acompañado de la evolución del relieve, la red de drenaje puede experimentar cambios en su disposición espacial como consecuencia de su reorganización fluvial (Mardones *et al.*, 2007)<sup>12</sup>; este proceso de reorganización dinámica tiene como fin establecer su perfil de equilibrio (Pastor, 2013)<sup>13</sup>.

Los cauces fluviales tienden a fluir regularmente en zonas de mayor pendiente, procurando el trayecto menos energético comprendido entre las cabeceras y el nivel base (Pastor, 2013)<sup>14</sup>. El primer concepto de nivel base fue introducido por Powell (1875)<sup>15</sup>, lo define como el límite mínimo del paisaje donde los ríos no pueden erosionar.

---

<sup>9</sup> IBISATE, Askoa. Análisis morfométrico de la cuenca y de la red de drenaje del río Zadorra y sus afluentes aplicado a la peligrosidad de crecidas. Boletín de la AGE [online]. 2004, vol. 38, p. 311-329. Disponible en internet: <<http://boletin.age-geografia.es/articulos/38/17%20IBISATE%20311-329.pdf>>.

<sup>10</sup> BURBANK, Douglas and ANDERSON, Robert. Tectonic geomorphology. 2011. Second edition. Wiley-Blackwell, p. 285. ISBN 978-1-4443-3886-7.

<sup>11</sup> DE PEDRAZA, Javier. Geomorfología: principios, métodos y aplicaciones. 1a ed. Madrid: Editorial Rueda, 1996. Citado por MARDONES, María, et al. El patrón hidrográfico de la cuenca del río Blanco: control tectónico y geomorfológico. Revista de Geografía Norte Grande [online]. 2007, no. 38, p. 79-98. Available from Internet: <[http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-34022007000200005](http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-34022007000200005)>.

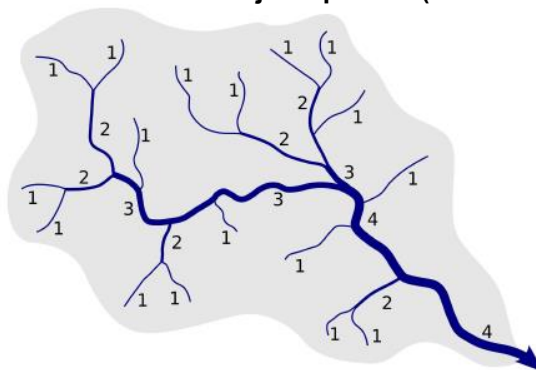
<sup>12</sup> MARDONES et al. Op cit., p. 79.

<sup>13</sup> PASTOR. Op. cit., p. 28.

<sup>14</sup> *Ibíd.*, p. 28, 32.

<sup>15</sup> POWELL, John. Exploration of the Colorado River of the West and its Tributaries. 1875. Smithsonian Institution, Washington, DC. Citado por BURBANK and ANDERSON. Op. cit., p. 245.

**Figura 1. Representación de una corriente jerarquizada (orden de secuencia de Strahler)**



Fuente: Tomado de Grohmann *et al.* (2011), modificado de FISRWG (1998)<sup>16</sup>.

De otra parte, Bull (1991)<sup>17</sup> menciona que el nivel base de erosión es un concepto que involucra todo un sistema fluvial, donde no hay lugar a la erosión o depositación sobre el lecho cuando este haya logrado su perfil longitudinal en equilibrio. Se puede contemplar una sucesión infinita de niveles base locales adyacentes, en una condición establecida por ciertos factores que controlen el sistema fluvial, hasta que dichos factores cambien (Gilbert, 1879)<sup>18</sup>. Raramente se logra llegar a dicho estado, haciendo del perfil de equilibrio un concepto ideal y transitorio, no obstante muchos cauces se logran equilibran parcialmente respecto a la longitud total del perfil longitudinal (Monroe *et al.*, 2008)<sup>19</sup>.

Un perfil longitudinal fluvial representa la variación de la elevación respecto a la distancia de un río. Cuando éste último se encuentra en equilibrio, se describe gráficamente una línea cóncava a escala lineal (Figura 2, A) (Castillo y Lugo-Hubp, 2011)<sup>20</sup>, cuya cabecera muestra una pendiente muy pronunciada, la cual va

<sup>16</sup> GROHMANN, Carlos Henrique, et al. Regional scale analysis of landform configuration with base-level (isobase) maps. *Hydrology and Earth System Sciences* [online]. 2011, vol. 15, no 5, p. 1493-1504. . Available from Internet: <<http://www.hydrology-earth-syst-sci.net/15/1493/2011/hess-15-1493-2011.pdf>>.

<sup>17</sup> BULL, William. *Geomorphic Responses to Climatic Change*. 1991. Oxford University Press, London. ISBN 9780195055702. Citado por BURBANK and ANDERSON. Op. cit., p. 245.

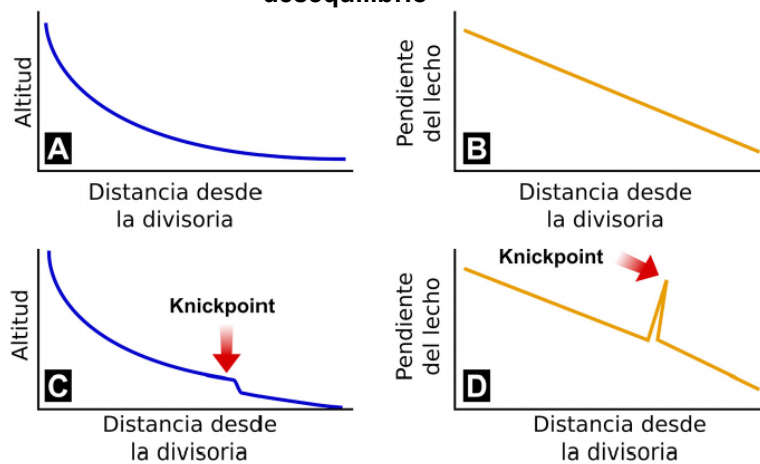
<sup>18</sup> GILBERT, Grove. *Geology of the Henry Mountains, Utah*. 1879. United States Government Printing Office. Citado por BURBANK and ANDERSON. Op. cit., p. 245.

<sup>19</sup> MONROE, James et al. *Geología. Dinámica y evolución de la Tierra*. Cuarta edición. 2008. Paraninfo, Madrid. p. 346. ISBN 978-84-9732-459-5.

<sup>20</sup> CASTILLO, Miguel y LUGO-HUBP, José. Estado actual del conocimiento, clasificación y propuesta de inclusión del término knickpoint en el léxico geológico-geomorfológico del español. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* [online]. 2011, vol. 63, no 2, p. 353-364. Disponible en internet: <<http://www.scielo.org.mx/pdf/bsgm/v63n2/v63n2a16.pdf>>.

disminuyendo a lo largo del trazado fluvial hasta su desembocadura. La representación gráfica en escala logarítmica corresponde a una línea recta en función de la pendiente del lecho del río (Figura 2, B). Cuando dicho perfil presenta un fuerte desnivel topográfico (Figura 2, C) se observa una rotura de la pendiente del lecho (Figura 2, D), demostrando así un desequilibrio en el sistema fluvial que ocasiona un *knickpoint* (Castillo y Lugo-Hubp, 2011<sup>21</sup>).

**Figura 2. Representación gráfica de un perfil longitudinal de un río en equilibrio y en desequilibrio**



Fuente: Castillo y Lugo-Hubp (2011)<sup>22</sup>.

Posiblemente, los *knickpoints* se encuentran ausentes en un perfil longitudinal cuando se ha dado lugar a una interrupción de su equilibrio en cuencas cuya tasa de incisión es más rápida (Mardones *et al.*, 2007)<sup>23</sup>, ya que el *knickpoint* es un elemento temporal de la topografía del lecho (Castillo y Lugo-Hubp, 2011)<sup>24</sup>. Las incisiones rápidas se encuentran relacionadas con el área de la cuenca (ej. Whipple

<sup>21</sup> *Ibíd.*, p. 356.

<sup>22</sup> *Ibíd.*, p. 356.

<sup>23</sup> MARDONES. *Op. cit.*, p. 81.

<sup>24</sup> CASTILLO y LUGO-HUBP. *Op. cit.*, p. 355.

y Tucker, 1999<sup>25</sup>; Bishop *et al.*, 2005<sup>26</sup>; Loget, 2005<sup>27</sup>), se ha demostrado a partir de los modelos de propagación de los *knickpoints* basados en conceptos hidráulicos regidos por leyes físicas determinísticas (Knighton, 1998)<sup>28</sup>, que existe una relación directamente proporcional al área de la cuenca (Rosenbloom y Anderson, 1994<sup>29</sup>; Hayakawa y Matsukura, 2003<sup>30</sup>; Bishop *et al.*, 2005<sup>31</sup>; Crosby y Whipple, 2006<sup>32</sup>).

Un *knickpoint* originado por la caída de nivel de base migra en dirección aguas arriba desplazándose como onda erosiva desde su punto de origen (Howard *et al.*, 1994<sup>33</sup>; Whipple y Tucker, 1999<sup>34</sup>). La Figura 3 expone gráficamente el retroceso de los *knickpoints* en el caso de una zona sometida a un levantamiento del terreno: Cada estadio sucedido durante el levantamiento (líneas discontinuas de colores cuyo orden de eventos es de abajo hacia arriba) da lugar a una caída de nivel base, originando un *knickpoint* que incide el lecho y posteriormente se desplaza hacia la cabecera. La migración del *knickpoint* es más rápida en la etapa inicial de la caída

---

<sup>25</sup> WHIPPLE, Kelin and TUCKER, Gregory. Dynamics of the stream power river incision model: Implications for height limits of mountain ranges, landscape response timescales, and research needs. *Journal of Geophysical Research* [online]. 1999, vol. 104, no B8, p. 17661-17674. Available from internet: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/1999JB900120/epdf>>. Citado por PASTOR. Op. cit., p. 32.

<sup>26</sup> BISHOP, Paul, et al. Knickpoint recession rate and catchment area: the case of uplifted rivers in Eastern Scotland. *Earth Surface Processes and Landforms* [online]. 2005, vol. 30, no 6, p. 767-778. Available from <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/esp.1191/epdf>>. Citado por PASTOR. Op. cit., p. 32.

<sup>27</sup> LOGET, Nicolas. Dynamique de l'érosion fluviale consécutive à une chute du niveau de base: l'exemple de la crise de salinité messinienne. 2005. Tesis Doctoral. Rennes 1. Citado por MARDONES. Op. cit., p. 81.

<sup>28</sup> KNIGHTON, David. *Fluvial forms and processes*. 1998. London. Edward Arnold. ISBN 0-340-66313-8. Citado por CASTILLO y LUGO-HUBP. Op. cit., p. 360.

<sup>29</sup> ROSENBLOOM, Nan and ANDERSON, Robert. Hillslope and channel evolution in a marine terraced landscape, Santa Cruz, California. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* [online]. 1994, vol. 99, no B7, p. 14013-14029. Available from internet: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/94JB00048/pdf>>. Citado por CASTILLO y LUGO-HUBP. Op. cit., p. 360.

<sup>30</sup> HAYAKAWA, Yuichi and MATSUKURA, Yukinori. Recession rates of waterfalls in Boso Peninsula, Japan, and a predictive equation. *Earth Surface Processes and Landforms* [online]. 2003, vol. 28, no 6, p. 675-684. Available from internet: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/esp.519/pdf>>. Citado por CASTILLO y LUGO-HUBP. Op. cit., p. 360.

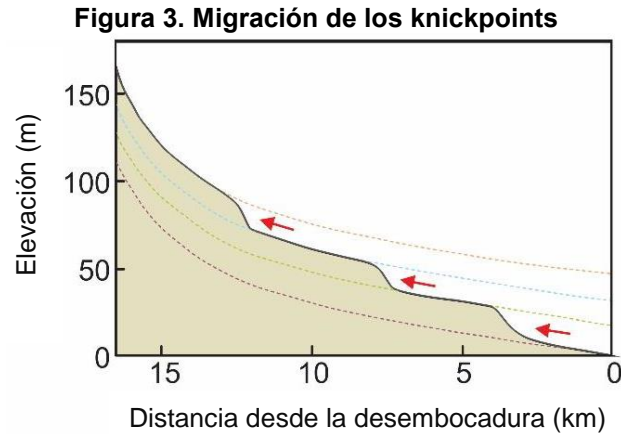
<sup>31</sup> BISHOP et al. Knickpoint recession rate and catchment area: the case of uplifted rivers in Eastern Scotland. Op. cit. Citado por CASTILLO y LUGO-HUBP. Op. cit., p. 360.

<sup>32</sup> CROSBY, Benjamin and WHIPPLE, Kelin. Knickpoint initiation and distribution within fluvial networks: 236 waterfalls in the Waipaoa River, North Island, New Zealand. *Geomorphology* [online]. 2006, vol. 82, no 1, p. 16-38. Available from internet: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X06001231>>. Citado por CASTILLO y LUGO-HUBP. Op. cit., p. 360.

<sup>33</sup> HOWARD, Alan et al. Modeling fluvial erosion on regional to continental scales. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* [online]. 1994, vol. 99, no B7, p. 13971-13986. Available from internet: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/94JB00744/pdf>>. Citado por ANTÓN, Loreto, et al. Quantification of fluvial incision in the Duero Basin (NW Iberia) from longitudinal profile analysis and terrestrial cosmogenic nuclide concentrations. *Geomorphology* [online]. 2012, vol. 165, p. 50. Available from internet: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X11006519>>.

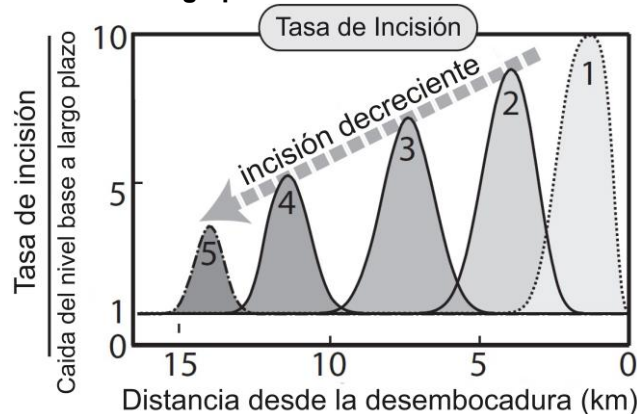
<sup>34</sup> WHIPPLE and TUCKER. Dynamics of the stream power river incision model: Implications for height limits of mountain ranges, landscape response timescales, and research needs. Op. cit. Citado por HOKE, Gregory, et al. Geomorphic evidence for post-10 Ma uplift of the western flank of the central Andes 18°30'–22°S. *Tectonics* [online]. 2007, vol. 26, no. 5, p. 1-17. Available from Internet: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2006TC002082/pdf>>.

del nivel base, debido a que el volumen y la erosión decrece aguas arriba con el tiempo (Figura 4) (Crosby *et al.*, 2007)<sup>35</sup>.



Fuente: Tomado y modificado de Burbank y Anderson (2011)<sup>36</sup>.

**Figura 4. Tasa de incisión a largo plazo de la caída del nivel base respecto al tiempo**



Fuente: Tomado y modificado de Burbank y Anderson (2011)<sup>37</sup>.

La formación de los *knickpoints* se debe a procesos exógenos y endógenos que interactúan con los cauces; además, existen otros factores de procesos anteriores heredados al sistema fluvial, por ejemplo, los *knickpoints* que describen un marcado contraste topográfico en el lecho de un río representados en cascadas, producto de

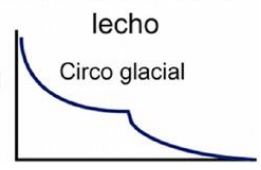

<sup>35</sup> CROSBY, Benjamin et al. Formation of fluvial hanging valleys: Theory and simulation. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* [online]. 2007, vol. 112, no F03S10. Available from internet: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/b10.1029/2006JF000566/epdf>>. Citado por BURBANK and ANDERSON. Op. cit., p. 257.

<sup>36</sup> BURBANK and ANDERSON. Op. cit., p. 257.

<sup>37</sup> *Ibíd.*, p. 257.

la erosión glacial (Castillo y Lugo-Hubp, 2011)<sup>38</sup>. Los principales mecanismo de origen de los *knickpoints* conocidos se describen en la Tabla 1.

**Tabla 1. Principales factores de formación de los knickpoints**

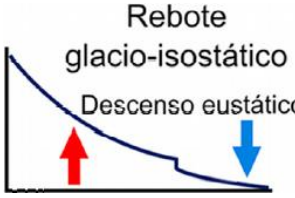
MECANISMO DE FORMACION		REPRESENTACION GRAFICA	DESCRIPCIÓN
Erosión glacial	Excavación del lecho	<p>Sobreexcavación de lecho</p> 	<p>La lengua glacial posee una alta capacidad erosiva que varía en función de su dinámica. Al presentar barreras topográficas durante su trayecto es capaz de disminuir la velocidad de flujo de hielo con lo que la erosión decrece (Sugden y John, 1976). En el trabajo de Brocklehurst y Whipple (2006) se demostró lo anteriormente mencionado, los autores observaron la presencia de pequeños <i>knickpoints</i> en un valle glacial mediante la comparación de perfiles longitudinales afectados por procesos glaciares con otros donde solamente interviene procesos fluviales en la misma zona.</p> <p>Además, existe otro proceso también relacionado en la generación de <i>knickpoints</i>: el desplazamiento del flujo de hielo donde su acumulación y velocidad es mucho mayor cerca de los circos glaciares, y que disminuye aguas abajo en condiciones de no poder alimentar la lengua glacial (Castillo y Lugo-Hubp, 2011). En esta zona de transición, es frecuente encontrar el punto de ruptura o <i>knickpoint</i> (MacGregor <i>et al.</i>, 2000; Brocklehurst y Whipple, 2006) que desarrolla una escarpe de pendiente muy marcada (alrededor del 60%) y una altura relativa aproximada a la decenas de metros (Castillo y Lugo-Hubp, 2011).</p>
	Valles colgados		<p>En un sistema glacial, la erosión en el valle principal es mayor comparado a la erosión ocurrida en los valles tributarios (MacGregor <i>et al.</i>, 2000; Brocklehurst y Whipple, 2002, 2006). La lengua glacial transporta una enorme masa de hielo, y a su vez, arrastra una gran cantidad de detritos, otorgando una alta capacidad abrasiva que excava profundamente sobre el lecho del valle principal. Se origina un valle colgado por el fuerte desnivel en el punto de confluencia del valle tributario con el valle principal, donde se origina un <i>knickpoint</i> (Castillo y Lugo-Hubp, 2011).</p>

<sup>38</sup> CASTILLO y LUGO-HUBP. Op. cit., p. 356.

Tabla 1. (Continuación)

MECANISMO DE FORMACION		REPRESENTACION GRAFICA	DESCRIPCIÓN
Eustasia		<p>Descenso eustático</p>	<p>La eustasia controla la ubicación del nivel base del sistema fluvial. En un evento transgresivo favorece los procesos de deposición, sin embargo el retroceso del nivel de mar origina procesos erosivos (Hack, 1975; Chorley <i>et al.</i>, 1986). Precisamente este último ocasiona una caída del nivel base contribuyendo a la formación de los <i>knickpoints</i> (Davis, 1932).</p>
Litología	Resistencia	<p>Contacto litológico</p>	<p>La erosión diferencial se debe a la resistencia que posee una roca respecto a otra por acción de la incisión fluvial a lo largo del perfil longitudinal, se observa un contraste de pendientes cercanos a los contactos litológicos (Hack, 1973) dando lugar a la formación de <i>knickpoints</i>, debido a que el material menos resistente se erosiona a una velocidad mayor (Castillo y Lugo-Hubp, 2011).</p>
	Estructura	<p>&gt;&gt; Resistencia</p>	<p>Este mecanismo se ha observado en campo en trabajos como von Engel, (1940), Haviv <i>et al.</i>, (2010) y Phillips <i>et al.</i>, (2010) y en laboratorio (Gardner, 1983). Engel (1940) mostró el origen de los <i>knickpoints</i> por control estructural en el caso de incisión de estratos horizontales. De otra parte, existen evidencias de la presencia de <i>knickpoints</i> en estratos verticales (Castillo y Lugo-Hubp, 2011) y reproducciones en laboratorio (Frankel <i>et al.</i>, 2007).</p>
Tectónica	Fallamiento	<p>Fallamiento</p>	<p>Al existir una falla normal o inversa que afecte el curso de un río teóricamente se da lugar a un cambio en el nivel base brusco (Burbank y Anderson, 2002), atribuido a un <i>knickpoint</i> en retroceso. Este mecanismo no está del todo sustentado por estudios geomorfológicos (Burbank y Anderson, 2001), sin embargo los <i>knickpoints</i> asociados a este mecanismo han sido presenciados cerca a fallas (Molin <i>et al.</i>, 2004; Laure, 2008; Quezada <i>et al.</i>, 2010).</p>
	Levantamiento	<p>Levantamiento</p>	<p>El origen de los <i>knickpoints</i> está asociado a la caída súbita del nivel base a razón del levantamiento tectónico (Whipple y Tucker, 1999; Wobus <i>et al.</i>, 2006; Mardones <i>et al.</i>, 2007; Quezada <i>et al.</i>, 2010; Castillo y Lugo-Hubp, 2011). Es el mecanismo más estudiado de la formación de los <i>knickpoints</i> (Castillo y Lugo-Hubp, 2011).</p>

Tabla 1. (Continuación)

MECANISMO DE FORMACION	REPRESENTACION GRAFICA	DESCRIPCIÓN
Glacioisostasia	 <p>Rebote glacio-isostático</p> <p>Descenso eustático</p>	<p>Los <i>knickpoints</i> formados por un rebote glacio-isostático son similares al mecanismo de levantamiento tectónico. Se derivan del levantamiento de la superficie a causa del derretimiento de la masa de hielo que libera carga sobre la corteza, como acontece en los casquetes glaciares (Walcott, 1973). Generalmente, el levantamiento de la superficie es de mayor magnitud que el ascenso del nivel eustático, a raíz del rebote glacial-isostático (Lambeck, 2005).</p>

Fuente: Elaborado a partir de información de Castillo y Lugo-Hubp (2011)<sup>39</sup>.

### 3.1.2 Modelo de incisión fluvial y perfil longitudinal en cauces de lecho rocoso

La reorganización de las redes fluviales se desarrolla en dos contextos a escala regional: sistemas fluviales de lecho rocosos y sistemas fluviales aluviales (Bishop, 1995)<sup>40</sup>. El primero forma valles profundos producto de la incisión de los cauces sobre las rocas, su nivel base desciende a causa del levantamiento tectónico (Wipple 2004<sup>41</sup>, p 153; Mardones *et al.*, 2007<sup>42</sup>); el segundo comprende la depositación de aluviones a causa de la elevación del cauce fluvial, originando procesos de avulsión y formación de meandros abandonados (Bishop, 1995)<sup>43</sup>. El sistema fluvial de lecho rocoso es el encargado de modelar los cauces de los ríos del área de estudio del presente trabajo debido a su ubicación en la Cordillera Oriental, comprendida de un sistema montañoso activo por procesos de levantamiento y deformación (Cooper *et al.*, 1995)<sup>44</sup>.

<sup>39</sup> *Ibid.*, p. 356-360.

<sup>40</sup> BISHOP. Drainage rearrangement by river capture, beheading and diversion. *Op. cit.*, p. 450.

<sup>41</sup> WIPPLE, Kelin. Bedrock rivers and the geomorphology of active orogens. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* [online]. 2004, vol. 32, p. 151-185. Available from Internet: <<http://www.annualreviews.org/doi/abs/10.1146/annurev.earth.32.101802.120356>>.

<sup>42</sup> MARDONES. *Op. cit.*, p. 80.

<sup>43</sup> BISHOP. Drainage rearrangement by river capture, beheading and diversion. *Op. cit.*, p. 450.

<sup>44</sup> COOPER Mark *et al.* Basin development tectonic history of the Llanos basin, Eastern Cordillera, and Middle Magdalena Valley, Colombia. *AAPG Bulletin* [online]. 1995, vol. 79, no. 10, p. 1421-1427. Available from internet: <<http://archives.datapages.com/data/bulletns/1994-96/data/pg/0079/0010/1400/1421.htm?doi=10.1306%2F7834d9f4-1721-11d7-8645000102c1865d#purchaseoptions>>.

Referente a su dinámica, los ríos se pueden clasificar en los siguientes: limitados por su capacidad de transporte (*transport-limited*) y limitados por su capacidad de desprendimiento (*detachment-limited*). El primero, su tasa de incisión se encuentra limitada por su capacidad de transporte de material sedimentario (Howard, 1980<sup>45</sup>; Howard y Kerby, 1983<sup>46</sup>), es decir, el cauce puede incidir si y solo si la capacidad de transporte local de la corriente es mayor que la carga sedimentaria que procede desde aguas arriba (Whipple y Tucker, 2002)<sup>47</sup>; esta clasificación generalmente se asocia a ríos de cauce de lecho aluvial. El segundo, la tasa de incisión es condicionada por la capacidad de erosión del cauce en su acción de abrasión y arranque del lecho fluvial (e.g. Hancock *et al.*, 1998<sup>48</sup>; Whipple *et al.*, 2000<sup>49</sup>).

Los ríos de lecho rocoso demandan lo siguiente: deben erosionar el lecho a una tasa equivalente a la que ocurre su tasa de levantamiento medido respecto a un nivel base establecido y deben transportar su carga total de sedimentos alimentada desde aguas arriba, esto siempre y cuando se encuentre en condiciones *steady-state*. Es decir en un sentido estático, *steady-state* es una condición topográfica temporal sin cambios en la misma, donde hay lugar a un balance a largo plazo entre la tasa de levantamiento y la erosión (Whipple y Tucker, 2002<sup>50</sup>).

---

<sup>45</sup> HOWARD, Alan. Thresholds in river regimes, in Thresholds in geomorphology, edited by D. COATES and D. Viteck. 1980. p. 227-258. Citado por WHIPPLE, Kelin and TUCKER, Gregory. Implications of sediment-flux-dependent river incision models for landscape evolution. Journal of Geophysical Research: Solid Earth [online]. 2002, vol. 107, no B2, p. ETG 3-1-ETG 3-20. Available from internet: <10.1029/2000JB000044>.

<sup>46</sup> HOWARD, Alan and KERBY, Gordon. Channel changes in badlands. Geological Society of America Bulletin [online]. 1983, vol. 94, no 6, p. 739-752. Available from internet: <<http://gsabulletin.gsapubs.org/content/94/6/739.full.pdf+html>>. Citado por WHIPPLE and TUCKER. Implications of sediment-flux-dependent river incision models for landscape evolution. Op. cit., p. EGT 3-2.

<sup>47</sup> WHIPPLE and TUCKER. Implications of sediment-flux-dependent river incision models for landscape evolution. Op. cit., p. EGT 3-1.

<sup>48</sup> HANCOCK, Gregory *et al.* Beyond power: Bedrock river incision process and form. 1998, in Rivers over rock: Fluvial processes in bedrock channels [online]. American Geophysical Union. TINKLER, Keith and WOHL, Ellen editors. p. 35-60. Available from internet: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/GM107p0035/pdf>>. Citado por WHIPPLE and TUCKER. Implications of sediment-flux-dependent river incision models for landscape evolution. Op. cit., p. EGT 3-2.

<sup>49</sup> WHIPPLE, Kelin *et al.* River incision into bedrock: Mechanics and relative efficacy of plucking, abrasion, and cavitation. Geological Society of America Bulletin [online]. 2000, vol. 112, no 3, p. 490-503. Available from internet: <<http://gsabulletin.gsapubs.org/content/112/3/490.full.pdf+html>>. Citado por WHIPPLE and TUCKER. Implications of sediment-flux-dependent river incision models for landscape evolution. Op. cit., p. EGT 3-2.

<sup>50</sup> WHIPPLE and TUCKER. Implications of sediment-flux-dependent river incision models for landscape evolution. Op. cit., p. ETG 3-1-ETG 3-20.

De los modelos dinámicos propuestos para ríos de lecho rocoso, la ley potencial de escorrentía (*stream power law*) satisface más los criterios de erosión física (Howard y Kerby, 1983)<sup>51</sup>; de acuerdo a esta ley, se establece una relación potencial entre la tasa de erosión local y su área de drenaje aguas arriba (Howard *et al.*, 1994)<sup>52</sup>.

$$A = k_a x^h \quad (1)$$

donde:

$A$ : área drenada

$k_a$ : constante dimensional de Hack<sup>53</sup>

$x$ : distancia aguas abajo

$h$ : exponente de Hack<sup>54</sup>

Siendo el canal del gradiente:

$$S = -\frac{dz}{dx} \quad (2)$$

Se obtiene la ecuación del perfil evolutivo de un río (Whipple *et al.*, 1999)<sup>55</sup>:

$$\frac{dz}{dt} = U(x, t) - K k_a^m x^{hm} \left| \frac{dz}{dx} \right|^n \quad (3)$$

donde:

$dz/dt$ : tasa del cambio de elevación del lecho

<sup>51</sup> HOWARD and KERBY. Channel changes in badlands. Op. cit. Citado por WHIPPLE and TUCKER. Dynamics of the stream power river incision model: Implications for height limits of mountain ranges, landscape response timescales, and research needs. Op. cit., p. 17661.

<sup>52</sup> HOWARD, Alan et al. Modeling fluvial erosion on regional to continental scales. Op. cit. Citado por WHIPPLE, Kelin et al. Geomorphic limits to climate-induced increases in topographic relief. Nature [online]. 1999, vol. 401, no 6748, p. 39-43. Available from internet: <<http://www.nature.com/nature/journal/v401/n6748/pdf/401039a0.pdf>>.

<sup>53</sup> HACK, John. Studies of longitudinal stream profiles in Virginia and Maryland. Geological Survey Professional Paper [online]. 1957, vol. 294B, p. 1-97. Available from internet: <<http://pubs.usgs.gov/pp/0294b/report.pdf>>. Citado por WHIPPLE and TUCKER. Dynamics of the stream power river incision model: Implications for height limits of mountain ranges, landscape response timescales, and research needs. Op. cit., p. 17665-17666.

<sup>54</sup> HACK. Op. cit. Citado por WHIPPLE and TUCKER. Dynamics of the stream power river incision model: Implications for height limits of mountain ranges, landscape response timescales, and research needs. Op. Cit., p. 17665-17666.

<sup>55</sup> WHIPPLE et al. Geomorphic limits to climate-induced increases in topographic relief. Op. cit. p. 40.

$U$ : tasa de levantamiento (respecto a un nivel base definido)

$K$ : coeficiente dimensional de erosión

$m$  y  $n$ : constantes dimensionales positivas que relaciona los procesos erosivos, la cuenca hidrológica y geometría del canal

Diversos estudios han observado con frecuencia que los cauces de lecho rocoso describe una relación matemática entre la pendiente del canal y el área drenada que sigue una ley potencial (e.g. Flint, 1974<sup>56</sup>; Tarboton *et al.*, 1989<sup>57</sup>), bajo condiciones *steady-state* donde la tasa de erosión  $K$  se compensa con el levantamiento  $U$  a lo largo del perfil fluvial sin cambio en el tiempo ( $dz/dt = 0$ ) (Whipple, 2001)<sup>58</sup>:

$$S = k_s A^{-\theta} \quad (4)$$

donde:

$k_s$ : índice de pendiente (steepness index)

$\theta$ : índice de concavidad (concavity index)

Cumpliendo las siguientes condiciones (Moglen y Bras; 1995<sup>59</sup>; Sklar y Dietrich, 1998<sup>60</sup>):

$$k_s = (U/K)^{\frac{1}{n}} \quad (5)$$

<sup>56</sup> FLINT, J. Stream gradient as a function of order, magnitude, and discharge. *Water Resources Research* [online]. 1974, vol. 10, no 5, p. 969-973. Available from internet: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/WR010i005p00969/pdf>>. Citado por WHIPPLE, Kelin. Fluvial landscape response time: How plausible is steady-state denudation? *American Journal of Science* [online]. 2001, vol. 301, no 4-5, p. 313-325. Available from internet: <<http://www.ajsonline.org/content/301/4-5/313.full.pdf+html>>.

<sup>57</sup> TARBOTON, David et al. Scaling and elevation in river networks. *Water Resources Research* [online]. 1989, vol. 25, no 9, p. 2037-2051. Available from internet: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/WR025i009p2037/pdf>>. Citado por WHIPPLE. Fluvial landscape response time: How plausible is steady-state denudation? *Op. cit.*, p. 319. WHIPPLE. Fluvial landscape response time: How plausible is steady-state denudation? *Op. cit.*, p. 315.

<sup>59</sup> MOGLEN, Glenn and BRAS, Rafael. The effect of spatial heterogeneities on geomorphic expression in a model of basin evolution. *Water Resources Research* [online]. 1995, vol. 31, no 10, p. 2613-2623. Available from internet: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/95WR02036/pdf>>. Citado por WHIPPLE. Fluvial landscape response time: How plausible is steady-state denudation? *Op. cit.*, p. 319.

<sup>60</sup> SKLAR, L. and DIETRICH, W. River longitudinal profiles and bedrock incision models: Stream power and the influence of sediment supply. 1998, in *Rivers over rock: fluvial processes in Bedrock channels* [online]. American Geophysical Union. TINKLER, Keith and WOHL, Ellen editors. p. 237-260. Available from internet: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/GM107p0237/pdf>>. Citado por WHIPPLE. Fluvial landscape response time: How plausible is steady-state denudation? *Op. cit.*, p. 319.

$$\theta = m/n$$

(6)

La ecuación (4) es frecuentemente empleada en el análisis de los datos de los perfiles fluviales (Sklar y Dietrich, 1998<sup>61</sup>; Tarboton *et al.*, 1989<sup>62</sup>; Montgomery y Foufoula-Georgiou, 1993<sup>63</sup>; Willgoose, 1994<sup>64</sup>; Snyder *et al.*, 2000<sup>65</sup>; Whipple, 2001<sup>66</sup>; Whipple, 2004<sup>67</sup>; Wobus *et al.*, 2006<sup>68</sup>; Hoke *et al.*, 2007<sup>69</sup>; Prince *et al.*, 2010<sup>70</sup>; Struth *et al.*, 2012<sup>71</sup>; Lague, 2014<sup>72</sup>; Struth *et al.*, 2015<sup>73</sup>), por medio del índice de pendiente se puede predisponer la tasa de levantamiento y la erosión en

---

<sup>61</sup> SKLAR and DIETRICH. River longitudinal profiles and bedrock incision models: Stream power and the influence of sediment supply. Op. cit. Citado por WHIPPLE *et al.* Geomorphic limits to climate-induced increases in topographic relief. Op. cit., p. 40.

<sup>62</sup> TARBOTON *et al.* Op. cit. Citado por WHIPPLE *et al.* Geomorphic limits to climate-induced increases in topographic relief. Op. cit., p. 40.

<sup>63</sup> MONTGOMERY, David R.; FOUFOULA-GEORGIU, Efi. Channel network source representation using digital elevation models. Water Resources Research. 1993, vol. 29, no 12, p. 3925-3934. Citado por WHIPPLE *et al.* Geomorphic limits to climate-induced increases in topographic relief. Op. cit., p. 40.

<sup>64</sup> WILLGOOSE, Garry. A physical explanation for an observed area-slope-elevation relationship for catchments with declining relief. Water Resources Research. 1994, vol. 30, no 2, p. 151-159. Citado por WHIPPLE *et al.* Geomorphic limits to climate-induced increases in topographic relief. Op. cit., p. 40.

<sup>65</sup> SNYDER, Noah *et al.* Landscape response to tectonic forcing: Digital elevation model analysis of stream profiles in the Mendocino triple junction region, northern California. Geological Society of America Bulletin. 2000, vol. 112, no 8, p. 1250-1263. Citado por WHIPPLE *et al.* Geomorphic limits to climate-induced increases in topographic relief. Op. cit., p. 40.

<sup>66</sup> WHIPPLE *et al.* Geomorphic limits to climate-induced increases in topographic relief. Op. cit., p. 319.

<sup>67</sup> WHIPPLE. Bedrock rivers and the geomorphology of active orogens. Op. cit., p.

<sup>68</sup> WOBUS, Cameron *et al.* Tectonics from topography: Procedures, promise, and pitfalls. Geological Society of America Special Papers [online]. 2006, vol. 398, p. 55-74. Available from internet: <<http://specialpapers.gsapubs.org/content/398/55.full.pdf+html>>.

<sup>69</sup> HOKE. Op. cit., p. 6.

<sup>70</sup> PRINCE, Philip *et al.* New physical evidence of the role of stream capture in active retreat of the Blue Ridge escarpment, southern Appalachians. Geomorphology [online]. 2010, vol. 123, no 3, p. 305-319. Available from internet: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X10003363>>.

<sup>71</sup> STRUTH, Lucía *et al.* Tectónica y evolución de la red de drenaje en la Cordillera Oriental de Colombia. Geotemas [online]. 2012, vol. 13, p.1-4. Available from internet: <[http://gent.uab.cat/ateixell/sites/gent.uab.cat.ateixell/files/Struth%20et%20al%20Geotemas%202012\\_0.pdf](http://gent.uab.cat/ateixell/sites/gent.uab.cat.ateixell/files/Struth%20et%20al%20Geotemas%202012_0.pdf)>.

<sup>72</sup> LAGUE, Dimitri. The stream power river incision model: evidence, theory and beyond. Earth Surface Processes and Landforms [online]. 2014, vol. 39, no 1, p. 38-61. Available from internet: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/esp.3462/pdf>>.

<sup>73</sup> STRUTH, Lucía *et al.* Drainage reorganization during mountain building in the river system of the Eastern Cordillera of the Colombian Andes. Op. cit., p. 376.

una red de drenaje (e. g. Kirby y Whipple, 2001<sup>74</sup>; Kirby *et al.*, 2003<sup>75</sup>; Snyder *et al.*, 2003<sup>76</sup>; Wobus *et al.*, 2006<sup>77</sup>; DiBiase *et al.*, 2010<sup>78</sup>).

Finalmente, integrando la ecuación (3) del perfil fluvial evolutivo de un río en condiciones *steady-state*, se obtiene el modelo del perfil longitudinal bidimensional de un río de lecho rocoso (Whipple y Tucker, 1999<sup>79</sup>; Whipple *et al.*, 1999<sup>80</sup>; Whipple, 2001<sup>81</sup>):

$$R_f = z(x_c) - z(L) = \left(\frac{U}{K}\right)^{\frac{1}{n}} k_a^{-\frac{m}{n}} \left(1 - \frac{hm}{n}\right)^{-1} \left(L^{1-\frac{hm}{n}} - x_c^{1-\frac{hm}{n}}\right) \quad (7)$$

Simplificando la expresión en los términos de las condiciones (5) y (6):

$$z(x_c) = k_s k_a^{-\theta} (1 - h\theta)^{-1} (L^{1-h\theta} - x_c^{1-h\theta}) + z(L) \quad (8)$$

donde:

$z$ : elevación

$x_c$ : distancia desde la cabecera

$L$ : distancia hacia la desembocadura

Siendo  $h\theta \neq 1$  y  $x_c \leq x \leq L$ .

<sup>74</sup> KIRBY, Eric and WHIPPLE, Kelin. Quantifying differential rock-uplift rates via stream profile analysis. *Geology* [online]. 2001. vol. 29, no 5, p. 415-418. Available from internet: <<http://geology.gsapubs.org/content/29/5/415.full.pdf+html>>. Citado por STRUTH et al. Drainage reorganization during mountain building in the river system of the Eastern Cordillera of the Colombian Andes. Op. cit., p. 376.

<sup>75</sup> KIRBY, Eric, et al. Distribution of active rock uplift along the eastern margin of the Tibetan Plateau: Inferences from bedrock channel longitudinal profiles. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* [online]. 2003, vol. 108, no B4. Available from internet: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2001JB000861/epdf>>. Citado por STRUTH et al. Drainage reorganization during mountain building in the river system of the Eastern Cordillera of the Colombian Andes. Op. cit., p. 376.

<sup>76</sup> SNYDER, Noah, et al. Channel response to tectonic forcing: field analysis of stream morphology and hydrology in the Mendocino triple junction region, northern California. *Geomorphology*. 2003, vol. 53, no 1, p. 97-127. Citado por STRUTH et al. Drainage reorganization during mountain building in the river system of the Eastern Cordillera of the Colombian Andes. Op. cit., p. 376.

<sup>77</sup> WOBUS et al. Op. cit. Citado por STRUTH et al. Drainage reorganization during mountain building in the river system of the Eastern Cordillera of the Colombian Andes. Op. cit., p. 376.

<sup>78</sup> DIBIASE, Roman, et al. Landscape form and millennial erosion rates in the San Gabriel Mountains, CA. *Earth and Planetary Science Letters*. 2010, vol. 289, no 1, p. 134-144. Citado por STRUTH et al. Drainage reorganization during mountain building in the river system of the Eastern Cordillera of the Colombian Andes. Op. cit., p. 376.

<sup>79</sup> WHIPPLE and TUCKER. Dynamics of the stream power river incision model: Implications for height limits of mountain ranges, landscape response timescales, and research needs. Op. cit. Citado por WHIPPLE. Fluvial landscape response time: How plausible is steady-state denudation? Op. cit., p. 315.

<sup>80</sup> WHIPPLE et al. Geomorphic limits to climate-induced increases in topographic relief. Op. cit. p. 40.

<sup>81</sup> WHIPPLE. Fluvial landscape response time: How plausible is steady-state denudation? Op. cit., p. 315.

### 3.1.3 Características de la reorganización de la red de drenaje y tipo de evidencias

La evolución topográfica de un orógeno activo está determinada por los patrones y las tasas de incisión fluvial del cauce de lecho rocoso (Snyder *et al.*, 2000<sup>82</sup>; Wipple, 2004<sup>83</sup>). En este contexto geológico donde predomina la incisión fluvial, los cauces se reorganizan como respuesta a la tendencia del sistema fluvial: establecer su perfil de equilibrio (Pastor, 2013)<sup>84</sup>. Bishop (1995)<sup>85</sup> cita que es importante distinguir dos aspectos en la reorganización de la red de drenajes en cinturones montañosos: la reorganización de áreas de captación y la reorganización del trazado del drenaje.

El primero ocurre cuando el área de captación de una cuenca se transfiere a otra adyacente mediante el desplazamiento progresivo de la divisoria de aguas (Bishop, 1995)<sup>86</sup>, que favorece a aquella que ya sea por sus condiciones de suelo, mayor pendiente o precipitaciones logra una mayor expansión (Pastor, 2013)<sup>87</sup>, dando lugar a un proceso de corrientes decapitadas (*beheading*) (Bishop, 1995)<sup>88</sup> (Figura 5A superior). El segundo consiste en la transferencia de áreas de captación y del trazado del drenaje de una cuenca a otra; se diferencia del anterior porque conserva el trazado del drenaje inicial, aquel que comprende desde su cabecera hasta la zona de captación culminando en una captura fluvial (*stream capture* o *piracy*) (Bishop, 1995)<sup>89,90</sup> (Figura 5A inferior).

---

<sup>82</sup> SNYDER et al. Landscape response to tectonic forcing: Digital elevation model analysis of stream profiles in the Mendocino triple junction region, northern California. Op cit., p. 1250.

<sup>83</sup> WHIPPLE. Bedrock rivers and the geomorphology of active orogens. Op. cit., p. 151.

<sup>84</sup> PASTOR. Op. cit., p. 28.

<sup>85</sup> BISHOP. Drainage rearrangement by river capture, beheading and diversion. Op. cit., p. 455.

<sup>86</sup> BISHOP. Drainage rearrangement by river capture, beheading and diversion. Op. cit. Citado por STRUTH et al. Drainage reorganization during mountain building in the river system of the Eastern Cordillera of the Colombian Andes. Op. cit., p. 375.

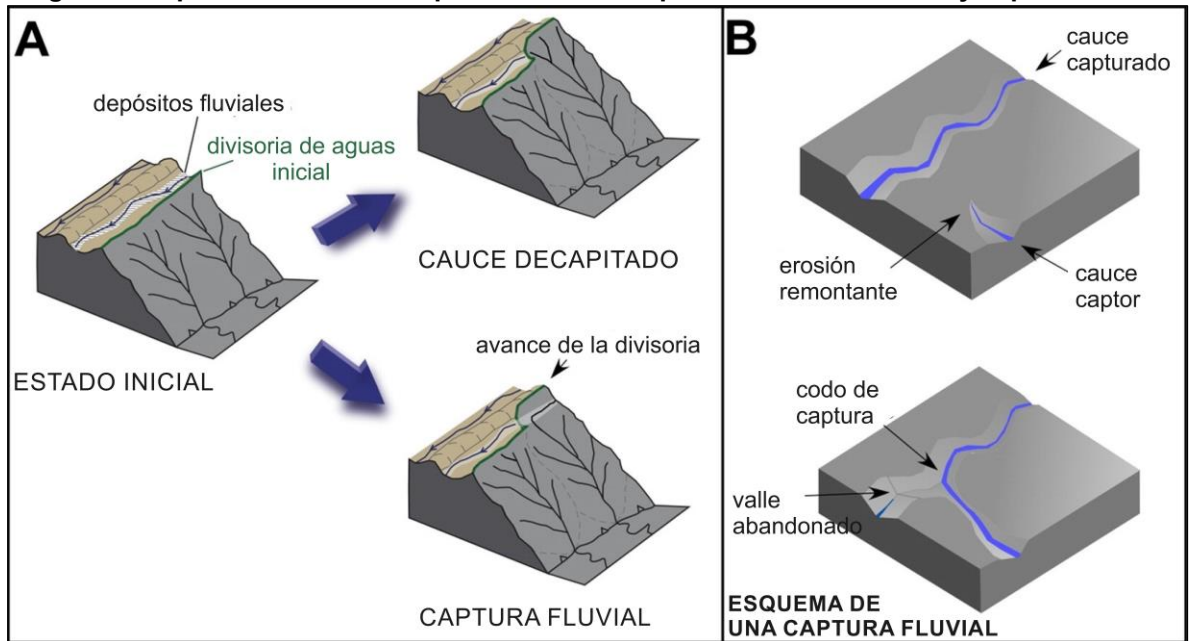
<sup>87</sup> PASTOR. Op. cit., p. 28.

<sup>88</sup> BISHOP. Drainage rearrangement by river capture, beheading and diversion. Op. cit., p. 455.

<sup>89</sup> *Ibíd.*, p. 455.

<sup>90</sup> BISHOP. Drainage rearrangement by river capture, beheading and diversion. Op. cit. Citado por STRUTH et al. Drainage reorganization during mountain building in the river system of the Eastern Cordillera of the Colombian Andes. Op. cit., p. 375.

**Figura 5. Representación de los procesos de decapitación de la corriente y captura fluvial**



Fuente: Tomado y modificado de Struth *et al.* (2015)<sup>91</sup>.

Las formas de reorganización fluvial más citada y estudiada son los eventos de captura por erosión remontante (Bishop, 1995<sup>92</sup>; Pastor, 2013<sup>93</sup>). La erosión remontante (*headward erosion*) funciona como un mecanismo de expansión (Bishop, 1995<sup>94</sup>; Pastor, 2013<sup>95</sup>), ya que los ríos poseen un comportamiento universal que tiende a extender sus cauces aguas arriba hasta llegar a los límites de la divisoria erosionando las cabeceras (Christiansen y Kenneth; 2014)<sup>96</sup>.

En una captura fluvial el curso de agua de nivel base mayor (cauce capturado) es desviado hacia otro cauce de nivel base menor (cauce captor), incrementando el área de drenaje de una cuenca a expensas de otra (Pastor, 2013<sup>97</sup>; Mardones *et al.*, 2007<sup>98</sup>); para que esto ocurra se requiere de la interacción de dos cuencas

<sup>91</sup> STRUTH *et al.* Drainage reorganization during mountain building in the river system of the Eastern Cordillera of the Colombian Andes. *Op. cit.*, p. 375.

<sup>92</sup> BISHOP. Drainage rearrangement by river capture, beheading and diversion. *Op. cit.*, p. 457.

<sup>93</sup> PASTOR. *Op. cit.*, p. 29.

<sup>94</sup> BISHOP. Drainage rearrangement by river capture, beheading and diversion. *Op. cit.*, p. 463.

<sup>95</sup> PASTOR. *Op. cit.*, p. 29.

<sup>96</sup> CHRISTIANSEN, Eric and KENNETH, William. *Dynamic Earth*. Jones & Bartlett Publishers, 2014. ISBN 1449659020. p. 333.

<sup>97</sup> PASTOR. *Op. cit.*, p. 28.

<sup>98</sup> MARDONES. *Op. cit.*, p. 80.

adyacentes separadas por una divisoria de aguas y que exista una diferencia de altura topográfica suficiente entre los dos cauces involucrados con distinto potencial erosivo capaz de llevar a cabo el evento de captura (Small, 1978<sup>99</sup>; Pastor, 2013<sup>100</sup>).

La Figura 6 representa una serie de capturas fluviales en vista de planta, describiendo la evolución del trazado fluvial del río Shennandoah ubicado en el estado de Virginia (E.E.U.U). Debido a que la incisión fluvial es mayor en materiales blandos, los cauces orientados en dirección aproximada N-S de mayor potencial erosivo captura los drenajes que atraviesan el sistema montañoso Blue Ridge constituido de materiales más duros. Los círculos discontinuos de color rojo señalan las capturas fluviales y los círculos continuos de color verde corresponden a valles antiguos abandonados, donde ya no fluye el agua a causa de la captura fluvial (Judson y Kauffman, 1990)<sup>101</sup>.

Los tipos de evidencias de las capturas fluviales son geomorfológicas (e.g. Keller *et al.*, 1999)<sup>102</sup> y estratigráficas (e.g. Mikesell *et al.*, 2010)<sup>103</sup>. Los más comunes de tipo geomorfológico se encuentran los valles abandonados (*wind gaps*) y los codos de captura (*elbow*): el primero comprende un valle seco, donde fluía un antiguo cauce antes de ser capturado. El segundo es un cambio brusco de la dirección que fluye el río a causa de una captura fluvial, el codo descrito se encuentra entre el cauce capturado y el cauce captor (Bishop, 1995)<sup>104</sup>, adicionalmente se acompaña de un *knickpoint* (punto de rejuvenecimiento del río) ubicado en el cauce capturado o aguas arriba del codo de captura (Small, 1978)<sup>105</sup>.

---

<sup>99</sup> SMALL, R. The Study of Landforms: A Textbook of Geomorphology. Second edition. Cambridge University Press, 1978. ISBN 0521292387. Citado por BISHOP. Drainage rearrangement by river capture, beheading and diversion. Op. cit., p. 462.

<sup>100</sup> PASTOR. Op. cit., p. 30.

<sup>101</sup> JUDSON, Sheldon and KAUFFMAN, Marvin. Physical geology. 1990. Prentice Hall. Citado por PASTOR. Op. cit., p. 33-34.

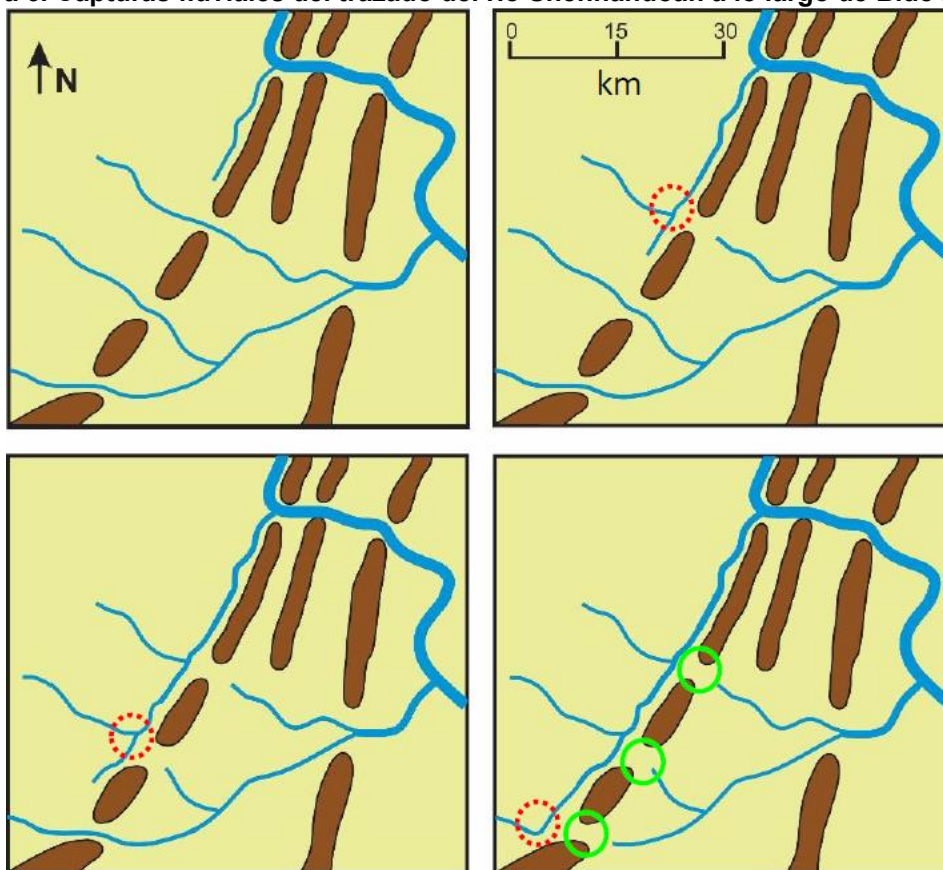
<sup>102</sup> KELLER, Edward. et al. Geomorphic criteria to determine direction of lateral propagation of reverse faulting and folding. Geology [online]. 1999, vol. 27, no 6, p. 515-518. Available from internet: <<http://geology.gsapubs.org/content/27/6/515.full.pdf+html>>. Citado por PASTOR. Op. cit., p. 28.

<sup>103</sup> MIKESELL, Leslie et al. Stream capture and piracy recorded by provenance in fluvial fan strata. Geomorphology [online]. 2010, vol. 115, no 3, p. 267-277. Available from internet: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X09003778>>. Citado por PASTOR. Op. cit., p. 28.

<sup>104</sup> BISHOP. Drainage rearrangement by river capture, beheading and diversion. Op. cit., p. 458.

<sup>105</sup> SMALL. Op. cit. Citado por BISHOP. Drainage rearrangement by river capture, beheading and diversion. Op. cit., p. 458.

Figura 6. Capturas fluviales del trazado del río Shennandoah a lo largo de Blue Ridge.



Fuente: Tomado y modificado de Pastor (2013), modificado de Judson y Kauffman (1990)<sup>106</sup>.

La evidencia de tipo estratigráfica es observable en el terreno: por ejemplo la presencia de terrazas fluviales conformadas por fragmentos de roca de gran tamaño, cuyo cauce actual no tendría la capacidad de transporte suficiente de dicho depósito o la presencia de una acumulación sedimentaria fluvial con litología procedente de su área fuente que se encuentra actualmente desconectada (Struth *et al.*, 2015)<sup>107</sup>; este tipo de evidencia suele ser concluyente para probar la existencia de una captura fluvial (Pastor, 2013)<sup>108</sup>.

<sup>106</sup> JUDSON and KAUFFMAN. Op. Cit. Citador por PASTOR. Op. cit., p. 33.

<sup>107</sup> STRUTH et al. Drainage reorganization during mountain building in the river system of the Eastern Cordillera of the Colombian Andes. Op. cit., p. 375.

<sup>108</sup> PASTOR. Op. cit., p. 29.

El bloque diagrama esquemático representan una etapa anterior (Figura 5B inferior) y posterior (Figura 5B superior) a la captura fluvial, inicialmente se observa que el cauce captor se extiende retrocediendo su cabecera por erosión remontante. Al llegar a los límites de la divisoria, se encuentra con un cauce de nivel base mayor, lo captura y desvía sus aguas hacia el cauce de nivel base menor. Se puede apreciar la ubicación del codo de captura y del valle abandonado donde reposa depósitos fluviales que no pudieron ser transportados por el cauce actual, igualmente se aprecia la preservación de la línea de drenaje inicial (comprende el trazado geométrico del cauce capturado ubicado desde la cabecera hasta el codo de captura). A diferencia de las evidencias de captura fluvial, las corrientes decapitadas no presenta las líneas de drenaje inicial (Bishop, 1995)<sup>109</sup>, los codos de captura ni los valles abandonados (Van de Graaff *et al.*, 1977)<sup>110</sup>.

### **3.1.4 La importancia de la reorganización del drenaje y su modelo de evolución en orógenos de inversión tectónica.**

El estudio de la reorganización del drenaje es de vital importancia, los procesos relacionados influyen en el aporte de volúmenes de agua a las cuencas hidrográficas y su transferencia de una cuenca a otra (Bishop, 1995<sup>111</sup>; Pastor, 2013<sup>112</sup>); afectan la proveniencia, cantidad y distribución en el espacio de sedimentos desempeñando un rol importante en el estudio de cuencas sedimentarias (Bishop, 1995<sup>113</sup>; Viaplana *et al.*, 2012<sup>114</sup>), conllevan impactos significativos en la distribución de la fauna y flora (Bishop 1995<sup>115</sup>; Albert y Crampton, 2010<sup>116</sup>); y otorgan un valioso aporte en la exploración de recursos

---

<sup>109</sup> BISHOP. Drainage rearrangement by river capture, beheading and diversion. Op. cit., p. 462.

<sup>110</sup> VAN DE GRAAFF, W. Relict early Cainozoic drainages in arid Western Australia. Zeitschrift für Geomorphologie. 1977, vol. 21, no 4, p. 379-400. Citado por BISHOP. Drainage rearrangement by river capture, beheading and diversion. Op. cit. p., 462.

<sup>111</sup> BISHOP. Drainage rearrangement by river capture, beheading and diversion. Op. cit., p. 455.

<sup>112</sup> PASTOR. Op. cit., p. 29, 36.

<sup>113</sup> BISHOP. Drainage rearrangement by river capture, beheading and diversion. Op. cit., p. 451.

<sup>114</sup> VIAPLANA, M. et al. Modelización experimental de la dinámica de la red de drenaje fluvial en cuñas de cabalgamientos. Congreso de la Sociedad Española de Geología [online]. Oviedo. 2012. Available from internet: <[http://gent.uab.cat/ateixell/sites/gent.uab.cat.ateixell/files/Viaplana%20et%20al%20Geotemas%202012\\_0.pdf](http://gent.uab.cat/ateixell/sites/gent.uab.cat.ateixell/files/Viaplana%20et%20al%20Geotemas%202012_0.pdf)>. Citado por PASTOR. Op. cit., p. 36.

<sup>115</sup> BISHOP. Drainage rearrangement by river capture, beheading and diversion. Op. cit., p. 452.

<sup>116</sup> ALBERT and CRAMPTON. Op. cit. Citado por PASTOR. Op. cit., p. 36.

naturales como depósitos de tipo placer (Bishop, 1995)<sup>117</sup> e hidrocarburos (Pastor, 2013)<sup>118</sup>. Hay un valor potencial en la historia de los ríos y su conocimiento referente a las características y patrones de drenaje desarrollados en la reorganización de sus cauces.

Durante la formación de un orógeno surgen estructuras tectónicas como anticlinales, sinclinales y fallas de cabalgamiento, que pueden afectar el trazado de los cauces haciendo que los ríos fluyan paralelo al sistema montañoso (Van der Beek *et al.*, 2002)<sup>119</sup>. Esta característica ha sido observada en Siwalik Hills de Himalaya (Gupta, 1997)<sup>120</sup>, en la vertiente oriental de la cordillera de los Andes (Mon, 2005)<sup>121</sup>, en la Cordillera del Zagros de Irán (Ramsey *et al.*, 2008)<sup>122</sup> y en la Cordillera de la costa de Chile (Rehak *et al.*, 2008)<sup>123</sup>. De otra parte, el trabajo de Hovius (1996)<sup>124</sup> demostró mediante el análisis de 11 cadenas montañosas activas, la exposición de un patrón de drenaje transversal de los cauces adyacentes en los frentes de montaña.

---

<sup>117</sup> BISHOP. Drainage rearrangement by river capture, beheading and diversion. Op. cit., p. 451.

<sup>118</sup> PASTOR. Op. cit., p. 36.

<sup>119</sup> VAN DER BEEK, Peter et al. Control of detachment dip on drainage development in regions of active fault-propagation folding. *Geology* [online]. 2002, vol. 30, no 5, p. 471-474. Available from internet: <<http://geology.gsapubs.org/content/30/5/471.full.pdf+html>>. Citado por PASTOR. Op. cit., p. 32.

<sup>120</sup> GUPTA, Sanjeev. Himalayan drainage patterns and the origin of fluvial megafans in the Ganges foreland basin. *Geology* [online]. 1997, vol. 25, no 1, p. 11-14. Available from internet: <<http://geology.gsapubs.org/content/25/1/11.full.pdf+html>>. Citado por PASTOR. Op. cit., p. 32.

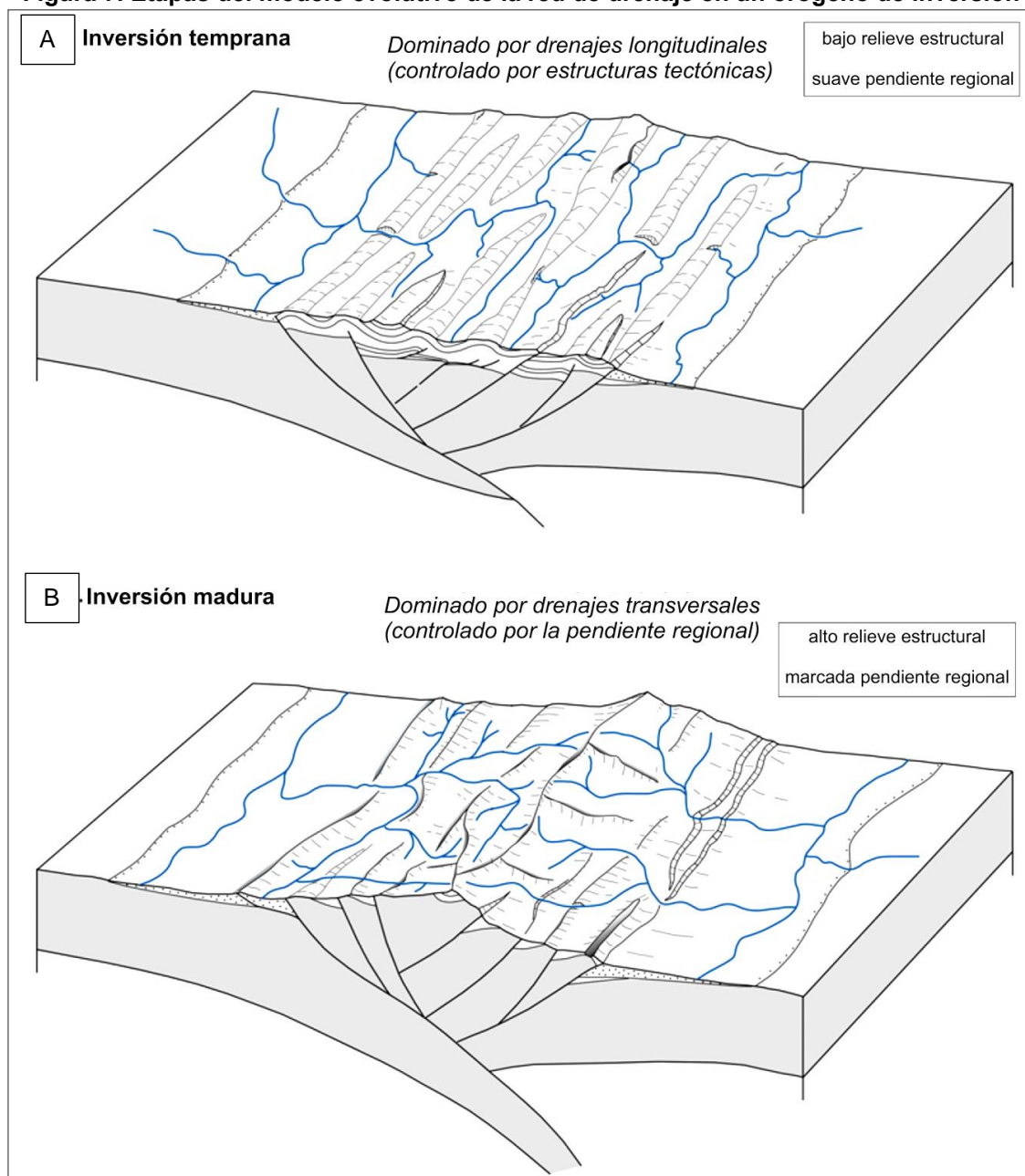
<sup>121</sup> MON, R. Control tectónico de la red de drenaje de los Andes del norte argentino. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* [online]. 2005, vol. 60, no 3, p. 461-466. Available from internet: <<http://www.scielo.org.ar/pdf/raga/v60n3/v60n3a03.pdf>>. Citado por PASTOR. Op. cit., p. 32.

<sup>122</sup> RAMSEY, Lucy et al. Fold evolution and drainage development in the Zagros mountains of Fars province, SE Iran. *Basin Research* [online]. 2008, vol. 20, no 1, p. 23-48. Available from internet: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-2117.2007.00342.x/full>>. Citado por PASTOR. Op. cit., p. 32.

<sup>123</sup> REHAK, Katrin et al. Morphotectonic segmentation of an active forearc, 37°– 41° S, Chile. *Geomorphology* [online]. 2008, vol. 94, no 1, p. 98-116. Available from internet: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X07002279>>. Citado por PASTOR. Op. cit., p. 36.

<sup>124</sup> HOVIUS, Niels. Regular spacing of drainage outlets from linear mountain belts. *Basin Research* [online]. 1996, vol. 8, no. 1, p. 29-44. Available from internet: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-2117.1996.tb00113.x/full>>.

**Figura 7. Etapas del modelo evolutivo de la red de drenaje en un orógeno de inversión**



Fuente: Tomado y de Babault *et al.* (2013), modificado de Babault *et al.* (2012)<sup>125</sup>.

Las configuraciones mencionadas han sido reconocidas en el trabajo de Babault *et al.* (2013)<sup>126</sup>, basado en las observaciones del Alto Atlas de Marruecos, la Cordillera

<sup>125</sup> BABAULT *et al.* Shortening, structural relief and drainage evolution in inverted rifts: insights from the Atlas Mountains, the Easter Cordillera of Colombia and the Pyrenees. *Op. cit.*, p. 152.

<sup>126</sup> BABAULT *et al.* Shortening, structural relief and drainage evolution in inverted rifts: insights from the Atlas Mountains, the Easter Cordillera of Colombia and the Pyrenees. *Op. cit.*, p. 141.

Oriental de Colombia y los Pirineos, estos sistemas montañosos son cinturones de cabalgamiento que tienen en común su formación por inversión tectónica a partir de *riffts* continentales. El estudio citado describe características similares en el estilo estructural, la topografía y la evolución del drenaje: En el Alto Atlas y la Cordillera Oriental se tiene un dominio de ríos paralelos al interior del orógeno, controlados por estructuras tectónicas o encajonados en fallas y ríos transversales que inciden en sus flancos; en cambio en los Pirineos, su zona axial se encuentran dominado por ríos transversales (Babault *et al.*, 2013)<sup>127</sup>. Este último sistema montañoso se diferencia de los demás por presentar una mayor magnitud en su acortamiento, por ende un desarrollo de una pendiente regional pronunciada y un fuerte relieve estructural (Babault *et al.*, 2013)<sup>128</sup>. Adicionalmente, otros estudios sugieren que los ríos longitudinales antecede al desarrollo de los ríos transversales en los flancos del orógeno (Babault *et al.*, 2007<sup>129</sup>; Babault *et al.*, 2012<sup>130</sup>; Struth *et al.*, 2012<sup>131</sup>).

Los autores proponen que la evolución de la red de drenaje comprende de dos estadios (Figura 7): El primero, una inversión temprana del *rift* con un patrón de drenaje longitudinal controlado por las estructuras tectónicas incipientes, pasando a un segundo estadio que transforma el patrón de drenaje a uno transversal, controlado por la pendiente regional representado en un mayor acortamiento de la corteza terrestre (Babault *et al.*, 2013)<sup>132</sup>. En desarrollo de los ríos transversales se debe probablemente al mecanismo de la erosión remontante mediante capturas

---

<sup>127</sup> *Ibid.*, p. 149-151.

<sup>128</sup> *Ibid.*, p. 149.

<sup>129</sup> BABAULT, Julien *et al.* High Atlas morphology: insight from the drainage pattern. III workshop of the ILP Task force on Sedimentary Basins [online]. Marrakech. 2007. Available from internet: <[http://www.searchanddiscovery.com/pdfz/abstracts/pdf/2008/mapg\\_morocco/abstracts/ndx\\_babault.pdf.html](http://www.searchanddiscovery.com/pdfz/abstracts/pdf/2008/mapg_morocco/abstracts/ndx_babault.pdf.html)>. Citado por BABAULT *et al.* Shortening, structural relief and drainage evolution in inverted rifts: insights from the Atlas Mountains, the Easter Cordillera of Colombia and the Pyrenees. *Op. cit.*, p. 141.

<sup>130</sup> BABAULT, Julien *et al.* Longitudinal to transverse drainage network evolution in the High Atlas (Morocco): The role of tectonics. *Tectonics* [online]. 2012, vol. 31, no 4, p. 1-15. Available from internet: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2011TC.003015/epdf>> Citado por BABAULT *et al.* Shortening, structural relief and drainage evolution in inverted rifts: insights from the Atlas Mountains, the Easter Cordillera of Colombia and the Pyrenees. *Op. cit.*, p. 141.

<sup>131</sup> STRUTH *et al.* Tectónica y evolución de la red de drenaje en la Cordillera Oriental de Colombia. *Op. cit.*, p. 1, 4.

<sup>132</sup> *Ibid.*, p. 152-153.

fluviales (Struth *et al.*, 2012)<sup>133</sup>. Las características principales de los estadios de evolución se resumen en la Tabla 2.

**Tabla 2. Características principales de los estadios de evolución de la red de drenaje en orógenos de inversión (Babault *et al.* 2013)**

CARACTERÍSTICAS	ESTADIO 1	ESTADIO 2
	INVERSIÓN TEMPRANA DEL RIFT	INVERSIÓN MADURA DEL RIFT
Acortamiento de la corteza	Menor	Mayor
Deformación	Distribuidos en los depósitos de la anterior cuenca rift	En los márgenes de la cuenca
Patrón de drenaje predominante	Longitudinal	Transversal
Relieve Estructural	Suave	Fuerte
Pendiente Regional	Suave	Pronunciada
Factor de control	Estructuras tectónicas	Pendiente regional

Fuente: Elaborado a partir de información de Babault *et al.* (2013)<sup>134</sup>.

<sup>133</sup> STRUTH *et al.* Tectónica y evolución de la red de drenaje en la Cordillera Oriental de Colombia. Op. cit. Citado por BABAULT *et al.* Shortening, structural relief and drainage evolution in inverted rifts: insights from the Atlas Mountains, the Easter Cordillera of Colombia and the Pyrenees. Op. cit., p. 152.

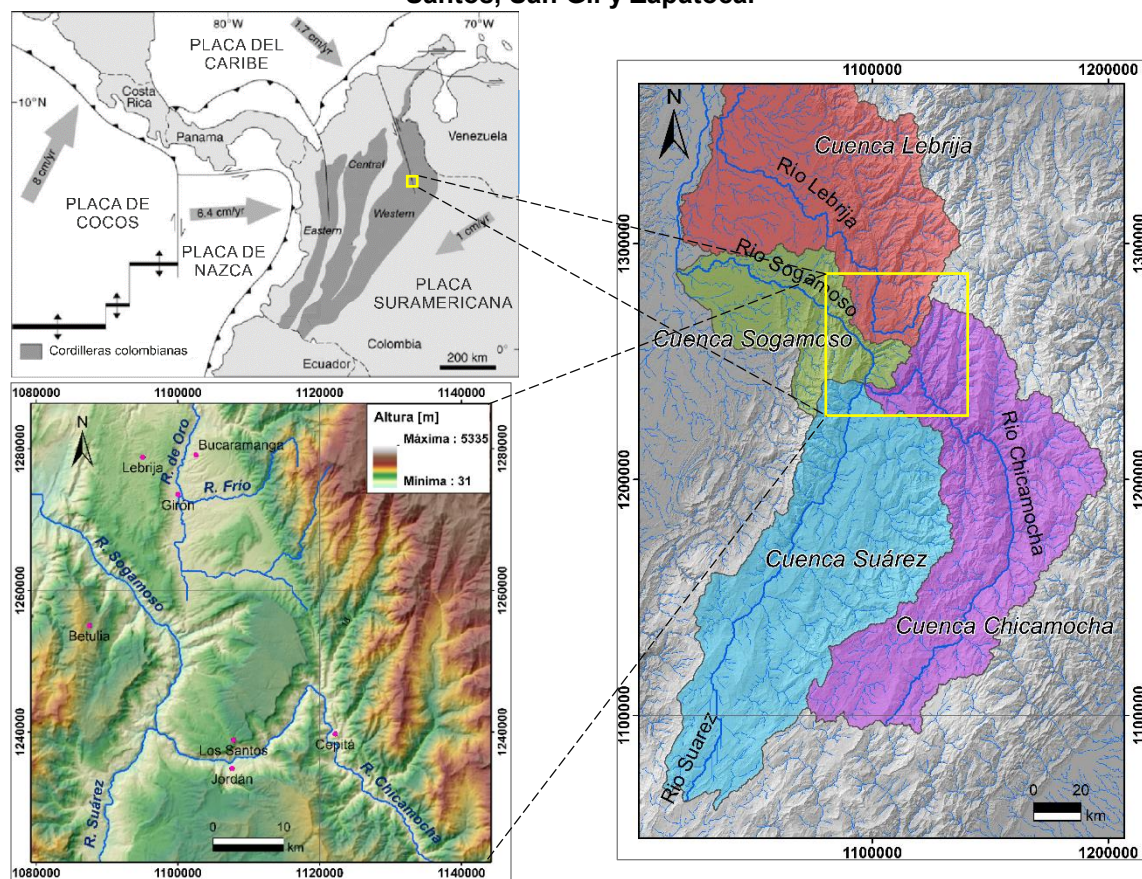
<sup>134</sup> BABAULT *et al.* Shortening, structural relief and drainage evolution in inverted rifts: insights from the Atlas Mountains, the Easter Cordillera of Colombia and the Pyrenees. Op. cit., p. 152.

## 4. GENERALIDADES

### 4.1 LOCALIZACIÓN

La ubicación de la zona de estudio se encuentra limitada por el área comprendida entre las coordenadas planas X:1.079.250 a X:1.144.250 y Y:1.221.750 a Y:1.286.500 (Datum Bogotá, origen Bogotá) señalada en la Figura 8.

**Figura 8. Localización de la zona de estudio. Sector las mesas de Bucaramanga, Lebrija, Los Santos, San Gil y Zapatoa.**



Fuente: Tomado y modificado de Rodríguez-Vargas *et al.* (2005)<sup>135</sup> [imagen superior izquierda]; elaborado a partir de información del IDEAM (2013)<sup>136</sup> y modificado [imagen derecha].

<sup>135</sup>RODRIGUEZ-VARGAS, A. et al. Mantle diversity beneath the Colombian Andes, northern volcanic zone: constraints from Sr and Nd Isotopes. *Lithos* [online]. 2005, vol. 82, no 3, p. 471-484. Available from internet :<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0024493705000277>>.

<sup>136</sup> COLOMBIA. INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES – IDEAM. Zonificación y codificación de unidades hidrográficas e hidrogeológicas de Colombia, 2013. Colombia. p. 1-46.

El área de estudio mencionada hace parte de la Cuenca Valle Medio de Magdalena (CVM), de la Cordillera Oriental de Colombia y el Macizo de Santander en su sector Este, sector central y sector Oeste respectivamente. Además, se conforman parcialmente la zona de las mesas de Bucaramanga, Lebrija, Los Santos, San Gil y Zapatoca descrita por Juliver (1958)<sup>137</sup>.

Las coordenadas de estudio se contemplan en las planchas topográficas 109-III-D, 109-IV-C, 109-IV-D, 110-III-C, 120-I-B, 120-I-D, 120-II-A, 120-II-B, 120-II-C, 120-II-D, 120-III-B, 120-III-D, 120-IV-A, 120-IV-B, 120-IV-C, 120-IV-D, 121-I-A, 121-I-C, 121-III-A, 121-III-C, 135-I-B, 135-I-D, 135-II-A, 135-II-B, 135-II-C, 135-II-D, 136-I-A, y 136-I-C del IGAC, Las Planchas geológicas 109 Rionegro, 110 Pamplona, 120 Bucaramanga, 121 Cerrito, 135 San Gil, 136 Málaga y Cuadrángulo H-12 de INGEOMINAS.

## **4.2 ANTECEDENTES**

Los procesos fluviales requieren de un constante estudio, los cuales pueden tener influencia en el trazado de vías, la construcción de áreas urbanas, la destinación del uso del suelo, el desarrollo del paisaje y la disposición de recursos hídricos. Teniendo en cuenta lo anterior y su importancia en la historia evolutiva fluvial, son pocos los estudios que se pueden referenciar y que se relacionen al área de interés de este trabajo, los cuales se detallan a continuación.

Julivert (1958)<sup>138</sup> publica un trabajo llamado “La Morfoestructura de la Zona de las Mesas al SW de Bucaramanga”, donde plantea que el área denominada la zona de las Mesas (región tabular ubicada entre el valle del Magdalena y el Macizo de Santander que se extiende hacia al N más allá del municipio de Bucaramanga y

---

<sup>137</sup> JULIVERT. Op. cit. p. 10.

<sup>138</sup> JULIVERT. Op. cit. p. 7-43.

hacia el S por los alrededores de Vélez) era una plataforma primitiva con una red de drenaje sin orientación alguna. Posteriormente, fue sometida a elevación, fracturación y deformación, dando lugar a la formación de pendientes y estructuras tectónica que desarrolla cursos de aguas definidos. Esto sumado a la incisión de los ríos da origen a la actual región de las mesas. Además, destaca la anomalía de la trayectoria de los ríos Chicamocha y Sogamoso, el primero por presentar un codo al WSW de Umpalá abandonando la dirección de la Falla Bucaramanga y el segundo por cambiar su dirección y salir del dominio de la Falla del Suarez; el autor lo atribuye a capturas fluviales. Dicho estudio se basa en evidencias geomorfológicas, topográficas, fluviales y sedimentológicas para concluir, finalmente, que su morfología se debe a la organización de la red de drenaje más que a la intervención tectónica.

Posteriormente, el trabajo de Ballesteros (2002)<sup>139</sup> denominado “Estudio Geomorfológico-paisajístico del Cañón del río Chicamocha en el tramo Cepitá-Pescadero-Jordán: Aporte al conocimiento del Patrimonio Geológico del Departamento de Santander”, analiza un evento de captura en el Chicamocha sustentado con el codo de captura en inmediaciones del río Umpalá y complementado con el análisis composicional de bloques en los depósitos ubicados por los sectores del Cepita y Pescadero de procedencia NE, que serían las evidencias del cambio del flujo del Chicamocha (N-S). Sin embargo, expone que el factor principal que controla la génesis es tectónico; el trabajo concluye con que la tectónica del Mioceno debió haber sido el factor más importante en la formación y evolución de los actuales drenajes en esta zona de la Cordillera.

Struth (2012)<sup>140</sup> publica un estudio denominado “Tectónica y evolución de la red de drenaje en la Cordillera Oriental de Colombia” orientado a la evolución de la red de

---

<sup>139</sup> BALLESTEROS, Juan. Estudio geomorfológico-paisajístico del cañón del río Chicamocha en el tramo Cepita-Pescadero-Jordán: Aporte al conocimiento del patrimonio geológico del departamento de Santander. Trabajo de grado de geólogo. Bucaramanga Santander. Universidad Industrial de Santander. Facultad Físicoquímica. Escuela de Geología. 2002. p. 1-172.

<sup>140</sup> STRUTH et al. Tectónica y evolución de la red de drenaje en la Cordillera Oriental de Colombia. Op. cit., p. 1-4.

drenaje en un orógeno de crecimiento derivado de un *rift* de inversión. En este trabajo, se realizaron análisis topográficos y fluviales de la red de drenaje, la extracción de los perfiles longitudinales permitieron calcular los índice de pendiente en base a la ecuación del perfil longitudinal fluvial teórico de un río en condiciones *steady-state*. Concluyó que la Cordillera Oriental presenta una meseta axial dominada por ríos longitudinales y flancos dominados por ríos transversales. Además, la reorganización de la red de drenaje se debe al incremento de la pendiente regional derivado de la formación de la cadena montañosa que a su vez provoca capturas fluviales. Igualmente confirmó que cambio evolutivo de los drenajes longitudinales a transversales es un estado transitorio durante la formación del orógeno, hipótesis anteriormente planteada para el Alto Atlas (Babault *et al.*, 2007)<sup>141</sup>.

Babault *et al.* (2013)<sup>142</sup> en su publicación “*Shortening, structural relief and drainage evolution in inverted rifts: insights from the Atlas Mountains, the Eastern Cordillera of Colombia and the Pyrenees*”, establece una analogía entre las montañas del Alto Atlas en Marruecos, Cordillera Oriental de Colombia y los Pirineos, planteando que estos son ejemplos claros de cinturones formados por inversión tectónica; los autores proponen un modelo evolutivo de la red de drenaje en orógenos de inversión basado en las observaciones de las cadenas montañosas mencionadas: un primer estadio (etapa temprana de la inversión) que presenta un patrón de drenaje longitudinal paralelo a las estructuras tectónicas incipientes y un segundo estadio (etapa madura de la inversión) que presenta un patrón de drenaje transversal debido al incremento de la pendiente regional.

En este mismo año, Silva (2013)<sup>143</sup>, publica “*Basin compartmentalization and drainage evolution during rift inversion: Evidence from the Eastern Cordillera of*

---

<sup>141</sup> BABAULT, et al. High Atlas morphology: insight from the drainage pattern. Citado por STRUTH et al. Tectónica y evolución de la red de drenaje en la Cordillera Oriental de Colombia. Op. cit., p. 1, 4.

<sup>142</sup> BABAULT. Op. 141-158

<sup>143</sup> SILVA, A. et al. Basin compartmentalization and drainage evolution during rift inversion: Evidence from the Eastern Cordillera of Colombia. Geological Society, London, Special Publications, June 19 2013, vol. 377, p. 369-409.

*Colombia*” donde realizó estudios de termocronología y geocronología en la Cordillera Oriental datando zircones detríticos de las rocas sedimentarias y los basamentos para saber la procedencia y edad de estos materiales, y poder construir la historia evolutiva de la zona, comprobando que se presentó una etapa de inversión que influye en la organización de los drenajes además de las condiciones climáticas. Los datos documentan el dominio de patrones de drenajes axiales, incluso en cuencas cerradas lo que podría ser una característica de las primeras etapas de inversión. Por tanto, parece que la orientación de las características de larga duración influye profundamente en los patrones de drenaje de las cuencas de *rift* invertidas con una tendencia general hacia los drenajes axiales.

Struth *et al.* (2015)<sup>144</sup> “*Drainage reorganization during mountain building in the river system of the Eastern Cordillera of the Colombian Andes*”, analiza la reorganización de drenaje en la Cordillera Oriental, la describe como cinturones de cabalgamiento caracterizado por dos dominios: una plataforma axial elevada de bajo relieve donde predominan drenaje longitudinales y los flancos de la cordillera con un relieve pronunciado y dominado por drenajes transversales. Se tuvo como objetivo caracterizar la red fluvial y dinámica en el segmento central de la Cordillera Oriental donde concentra su deformación en los márgenes de un antiguo *rift* continental. Mediante análisis topográfico y evidencias geomorfológicas de capturas, factores climatológicos, análisis de pendiente y litología, reconstruyen los eventos anteriores y deducir los futuros cambios en la organización del drenaje, Este estudio permite estimar el desplazamiento de la divisoria que tiene hacia el interior del orógeno, reduciendo así las áreas axiales de plataforma elevada. Las pendientes de los flancos se incrementarán para terminar probablemente dominado por drenajes transversales.

---

<sup>144</sup> STRUTH *et al.* Drainage reorganization during mountain building in the river system of the Eastern Cordillera of the Colombian Andes. *Op. cit.*, p. 370-383.

De los trabajos más recientes de Struth (2016)<sup>145</sup> “*Evolution of fluvial drainage during mountain building in the Eastern Cordillera of the Colombian Andes*” donde contribuye al conocimiento de la terraza de Bucaramanga. Se realizaron estudios de índices de pendiente y tasa de erosión para determinar el contraste erosivo entre los dominios topográficos, también se hizo la interpretación de la reorganización fluvial en la Cordillera Oriental con dominio de ríos longitudinales a otro con ríos transversales, proponiendo un modelo de reorganización de la red de drenaje. Los análisis cosmogénicos permitieron estimar la edad de abandono de la terraza situada en la vereda Chocóa, otorgando el momento de la primera captura en la cuenca del Suárez por parte del Magdalena; con esto se plantea que inicialmente la onda erosiva se remontó aguas arriba desde la apertura de la cuenca Magdalena descendiendo su nivel base y estableciendo la configuración actual del drenaje.

### **4.3 MARCO GEOLÓGICO**

#### **4.3.1 Regional**

En un marco tectónico global, Colombia está situada en una geodinámica compleja, la cual es resultado de una triple convergencia de las placas Caribe, Suramericana y Nazca. Debido a la convergencia de estas placas (ver Figura 9), se dio la formación a la orogenia andina (Cortes *et al.*, 2005)<sup>146</sup>. En la imagen se muestra el principal sistema de deformación continental, donde la activación de fallas en Colombia es el resultado de los movimientos relativos de las tres placas principales (Nazca, Sudamericana, y el Caribe); este mapa indica las siguientes convenciones: G, Guayaquil; Q, Quito; B, Bogotá; C, Caracas; CB, bloque Chocó; CE, Cordillera Oriental; MB, bloque de Maracaibo; MR, Dorsal de Malpelo; CR, Coiba canto; BR,

---

<sup>145</sup> STRUTH. Op cit., p. 1-114.

<sup>146</sup> CORTES Martin y ANGELIER Jacques. Paleostress evolution of the northern Andes (Eastern Cordillera of Colombia): Implications on plate kinematics of the South Caribbean revista Tectonics [online], 2005. vol. 24 p. 1-27. Available from internet: <[http://www.cgares.org/Directorio/Archivos/1447\\_Cortes%20Tectonics.pdf.pdf](http://www.cgares.org/Directorio/Archivos/1447_Cortes%20Tectonics.pdf.pdf)>.

Barracuda canto; TR, Tiburón Rise; HE, Hess escarpa; SMB, falla de Santa Marta-Bucaramanga; Lan, Antillas Menores Arco (Taboada, 2000)<sup>147</sup>.

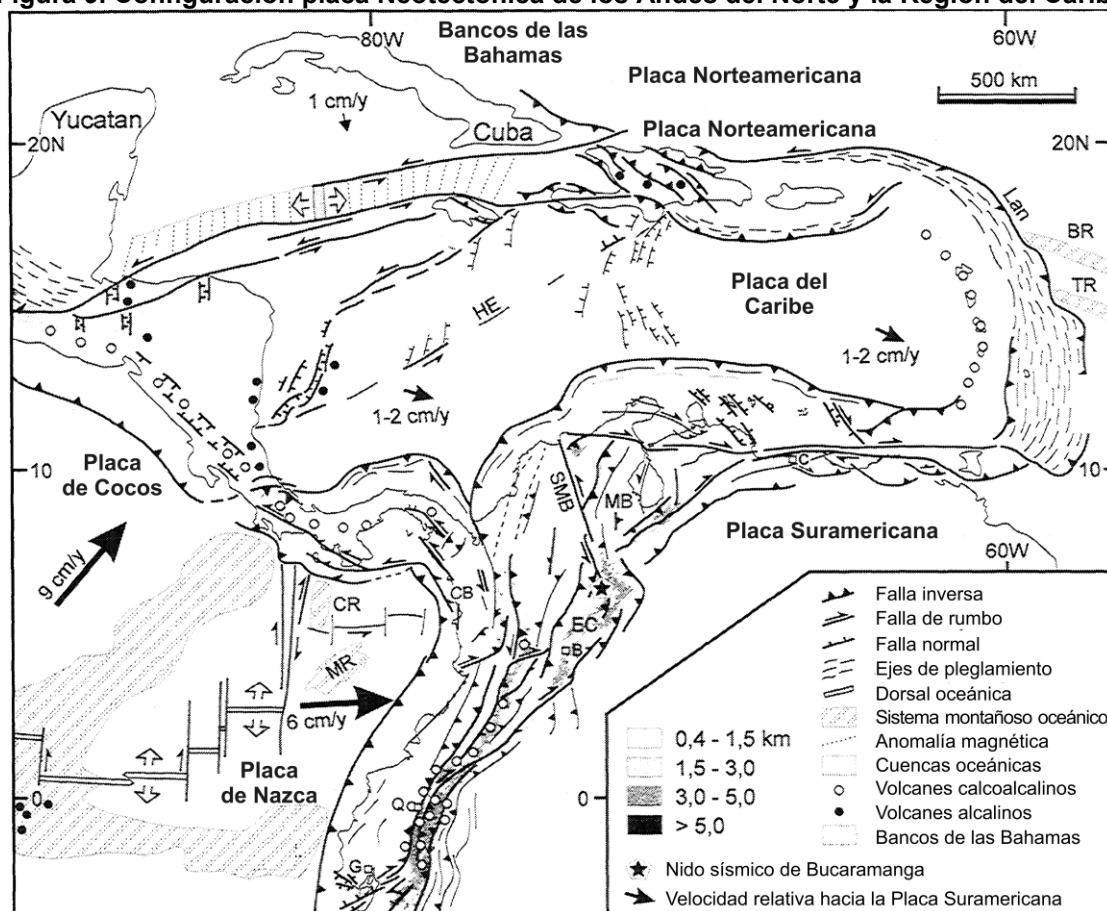
También es característico el notable contraste de las regiones por la cuales esta constituidas, estas son el Orógeno Andino y la Llanura Oriental. Dicho orógeno está comprendido por tres cordilleras denominadas de occidente a oriente por su posición geográfica como Cordillera Occidental, Cordillera Central y Cordillera Oriental separadas por grandes valles a los que se le llama valles interandinos. Estos valles son el Valle del Cauca y el Valle del Magdalena. El Valle del Cauca es una fosa estrecha y alargada que desaparece hacia el Sur y se estrecha también hacia el Norte, de manera que la Cordillera Central y la Occidental quedan fusionadas en lo que se denomina como Macizo Antioqueño. Por otro lado, el Valle del Magdalena se divide claramente en dos partes, el Valle Medio y el Valle Alto o Superior (en su curso inferior el Magdalena discurre sobre la región terciaria de la Costa Caribe y deja de ser la separación entre las cordilleras Central y Oriental): La separación entre Valle Medio y Superior del Magdalena se sitúa de acuerdo con PORTA en la Barrera de Girardot, donde el Cretáceo de la Cordillera Oriental formando un haz de pliegues relativamente apretados, atraviesa el Río Magdalena (Julivert *et al.*, 1968)<sup>148</sup>.

---

<sup>147</sup>TABOADA, Alfredo et al. Geodynamics of the northern Andes: Subductions and intracontinental deformation (Colombia). *Tectonics* [online]. October 2000, vol. 19, no. 5, p. 787-813. Available from internet: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2000TC900004/epdf>>.

<sup>148</sup>JULIVERT, Manuel, et al. *Léxico estratigráfico*, vol. 5 fascículo 4a [en línea]. Bucaramanga Universidad Industrial De Santander, 1968. Disponible en internet: <[http://www.academia.edu/6744193/Julivert\\_1968\\_Lexico\\_estratigrafico](http://www.academia.edu/6744193/Julivert_1968_Lexico_estratigrafico)>.

Figura 9. Configuración placa Neotectónica de los Andes del Norte y la Región del Caribe



Fuente: Tomado y modificado de Taboada (2000)<sup>149</sup>

La Cordillera Oriental fue afectada por una serie de eventos a finales del Cretácico, presentando fenómenos de acortamiento los cuales generaron su geometría actual. Estos fenómenos fueron referenciados en cuatro etapas de deformación (Cooper *et al.*, 1995)<sup>150</sup>; durante la primera etapa hubo colisión de la corteza oceánica con la corteza continental entre la placa Nazca y la Suramericana, desde el Cretácico tardío al Paleoceno temprano; la segunda etapa se ubica en el Eoceno medio, con un incremento en la velocidad de convergencia de las placas Nazca-Suramérica (Cooper *et al.*, 1995<sup>151</sup>; Taboada *et al.*, 2000<sup>152</sup>); la tercera etapa comprende desde el Oligoceno tardío al Mioceno temprano, con un cambio de movimientos en las

<sup>149</sup> TABOADA. Op cit., p. 788.>

<sup>150</sup> COOPER *et al.* Op. cit., p. 1423.

<sup>151</sup> COOPER. Op. cit., p. 1423.

<sup>152</sup> TABOADA *et al.* Op cit., 788.

placas sin evidencias en la Cordillera Oriental (Cooper *et al.*, 1995)<sup>153</sup> e intensa actividad tectónica en la parte más septentrional de los Andes (Taboada *et al.*, 2000)<sup>154</sup>. Finalmente, la cuarta etapa se establece entre el Mioceno tardío y el Plioceno, el cual presenta un episodio compresivo andino que se caracteriza por la colisión del arco de isla de Panamá y la placa de Suramérica, ayudando al levantamiento de la Cordillera Oriental (Figura 10) (Cooper *et al.*, 1995)<sup>155</sup>.

La Cordillera Oriental se caracteriza por estar formada por una serie de bloques en el sector de Bucaramanga, los cuales constituyen unidades geológicas, estos son tres bloques bien definidos en la ladera occidental. Un bloque Paleozoico entre Bucaramanga y Cúcuta, un bloque Mesozoico de altitudes medias, y un bloque Terciario el Valle del Magdalena. El área de estudio es el bloque Mesozoico o región de las Mesas el cual es una amplia región tabular y presenta como límites estructurales a la falla de Bucaramanga y la flexión de Chucurí, haciendo la tectónica de esta área sumamente simple. La región es dividida en dos unidades estructurales de segundo orden por un accidente importante denominado la falla del Suarez de orientación Norte-Sur paralelo al curso del río Suarez y parte del Sogamoso, luego por Chocóa y Girón y se prolonga más al Norte paralelamente al Río de Oro (Julivert, 1958)<sup>156</sup>.

---

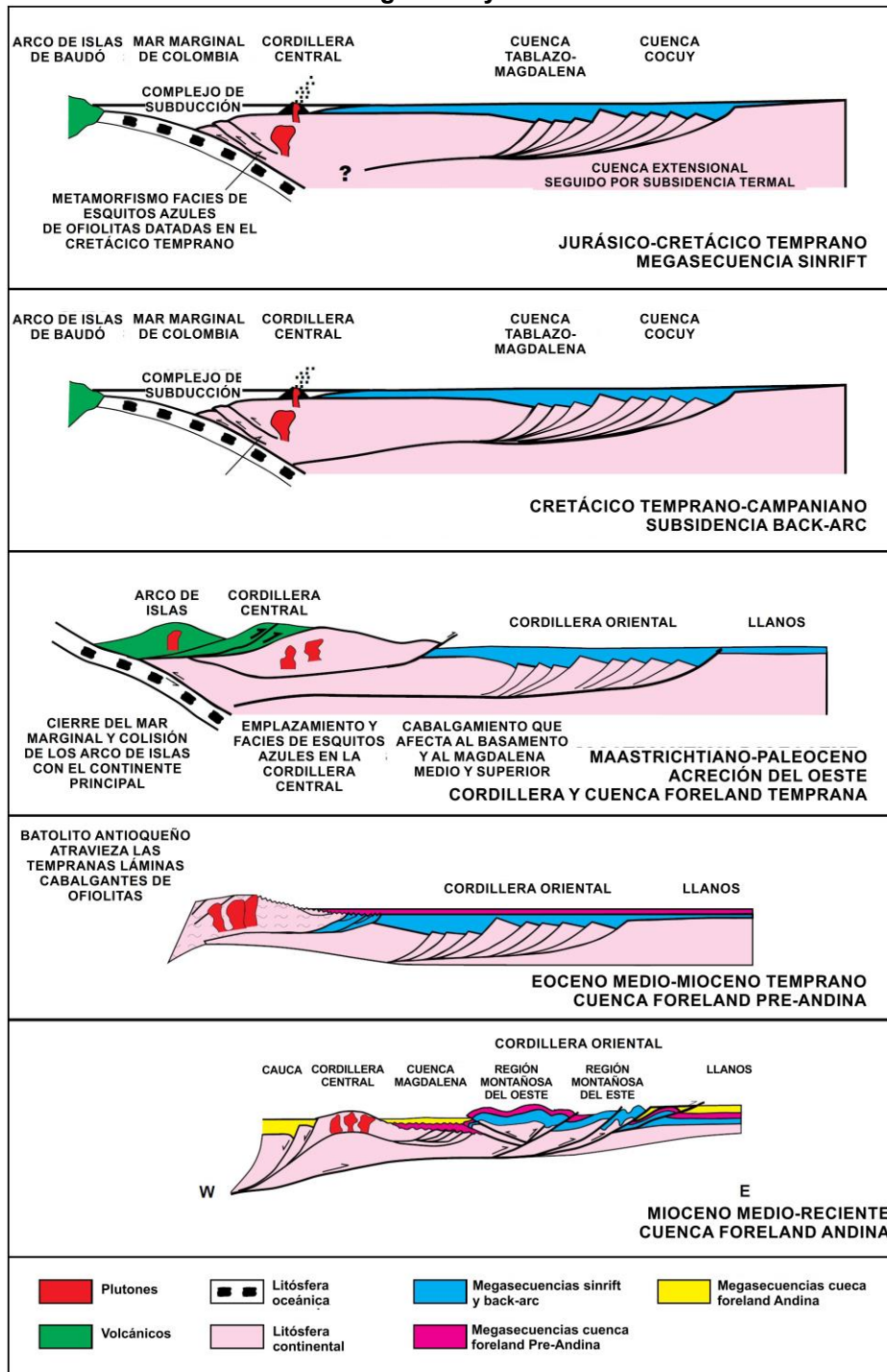
<sup>153</sup> COOPER. Op. cit., p. 1423.

<sup>154</sup> TABOADA et al. Op. cit., p. 788.

<sup>155</sup> COOPER. Op. cit., p. 1423.

<sup>156</sup> JULIVERT. Op cit., p. 7.

**Figura 10. Modelo secuencial del desarrollo tectónico regional para la Cordillera Oriental, el Valle Medio del Magdalena y la cuenca los Llanos**



Fuente: Tomado y modificado de Cooper *et al.* 1995<sup>157</sup>

<sup>157</sup> COOPER. Op. cit., p. 1424

La flexión de Chucurí, con orientación NNE-SSW, forma el límite Occidental de la región de las Mesas y el flanco oriental del sinclinal de Nuevo Mundo. En el otro límite se sitúa la falla de Bucaramanga, considerada como una falla de rumbo sinistral (Ujueta, 2003)<sup>158</sup> que separa el macizo ígneo- metamórfico que conocemos como Macizo de Santander, de la zona de las Mesas.

#### 4.3.2 Estratigrafía

La zona de estudio se encuentra localizada en el departamento de Santander, al NE de Colombia ocupando un porcentaje de +/- 3% del territorio colombiano, fisiográficamente se caracteriza por ser un territorio montañoso con relieve escarpado a moderado, su parte occidental presenta una zona plana y baja. Morfológicamente muestra contrastes variados debido a los eventos ocurridos en sus dos grandes regiones naturales (Cordillera Oriental y Valle Medio del Magdalena), litológicamente exhibe los tres tipos de rocas (Tabla 3) formadas desde el proterozoico hasta el cenozoico, tiempo actual (Royero y Clavijo, 2001)<sup>159</sup>.

**Tabla 3. Litologías del Departamento de Santander**

TIPO DE ROCA	COMPOSICIÓN LITOLÓGICA	EDAD	LOCALIZACIÓN
Metamórficas	Paraneises, ortoneises, anfibolitas, migmatitas, cuarcitas, esquistos, filitas y mármoles.	Varía entre el Proterozoico y el Paleozoico.	Sectores noreste, centro-este y sureste.
Metasedimentarias	Filitas, cuarcitas, metaareniscas, metaconglomerados y metalimolitas.	Varía entre el Proterozoico y el Paleozoico.	Sectores noreste, centro-este y sureste.
Ígneas	Plutónicas y volcánicas.	Paleozoico-Mesozoico.	Sector noreste, este y sureste.
Sedimentarias	Areniscas, limolitas, calizas, lutitas, arcillolitas y conglomerados.	Paleozoico-Mesozoico.	Sector este, central y oeste.
Depósitos superficiales débilmente consolidados	Conglomerados, lutitas, areniscas, gravas, arena y limo.	Plioceno-Holoceno.	Meseta de Bucaramanga y extremo oeste del departamento.

Fuente: Elaborado a partir de información de Royero y Clavijo (2001)<sup>160</sup>.

<sup>158</sup> UJUETA, Guillermo. La falla de Santa Marta-Bucaramanga no es una sola falla; son dos fallas diferentes: la falla Santa Marta y la Falla de Bucaramanga. Geología Colombiana, 2003. vol. 28, p. 133-153.

<sup>159</sup> ROYERO, José y CLAVIJO, Jairo. Mapa geológico generalizado departamento de Santander. Memoria Explicativa. Instituto de Investigación e Información Geocientífica, Minero-Ambiental y Nuclear -INGEOMINAS. Escala 1: 400.000. 2001. p. 1-92.

<sup>160</sup> *Ibíd.*, p. 15-42.

A continuación se describirán del más antiguo al más reciente los afloramientos que se encuentra en la zona de estudio.

#### 4.3.2.1 Complejo Bucaramanga

Conocido como Neis de Bucaramanga por autores como Goldsmith *et al.* (1971)<sup>161</sup> y Ward *et al.* (1973)<sup>162</sup>, la edad del complejo Bucaramanga según Etayo *et al.* (1983)<sup>163</sup> data del Precámbrico. La secuencia estratigráfica del Complejo Bucaramanga está conformado por rocas metasedimentarias de alto grado de metamorfismo como paraneis pelítico, semi-pelítico y arenáceo, esquistos y cantidades subordinadas de neis calcáreo, mármoles, neis horblendico y anfibolita (Ward *et al.*, 1973)<sup>164</sup>, migmatitas, cuarcitas y esporádicamente granulitas (Royero y Clavijo, 2001)<sup>165</sup>. El Complejo Bucaramanga presenta dos tipos de migmatitas: el Paraneis mezclado con rocas graníticas néisicas y la Zona migmatítica cortada por granitos (masas pequeñas) no foliado de edad más joven (Ward *et al.*, 1973)<sup>166</sup>.

La localidad tipo es el frente montañoso (Cerro la Judía y Morro Negro) al este de Bucaramanga (Ward *et al.*, 1973<sup>167</sup>; Royero y Clavijo, 2001<sup>168</sup>), las zonas que presentan mayor exposición están localizadas en las vías Bucaramanga- Pamplona, Bucaramanga- Matanza y Berlín- Vetas (Royero y Clavijo, 2001)<sup>169</sup>.

Ward *et al.* (1973)<sup>170</sup> divide el Complejo de Bucaramanga en tres fajas aflorantes, las cuales son más o menos semejantes entre sí pero variantes en proporción:

---

<sup>161</sup> GOLDSMITH, Richard et al. Radiometric ages in the Santander Massif, eastern Cordillera, Colombian Andes. US Geological Survey Professional Paper, 1971, vol. 750, p. D44-D49. Citado por ROYERO Y CLAVIJO. Op. cit., p. 48.

<sup>162</sup> WARD, D. et al. Geología de los cuadrángulos H-12, Bucaramanga y H-13, Pamplona, Departamento de Santander. US Geological Survey e Instituto nacional de investigaciones geológico-mineras-INGEOMINAS. Boletín Geológico, 1973, vol. 21, no 1-3, p. 1-132. Citado por ROYERO Y CLAVIJO. Op. cit., p. 48.

<sup>163</sup> ETAYO, Fernando et al., 1983. Mapa de Terrenos Geológicos de Colombia. Publicaciones Geológicas Especiales INGEOMINAS, (14-I). p 1- 235. Bogotá. Citado por WARD et al. Op. cit., p. 13.

<sup>164</sup> WARD et al. Op. cit., p. 15-17.

<sup>165</sup> ROYERO Y CLAVIJO. Op. cit., p. 15.

<sup>166</sup> WARD et al. Op. cit., p. 13.

<sup>167</sup> *Ibid.*, p. 13.

<sup>168</sup> ROYERO Y CLAVIJO. Op. cit., p. 15.

<sup>169</sup> *Ibid.*, p. 15.

<sup>170</sup> WARD et al. Op. cit., p. 13.

- **Faja Bucaramanga**

Localizada al este de la Falla Bucaramanga y muestra la unidad de rocas más antiguas, se encuentra en contacto con el Batolito de Río Negro en la parte norte, en su parte noroeste cubre la faja la Formación Silgará compuesta por rocas de bajo grado de metamorfismo; la parte este de la faja se encuentra limitada por el Batolito de Santa Bárbara y termina en forma de punta hacia el sur en la zona de Cepitá entre el Batolito y la Falla Bucaramanga.

- **Faja Central**

La faja se extiende por Berlín y California- Cachirí hasta Morro Nevado al oeste de Mutiscua, en la parte oeste la faja se encuentra cubierta por rocas sedimentarias de edad mesozoica, hacia el este y sur está cubierta por rocas de la Formación Silgará. La faja se encuentra separada de la faja Bucaramanga por intrusiones más jóvenes.

- **Faja Oriental**

De las tres fajas esta es la más pequeña y el neis en esta zona se exhiben en bloques fallados y separados. En esta faja las rocas no se encuentra bien expuestas y su composición parece más limitada.

#### **4.3.2.2 Formación Silgará**

Esta Formación es una secuencia de rocas clásticas metamórficas por lo general delgadas y estratificadas de manera cíclica, consta de pizarra, filita, meta-limolita, meta-arenisca impura, meta-waca y meta-waca guijarrosa con menos cantidades de pizarra y de filita calcárea. La secuencia metamórfica de esta formación es de grado bajo a medio, las condiciones máximas de metamorfismo alcanzadas son de facies de esquistos verdes y de anfibolita como condiciones mínimas (grado de la estaurolita) (Ward *et al.*, 1973)<sup>171</sup>.

---

<sup>171</sup> *Ibíd.*, p. 15.

El área de estudio se encuentra en una faja extensa al Oeste de la falla de Bucaramanga al Sur de Piedecuesta y continúa hasta Aratoca, esta es la denominada faja Piedecuesta-Aratoca la cual está limitada al Oeste en un contacto discordante con la formación Jordán y Girón y, al este, con la falla de Bucaramanga y el Granito de Pescadero (Ward *et al.*, 1973)<sup>172</sup>.

#### **4.3.2.3 Cuarzomonzonita de Río-Negro**

La cuarzomonzonita de Río-Negro se encuentra altamente meteorizada, los afloramientos frescos se encuentran en zonas de difícil acceso, como algunos sectores del este de la Falla Bucaramanga. Petrográficamente se caracteriza por presentar un tamaño de grano medio equigranular a subporfirítico, el color que presenta es entre rosado a gris claro, la cuarzomonzonita se caracteriza por ser biotítica (5% de biotita). La edad estimada para esta unidad es del Jurásico inferior a medio, estimación basada en estudios de K7Ar en biotita (Ward *et al.*, 1973)<sup>173</sup>.

#### **4.3.2.4 Cuarzomonzonita Mogotes**

La unidad presenta variedad en las tonalidades que abarca colores como rosado-naranja, grises rosáceos y blancos rosáceos. Petrográficamente presenta granos de tamaño medio 1-3 mm, los cuales son equigranulares a subporfiríticos. Contiene un 2% menos de biotita que la cuarzomonzonita de Río Negro, las zonas donde la biotita es más escasa se caracterizan por presentar un mayor contenido de feldespato potásico que de plagioclasas, la meteorización de la unidad origina un suelo color crema (Ward *et al.*, 1973)<sup>174</sup>.

---

<sup>172</sup> *Ibid.*, p. 15.

<sup>173</sup> *Ibid.*, p. 39.

<sup>174</sup> *ibid.*, p. 37.

#### 4.3.2.5 Granito de Pescadero

El granito recibe el nombre de Granito de Pescadero por su localidad Pescadero en el corregimiento de Umpalá ubicado en el municipio de Piedecuesta- Santander, se le considera un Plutón alargado e irregular que intruye en el oeste a las rocas de la Formación Silgará (Ward *et al.*, 1973)<sup>175</sup>, es también considerado una variación del Batolito de Mogotes (Royero y Clavijo, 2001)<sup>176</sup>.

Petrográficamente el Granito de pescadero presenta un color rosado naranja y sus granos son finos a muy finos, equigranular, porfirítico, con fenocristales de feldespato potásico, las plagioclasas de este granito se caracterizan por no presentar zonación. El Granito de pescadero presenta un contacto intrusivo con el neis de Bucaramanga (Ward *et al.*, 1973)<sup>177</sup>.

#### 4.3.2.6 Formación Jordán

La Formación fue identificada por primera vez por Cediél (1968)<sup>178</sup> cuando estudiaba la Formación Girón en Bucaramanga. Está constituida por dos facies separadas por una zona transicional que indica una interrupción de depositación: la facies superior está conformada por limolita de color marrón rojizo uniforme y arenisca de grano fino, bien estratificada en capas que van de 30 a 80 cm, con un espesor total del orden de 200 m; la facies inferior consta principalmente de arenisca de grano grueso, color gris verdoso con espesor de hasta 1 m y unas pocas facies de shales gris verdoso hasta de dos metros de espesor, también contiene algunas capas gruesas, con estratificación cruzada y zona conglomerática con guijos de hasta 2 cm (Ward, *et al.*, 1973)<sup>179</sup>.

---

<sup>175</sup> *Ibid.*, p. 35.

<sup>176</sup> ROYERO Y CLAVIJO. *Op. cit.*, p. 21.

<sup>177</sup> WARD *et al.* *Op. cit.*, p. 35-36.

<sup>178</sup> CEDIEL, Favio. EL Grupo Girón, una Molasa Mesozoica de la Cordillera Oriental. Servicio Geológico Nacional (Colombia). Boletín Geológico, 1968. vol. XVI, p. 5-96. Citado por WARD. *Op. cit.*, p. 53

<sup>179</sup> WARD *et al.* *Op. cit.*, p. 53.

Esta formación anteriormente se incluía en la Formación Girón, en los mapas del área de las mesas que eran realizados por Julivert y otros en 1964. De esta manera el miembro inferior del shale de la Mesa de los Santos corresponde a la formación Jordán (Ward, *et al.*, 1973)<sup>180</sup>.

#### **4.3.2.7 Formación Girón**

Nombre de serie Girón fue otorgado por Hettner en 1892 y se caracteriza por ser un conjunto de areniscas, conglomerados y limolitas color rojizo expuestas al este de Bucaramanga. Es similar a la formación Jordán, y se separa del macizo de Santander por la falla de Bucaramanga-Santa Marta. Estratigráficamente infrayace la Formación Tambor (Los Santos) y suprayace a la Formación Jordán. Se puede observar al margen izquierdo del Río de Oro, en el cerro de Palonegro, en la vía que comunica a Bucaramanga con el aeropuerto (Julivert, 1958)<sup>181</sup>. La edad de la formación fue determinada por el conjunto de fósiles encontrados por Langenheim (1959)<sup>182</sup> datan del Jurásico.

#### **4.3.2.8 Formación Los Santos**

También denominada como Formación Tambor. Estratigráficamente esta unidad suprayace a la Formación Girón e infrayace a la Formación Cumbre, Cediél (1968)<sup>183</sup> y Etayo y Rodríguez (1985)<sup>184</sup> estiman una edad del Berriasiano; esta unidad la podemos encontrar a continuación de la Formación Girón en el valle del río Lebrija entre el km 92 y 95 del ferrocarril que comunica Bucaramanga con Puerto Wilches, está constituida por areniscas conglomeráticas, lodolitas rojo-grisáceas y

---

<sup>180</sup> *Ibíd.*, p.53.

<sup>181</sup> JULIVERT. *Op. cit.*, p. 10-11.

<sup>182</sup> LANGENHEIM, J. Preliminary Notes on Plant Fossils from Late Paleozoic and Early Mesozoic Rocks in the Cordillera Oriental of Colombia. *Boletín de Geología, Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. 1959, vol. 3. Citado por WARD et al. Op. cit.*, p. 57.

<sup>183</sup> CEDIÉL. Citado por ROYERO Y CLAVIJO. *Op. cit.*, p. 26.

<sup>184</sup> ETAYO F. y RODRÍGUEZ, G. Edad de la Formación Los Santos. *Proyecto Cretácico. Publicaciones Geológicas Especiales INGEOMINAS, Bogotá, 1985. (16) Capítulo XXVI, p. 1-12. Citado por ROYERO Y CLAVIJO. Op. cit.*, p. 26.

cuarzoareniscas gris amarillentas con estratificación cruzada y capas tabulares de espesores variables (Clavijo, 1985<sup>185</sup>; Laverde y Clavijo, 1985<sup>186</sup> ; Ward *et al.*, 1973<sup>187</sup>).

#### 4.3.2.9 Formación Rosa Blanca

Presentado por primera vez en un informe inédito de Wheeler en 1929 denominado cerro Rosa Blanca, luego se estudió más a detalle por Cardoso y Ramírez en 1985. Está constituida por calizas grises duras, de texturas finas no fosilíferas, con pocas intercalaciones de shale oscuro fisil. Esta formación tiene gran contenido fosilífero. La edad de esta unidad comprende del Hauteriviano al Barremiano. (Ward, *et al.*, 1973)<sup>188</sup>.

#### 4.3.2.10 Formación Paja

Fue descrita inicialmente por Wheeler en un informe inédito en 1929 (Morales, *et al.*, 1958<sup>189</sup>). La Formación Paja está localizada en la quebrada la Paja, la cual entra al río Sogamoso 1 km aguas arriba del puente el tablazo, se trata de una sucesión de shales negras, ligeramente calcáreas y micáceas, cuya parte inferior contiene concreciones de caliza de hasta 30 cm y venas de calcita. La Formación Paja suprayace la Formación Rosablanca e infrayace la Formación Tablazo y su espesor varía entre 125 y 625m (Ward *et al.*, 1973<sup>190</sup>; Julivert, 1958<sup>191</sup>).

---

<sup>185</sup> CLAVIJO, J., Secuencia facial de la Formación Los Santos por la Quebrada Piedra Azul: Registro de una hoya fluvial evanescente. Proyecto Cretácico. Publicaciones Geológicas Especiales INGEOMINAS (16) 1985. Capítulo IV.; 1-18. Bogotá. Capítulo VI.: 1-9. Bogotá. Citado por ROYERO Y CLAVIJO. Op. cit., p. 26.

<sup>186</sup> LAVERDE, F. y CLAVIJO, J., 1985. Análisis facial de la Formación Los Santos, según el corte de «Tú y Yo» (Zapatoca). Proyecto Cretácico. Publicaciones Geológicas Especiales INGEOMINAS.

<sup>187</sup> WARD *et al.* Op. cit., p. 63

<sup>188</sup> *Ibid.*, p. 65.

<sup>189</sup> MORALES, L. *et al.* General geology and oil occurrence of the Middle Magdalena Valley, Colombia. In habitat of oil a Symposium American Association of Petroleum Geologists Bulletin. 1958. p. 641-695. Tulsa. Citado por WARD *et al.* Op. cit., p. 69.

<sup>190</sup> *Ibid.*, p. 67.

<sup>191</sup> JULIVERT Op. cit., p.12.

#### **4.3.2.11 Formación Tablazo**

Denominada calizas del Tablazo se extienden por la parte Norte del Valle medio del Magdalena aunque sus facies varían en esta región. La secuencia de esta unidad está constituida por calizas duras, azuladas, muy fosilíferas y margas, con un espesor que varía entre 150 y 325 m., se considera que su edad corresponde al Aptiano superior a Albiano inferior. Esta formación se correlaciona cronoestratigráficamente con la formación Tibú-Mercedes (Ward *et al.*, 1973<sup>192</sup>; Julivert, 1958<sup>193</sup>).

#### **4.3.2.12 Formación Simití**

La Formación Simití fue denominada así por los geólogos de la *International Petroleum Company* (Colombia) en 1953 debido a los excelentes afloramientos que se encuentran al lado sur de la ciénaga de Simití, esta unidad consta de shales grises a negros, carbonosos, levemente calcáreos, con concreciones de hasta 3 m más largas en la parte superior donde son más abundantes, se muestran delgadas bandas conglomeráticas con guijos pequeños, nódulos fosfáticos, dientes de peces y arena, ocurren hacia los niveles superiores. La edad establecida es Albiano Superior-Cenomaniano. Se correlaciona con la Formación Capacho (Ward, *et al.*, 1973)<sup>194</sup>.

#### **4.3.2.13 Formación Areniscas de Chiquinquirá**

Los afloramientos de la unidad se encuentran ubicados hacia la zona central de la Cordillera Oriental de Colombia en sentido suroeste-noreste con una longitud de más o menos 150 km. En Santander se pueden observar hacia el sector de la población Guepsa. Estructuralmente la zona se caracteriza por presentarse plegada

---

<sup>192</sup> WARD et al. Op. cit., p. 70.

<sup>193</sup> JULIVERT Op. cit., p.12-13.

<sup>194</sup> WARD et al. Op. cit., p. 71.

y fallada (fallas inversas o de cabalgamiento), estas estructuras presentan un sentido suroeste-noreste (Terraza, 2012)<sup>195</sup>.

La edad de la Formación Areniscas de Chiquinquirá fue determinada por el paleontólogo Fernando Etayo mediante amonitas, dando un rango entre Albiano tardío y Cenomaniano; el afloramiento se considera de ambiente marino somero, el cual involucra fondos de costa hasta planicies intermareales lodosas, lo anterior basado en hallazgos de bivalvos, amonitas, foraminíferos planctónicos, hojuelas de plantas fósiles, tallos carbonizados, etc (Terraza, 2012)<sup>196</sup>.

Petrográficamente la unidad fue estudiada en cinco segmentos denominados informalmente como A, B, C, D y E: los segmentos A, C y E se encuentra conformados por un 34% y 66% de arenitas y los segmentos B y D por un contenido de lutitas menor al 90%. En el estudio de las facies se identificó estratificación ondulada y lodolitas arenosas laminadas (Terraza Melo, 2012)<sup>197</sup>.

#### **4.3.2.14 Formación La Luna**

Descrita por Garner (Julivert *et al.*, 1968)<sup>198</sup>, la unidad se caracteriza por tener una amplia extensión regional (Ward *et al.*, 1973)<sup>199</sup> el nombre de la formación se debe a la quebrada La Luna sector noroeste de Perijá, Zulia (Venezuela). Los geólogos de la Caribbean Petroleum Company introdujeron el término para Colombia (Royero y Clavijo 2001)<sup>200</sup>.

---

<sup>195</sup> TERRAZA, Manuel. Estratigrafía y ambientes de depósito de la Arenisca de Chiquinquirá en los alrededores de la localidad tipo. Boletín de geología, julio-diciembre de 2012. vol. 34, no. 2, p. 2-18.

<sup>196</sup> *Ibid.*, p. 62.

<sup>197</sup> *Ibid.*, p. 69.

<sup>198</sup> JULIVERT, Manuel *et al.*, 1968. Lexique Stratigraphique International, merique Latine Colombia Premiere Parte). Centre National de la Recherche Scientifique. 5, (4a), Colombie, 651 p. París. Citado por ROYERO Y CLAVIJO. Op. cit., p. 34.

<sup>199</sup> WARD *et al.* Op. cit., p. 73.

<sup>200</sup> ROYERO Y CLAVIJO. Op. cit., p. 34.

La formación La Luna se depositó en un ambiente marino, donde sus aguas eran poco profundas (Royero y Clavijo 2001)<sup>201</sup>, en paleobatimetrías que variaron de nerítico externo a batial (ANH, 2012)<sup>202</sup>. Estratigráficamente la formación cuenta con un espesor aproximado de 275-575m y suprayace con un contacto concordante a la Formación Simití e infrayace con una ligera discontinuidad a la Formación Umir.

Petrográficamente se caracteriza por estar compuesta por calizas gris oscuras, arcillosas, lutitas grises a negras, calcáreas, en capas delgadas, lutitas gris oscuras con delgadas intercalaciones de calizas arcillosas, concreciones de calizas con fósiles y capas delgadas de chert negro y también capas fosfáticas hacia la parte superior (Royero y Clavijo 2001)<sup>203</sup>.

En el Valle Medio del Magdalena la Formación La Luna se subdivide en tres miembros (Ward *et al.*, 1973<sup>204</sup>; Royero y Clavijo, 2001<sup>205</sup>):

- **Miembro Salado**

Es el miembro inferior de la Formación La Luna y esta petrográficamente compuesto por Shale calcáreo de estratificación delgada, el color que lo caracteriza es negro, presenta capas delgadas de calizas negras, cuya textura se caracteriza por ser fina, además contiene concreciones de caliza que alcanzan dimensiones de 10-15 cm.

- **Miembro Pujamana**

Miembro intermedio de la Formación La Luna está compuesto petrográficamente por shale calcáreo de estratificación delgada presenta tonalidades que van del rango gris a negro.

---

<sup>201</sup> *Ibíd.*, p. 34.

<sup>202</sup> COLOMBIA. AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS-ANH. Cuenca Valle Medio del Magdalena. Integración geológica de la digitalización y análisis de núcleos Pozo: infantas-1613. Evaluación Petrofísica ShaleXpert. Pozos: Catalina-1 y Cocuyo-1. 2012. p. 1-82.

<sup>203</sup> ROYERO Y CLAVIJO. *Op. cit.*, p. 34.

<sup>204</sup> WARD *et al.* *Op. cit.*, p. 75-76.

<sup>205</sup> ROYERO Y CLAVIJO. *Op. cit.*, p. 34.

- **Miembro Galembo**

Es el miembro superior de la Formación La Luna petrográficamente domina shale negro con delgadas intercalaciones de caliza arcillosa. Presenta concreciones de caliza discoidal, contiene amonites y capas delgadas de chert estratificado de color azul-negro, se caracteriza por presentar capas fosfáticas persistentes cerca del tope de Galembo. También contiene fragmentos de huesos y vertebras de peces y en menor cantidad dientes.

#### **4.3.2.15 Formación Umir**

Descrita por Huntley en 1917 (Ward *et al.*, 1973<sup>206</sup>; Julivert *et al.*, 1968<sup>207</sup>), la localidad tipo se encuentra ubicada en la Quebrada Umir a la que debe su nombre, localizada al este del Cerro Umir en el departamento de Santander (Royero y Clavijo, 2001)<sup>208</sup>, los afloramientos con mejor exposición se encuentran ubicados en la parte superior de la Formación Umir (Ward *et al.*, 1973)<sup>209</sup>.

Estratigráficamente la Formación Umir se encuentra suprayaciendo en forma de discontinuidad estratigráfica al Miembro Galembo de la Formación La Luna e infrayaciendo concordantemente a la Formación Lisama (Royero y Clavijo, 2001)<sup>210</sup>, data del Campaniano-Maestrichtiano con base en zonas de foraminíferos y sustentada por amonites (Ward *et al.*, 1973<sup>211</sup>; Royero y Clavijo, 2001<sup>212</sup>) y posiblemente del Daniano (Morales *et al.*, 1958)<sup>213</sup>. El ambiente es determinado por la fauna hallada en la formación la cual indica un ambiente nerítico medio para el Campaniano y nerítico superior a continental para Maestrichtiano inferior (Ward *et al.*, 1973)<sup>214</sup>.

---

<sup>206</sup> WARD *et al.* Op. cit. Citado por ROYERO Y CLAVIJO. Op. cit., p. 35.

<sup>207</sup> JULIVERT *et al.* Op. cit. Citado por ROYERO Y CLAVIJO. Op. cit., p. 35.

<sup>208</sup> ROYERO Y CLAVIJO. Op. cit., p. 35.

<sup>209</sup> WARD *et al.* Op. cit., p. 76.

<sup>210</sup> ROYERO Y CLAVIJO. Op. cit., p. 35.

<sup>211</sup> WARD *et al.* Op. cit., p. 76.

<sup>212</sup> ROYERO Y CLAVIJO. Op. cit., p. 35.

<sup>213</sup> MORALES. *et al.* Op Cit. Citado por WARD *et al.* Op. cit., p. 76.

<sup>214</sup> WARD *et al.* Op. cit., p. 76.

Petrográficamente es conformada por shales de tonalidades grises a negros, carbonosos, micáceos, con presencia de concreciones ferruginosas, lutitas de tonalidades grises a gris oscuras, carbonosas, con nódulos ferruginosos, intercalaciones de areniscas y limolitas, grises, carbonosas y micáceas. Además, la Formación Umir contiene capas explotables de carbón que tienen un espesor promedio de 0,60 a 5,00 m (Royero y Clavijo, 2001)<sup>215</sup>. Ward *et al.* (1973)<sup>216</sup> describe la petrografía de la formación Umir en dos partes inferior y superior: la primera presenta shales de color gris con tonalidades azulosas a negras, presenta laminaciones carbonáceas y micáceas; la parte superior se conforma por shale blando de color gris oscuro a gris verdoso con presencia de menor cantidad de capas de areniscas duras de tamaño de grano fino y delgados mantos de carbón, debido a las capas incompetentes de shale blando la Formación Umir tiende a formar valles amplios.

#### **4.3.2.16 Formación Lisama**

Descrita por Link (Morales *et al.*, 1958)<sup>217</sup> y publicada por primera vez por Wheeler (De Porta *et al.*, 1974)<sup>218</sup>, se encuentra aflorando al oeste del departamento de Santander y la sección tipo está ubicada en la Quebrada Lisama, afluente del río Sogamoso hacia el sur. Estratigráficamente la Formación Lisama infrayace a la Formación La Paz en discordancia regional (Royero y Clavijo, 2001)<sup>219</sup>.

Petrográficamente la Formación Lisama contiene secuencia de lutitas abigarradas (Royero y Clavijo, 2001)<sup>220</sup>, las cuales Ward *et al.* (1973)<sup>221</sup> describe como shale moteado de colores marrones y grises, alternadas con areniscas de tonalidades

---

<sup>215</sup> ROYERO Y CLAVIJO. Op. cit., p. 35.

<sup>216</sup> WARD *et al.* Op. cit., p. 76.

<sup>217</sup> MORALES. *et al.* Op. Cit. Citado por ROYERO Y CLAVIJO. Op. cit., p. 37.

<sup>218</sup> DE PORTA, J., *et al.*, 1974. Lexique Stratigraphique International. Centre National Recherche Scientifique. Volume V. Amerique Latine, fascicule 4b, Colombie, 692 p. Paris. Citado por ROYERO Y CLAVIJO. Op. cit., p. 37.

<sup>219</sup> ROYERO Y CLAVIJO. Op. cit., p. 37.

<sup>220</sup> *Ibid.*, p. 37.

<sup>221</sup> WARD *et al.* Op. cit., p. 85-86.

grises verdosas y pardas de tamaños de grano fino a medio y capas delgadas de carbón, que son más delgadas que las existentes en la Formación Umir. Los granos de areniscas se hacen más gruesos hacia el tope de la formación. Debido a la presencia de shales, la Formación Lisama tiende a formar valles en la topografía, los cuales se observan en la vía Bucaramanga-Barrancabermeja (Ward *et al.*, 1973)<sup>222</sup>. El espesor promedio es de 1225m, su ambiente de depositación se da en condiciones lagunares deltaicas (Royero y Clavijo)<sup>223</sup> y su edad es del Paleoceno (Van Der Hammen, 2009)<sup>224</sup>.

#### 4.3.2.17 Grupo Chorro

Wheeler nombra al grupo como “Chorro series” (Plisbry y Olsson, 1935)<sup>225</sup> en Ward *et al.*, 1973)<sup>226</sup>, en la actualidad son reconocidas como formaciones La Paz y Esmeraldas (Morales *et al.*, 1958)<sup>227</sup>, Royero y Clavijo (2001)<sup>228</sup> divide al Grupo Chorro en parte inferior (Formación La Paz) y superior (Formación Esmeraldas), los afloramientos se pueden observar en el sector oeste del departamento de Santander y además ocupa parte del Valle Medio del Magdalena.

- **Formación La Paz**

Su nombre se debe al filo prominente La Paz, ubicado entre los ríos Lebrija y Sogamoso (Ward *et al.*, 1973)<sup>229</sup>, la sección tipo se encuentra localizada en la angostura del río Lebrija, por la zona de la vía férrea, abajo de Vanegas (Royero y

---

<sup>222</sup> *Ibid.*, p. 86.

<sup>223</sup> ROYERO Y CLAVIJO. *Op. cit.*, p. 37.

<sup>224</sup> VAN DER HAMMEN, T. Estratigrafía del Terciario y Maestrichtiano continental y tectogénesis de los Andes Colombianos. Inventario Geológico Nacional. Boletín Geológico. 1958. 6 (1-3). Citado por ROYERO Y CLAVIJO. *Op. cit.*, p. 37. 67-128. Bogotá.

<sup>225</sup> PILSBRY, Henry and OLSSON, Axel. Tertiary fresh-water mollusks of the Magdalena embayment, Colombia. Proceedings of the Academy of Natural Sciences of Philadelphia, 1935. vol. 87, p. 7-39. Citado por WARD *et al.* *Op. cit.*, p. 87.

<sup>226</sup> WARD *et al.* *Op. cit.*, p. 87.

<sup>227</sup> MORALES. *et al.* *Op. Cit.* Citado por WARD *et al.* *Op. cit.*, p. 87.

<sup>228</sup> ROYERO Y CLAVIJO. *Op. cit.*, p. 37.

<sup>229</sup> WARD *et al.* *Op. cit.*, p. 87.

Clavijo, 2001)<sup>230</sup>, el espesor máximo se puede medir a lo largo del río Sogamoso y tiene una medida aproximada de 1280 m (Taborda, 1965)<sup>231</sup>.

Petrográficamente la Formación La Paz consta de una secuencia estratigráfica de areniscas de color gris, conglomeráticas, conglomerados, limolitas y grandes paquetes de lutitas grises (Royero y Clavijo, 2001)<sup>232</sup>, en la base de la formación aparecen en algunos sitios shales rosáceos grisáceos a crema, de aspecto duro y denso, con un espesor aproximado de 30m, esta zona fue denominada “shale alterado” pero en la actualidad le denominan Miembro Toro (Taborda, 1965)<sup>233</sup>. Estratigráficamente La Formación La Paz se encuentra suprayaciendo en forma discordante a la Formación Lisama e infrayace concordantemente a la Formación Esmeraldas. La edad se considera del Eoceno superior (Royero y Clavijo, 2001)<sup>234</sup>.

- **Formación Esmeraldas**

El nombre fue asignado por los geólogos de la *Gulf Oil Company* (Morales, et al., 1958)<sup>235</sup>, debido al caserío La Esmeralda junto al río Sogamoso (Ward et al., 1973)<sup>236</sup>. Petrográficamente consta de areniscas de color gris y verde, que presentan un tamaño de grano fino, con intercalaciones de limolitas y lutitas moteadas de color rojo, púrpura y pardo; contiene algunas capas delgadas de carbón. Estratigráficamente suprayace de forma concordante a la Formación La Paz y infrayace con una posible discordancia a la Formación Mugrosa, el ambiente de depositación se presentó bajo condiciones lagunares deltaicas, se calcula un espesor promedio de 1200m, y se considera de edad Oligoceno (Royero y Clavijo, 2001)<sup>237</sup>.

---

<sup>230</sup> ROYERO Y CLAVIJO. Op. cit., p. 37.

<sup>231</sup> TABORDA, Bernardo. Guidebook to the geology of the De Mares Concession: field trip of February 26-28, 1965 Colombian Society of Petroleum Geologists and Geophysicists. 1965. p. 1-50. Citado por WARD et al. Op. cit., p. 88.

<sup>232</sup> ROYERO Y CLAVIJO. Op. cit., p. 37.

<sup>233</sup> TABORDA. Op. cit. Citado por WARD et al. Op. cit., p. 88.

<sup>234</sup> ROYERO Y CLAVIJO. Op. cit., p. 38.

<sup>235</sup> MORALES. et al. Op Cit. Citado por ROYERO Y CLAVIJO. Op. cit., p. 38.

<sup>236</sup> WARD et al. Op. cit., p. 88.

<sup>237</sup> ROYERO Y CLAVIJO. Op. cit., p. 38.

#### **4.3.2.18 Depósitos aluviales**

Los depósitos aluviales en zonas montañosas son escasos, las zonas donde se pueden observar corresponden a los ríos Lebrija y Sogamoso (Ward *et al.*, 1973)<sup>238</sup>. Los depósitos cuaternarios (Qal) en el departamento de Santander presentan variabilidad en el origen y se extienden a lo largo de ríos y quebradas, están constituidos por depósitos no consolidados la edad estimada es Holoceno (Royero y Clavijo, 2001)<sup>239</sup>.

#### **4.3.2.19 Grupo Mesa y Meseta de Bucaramanga**

Las unidades TQ se consideran depósitos débilmente consolidados y consolidados de origen fluvial y de edad plioceno-pleistoceno, estos depósitos se encuentran constituidos principalmente por materiales como: areniscas, limolitas y conglomerados (Royero y Clavijo, 2001)<sup>240</sup>.

La localidad tipo del Grupo Mesa se encuentra ubicada en Alto de Gigante al noroeste de Honda, este grupo ha sido dividido en dos partes: la parte inferior constituido por materiales como arenas estratificadas y tobas andesíticas, las cuales contienen areniscas de tamaño de grano grueso, aglomerados, limos, arcillas, conglomerados y piroclásticos; la parte superior constituido por granos de tamaño gravas, cantos (Ward *et al.*, 1973)<sup>241</sup>.

- **Formación Bucaramanga**

Los sedimentos de la Formación Bucaramanga se localizan en el departamento de Santander en la zona conocida como área metropolitana de Bucaramanga, aunque

---

<sup>238</sup> WARD *et al.* Op. cit., p. 99.

<sup>239</sup> ROYERO Y CLAVIJO. Op. cit., p. 41-42.

<sup>240</sup> *Ibid.*, p. 31-42.

<sup>241</sup> WARD *et al.* Op. cit., p. 94.

no todos los miembros de la formación se extienden por las mismas localidades (Solano, 2016)<sup>242</sup>. La Formación Bucaramanga limita al noreste y este con el Macizo de Santander (INGEOMINAS, 2001<sup>243</sup>; Jiménez *et al.*, 2015<sup>244</sup>) al noroeste y oeste con el Cerro de Palonegro, el Río de Oro (INGEOMINAS, 2001)<sup>245</sup> y la Falla del Suarez (Jiménez *et al.*, 2015)<sup>246</sup>, la cual corta sedimentos de edades Jurásico, Cretácico y Cuaternarios (Paris *et al.*, 2000)<sup>247</sup> y al sur con la Mesa de Ruitoque (INGEOMINAS, 2001)<sup>248</sup>.

Geomorfológicamente presenta una forma de abanico aluvial que se encuentra erosionado y exhibe una superficie de aspecto ondulosa y suave con pendientes entre los 2° y 7°, se extiende hacia el oeste con un área de aproximadamente de 60 a 80 km<sup>2</sup>, el drenaje que caracteriza a la Formación Bucaramanga es dendrítico a subparalelo, los mayores aportes de agua los proporciona el Río de Oro (INGEOMINAS, 2001)<sup>249</sup>. La edad de los depósitos es estimada entre 1 y 3Ma (Jiménez *et al.*, 2015)<sup>250</sup>. El abanico de Bucaramanga ha sido dividido de base a techo en cuatro miembros: Órganos, Finos, Gravoso y Limos Rojos (INGEOMINAS, 2001)<sup>251</sup>:

- Miembro Órganos (Qbo)

Descrita inicialmente por Hubach (1952)<sup>252</sup> y mencionada posteriormente por De Porta (1959). Es denominado como nivel inferior y específica que es el más

---

<sup>242</sup> SOLANO, Leonardo. Estudio de proveniencia de los sedimentos de la Formación Bucaramanga, al sur del río Frío; en los municipios de Floridablanca y Girón, Santander. Trabajo de grado para optar al título de geólogo. Universidad Industrial de Santander. 2016, p. 1-171.

<sup>243</sup> COLOMBIA. INGEOMINAS. Zonificación sismogeotécnica indicativa del área metropolitana de Bucaramanga. Subdirección de Amenazas Geoambientales, 2001, p. 1-270.

<sup>244</sup> JIMÉNEZ *et al.*, 2015. Magnetic stratigraphy of the Bucaramanga alluvial fan: evidence for a  $\leq 3$  mm/yr slip rate for the Bucaramanga-Santa Marta Fault, Colombia. *Journal of South American Earth Sciences* [online], 2015. vol. 57, p. 12-22. Available from internet: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0895981114001540>>.

<sup>245</sup> COLOMBIA. INGEOMINAS. Zonificación sismogeotécnica indicativa del área metropolitana de Bucaramanga. Op cit. 19.

<sup>246</sup> JIMÉNEZ *et al.* Op cit. p. 16.

<sup>247</sup> PARIS *et al.*, 2000. Map and Database of Quaternary Faults and Folds in Colombia and its Offshore Regions. U.S. Geological Survey-USGS, Report 00-0284, Denver, Colorado, USA. 2000. p. 1-61.

<sup>248</sup> COLOMBIA. INGEOMINAS. Zonificación sismogeotécnica indicativa del área metropolitana de Bucaramanga. Op cit. 19.

<sup>249</sup> *Ibid.*, p. 19.

<sup>250</sup> JIMÉNEZ *et al.* Op cit. p. 19-21.

<sup>251</sup> COLOMBIA. INGEOMINAS Zonificación sismogeotécnica indicativa del área metropolitana de Bucaramanga. Op. cit. Citado por JIMÉNEZ *et al.* Op cit. p. 17.

<sup>252</sup> HUBACH, E. Interpretación geológica de la erosión y los deslizamientos en Bucaramanga y medidas de defensa. 1952, Instituto de geología informe 867. P. 1-9. Citado por De Porta Op. cit., p.10.

homogéneo de los niveles descritos los cuales serían tres; y este estaría formado por una alternancia de bancos de conglomerado y fajas de arenas más o menos continua de un espesor de 1 m (De Porta, 1959)<sup>253</sup>.

Según Niño y Vargas (1993)<sup>254</sup> presenta un espesor de 170 m, con capas gruesas a muy gruesas con niveles de espesor variable y contacto neto a ondulado. Con textura de matriz soportada y granosoportada, lodoarenosa, subredondeada a redondeada mal calibrada. Presenta feldespatos alterados, niveles correspondientes a arcillas y arenas arcillosas de consistencia firme, ligeramente micáceas, con traza de materia orgánica. El ambiente de depositación se relaciona con flujos de escombros y flujos torrenciales, correspondiendo a la parte proximal y media del abanico de Bucaramanga.

- Miembro Finos (Qbf)

Reconocido y definido por Hubach (1952)<sup>255</sup>, con espesor aproximado a 20 m la geometría de sus niveles es tabular a lenticular con cambios faciales laterales. Las capas presentan estratificación plano paralela, cruzada y ondulosa con contactos netos, planos y suavemente ondulados. Consta de arenas arcillosas, arcillas arenosas ligeramente micáceas y gravas.

El ambiente de depositación de este miembro es de corrientes permanentes y migratoria de canales trenzados, poco profundo y de escasas interdigitaciones de flujo de escombros de facies gravosas que marcan claramente la zona activa de selección y baja energía (Niño y Vargas, 1993)<sup>256</sup>.

---

<sup>253</sup> De Porta Op. cit., p.10

<sup>254</sup> NIÑO y VARGAS. Op. cit., p.

<sup>255</sup> HUBACH, E. Op. cit., Citado por NIÑO Y VARGAS. Op. cit., p.16

<sup>256</sup> NIÑO Y VARGAS. Op. cit., p.16

- Miembro Gravoso (Qbg)

Definido por Niño y Vargas (1993)<sup>257</sup>, Es un nivel grueso que no presenta estructuras internas, el contacto inferior es neto, continuo, suavemente ondulado. Texturalmente es una grava arenolodosa y lodoarenosa. Las gravas son subredondeadas de esfericidad media, mal calibradas. El ambiente de depositación de este miembro corresponde a un flujo de escombros viscoso con fase intermedia gravosa a arenolodosa.

- Miembro Limos Rojos (Qblr)

En un principio fue definido por (Julivert, 1961)<sup>258</sup>. Según Niño y Vargas 1993 es el segmento superior de 5 metros de espesor aproximadamente. El nivel está constituido por arcillas gravosas, caracterizado por grandes bloques angulares de baja esfericidad de arenisca blanca silíceas. El ambiente es característico por un flujo de lodo acompañado de caída de bloques procedentes del macizo de Santander<sup>259</sup>.

## 4.4 MARCO TECTÓNICO

### 4.4.1 Falla Bucaramanga

La Falla Bucaramanga hace parte del Sistema de Fallas Santa Marta–Bucaramanga (Royero & Clavijo 2001)<sup>260</sup>, y tiene una extensión longitudinal de 350 km (Ujueta 2003)<sup>261</sup>, su orientación es N15°W (Toro, 1990<sup>262</sup>; Ujueta, 2003<sup>263</sup>), y su cinemática es sinistral inversa evidenciada por desplazamientos sinestrales (Boinet *et al.*,

---

<sup>257</sup> *Ibid.*, p.17

<sup>258</sup> JULIVERT. Op. cit., p 11. Citado por NINO Y VARGAS. Op. cit., p. 17.

<sup>259</sup> *Ibid.*, p.17

<sup>260</sup> ROYERO Y CLAVIJO. Op. cit., p. 50.

<sup>261</sup> UJUETA. Op cit., p. 134.

<sup>262</sup> TORO, Jaime. The termination of the Bucaramanga fault in the Cordillera Oriental, Colombia. 1990. Thesis the Master of Science. University of Arizona. P. 1-60.

<sup>263</sup> UJUETA. Op cit., p. 134.

1989<sup>264</sup>; Toro, 1990<sup>265</sup>; Royero y Clavijo, 2001<sup>266</sup>). En cuanto a su geología histórica es bastante compleja, no se tiene claro aún la edad máxima de su actividad tectónica, pero se establece que es posterior al neis de Bucaramanga (Royero y Clavijo 2001)<sup>267</sup>.

Desde el Cretácico inferior hasta el Paleoceno no ha existido actividad tectónica, es probable actividad tectónica en el Eoceno medio, aunque se cree que de manera reducida (Boinet *et al.*, 1989)<sup>268</sup>.

La falla ha causado en el relieve cambios bruscos en las pendientes y desvió en los drenajes lo cual puede ser verificado mediante el análisis de fotografías aéreas e imágenes satelitales (Paris *et al.*, 2000)<sup>269</sup>.

#### 4.4.2 Falla del Suárez

La Falla del Suarez tiene una longitud aproximada de 110 km que fue medida desde el pueblo de la Paz hasta el sector Vijagual (INGEOMINAS, 2008)<sup>270</sup>, la Falla del Suarez termina en la Falla Bucaramanga al norte de la ciudad (Ward *et al.*, 1973)<sup>271</sup>. La Falla del Suarez se considera una falla activa cuaternaria con una cinemática inversa sinistral (Page, 1986<sup>272</sup>; Paris *et al.*, 2000<sup>273</sup>), la falla se encuentra estrechamente paralela al curso del río Sogamoso, y cambia de dirección al oeste

---

<sup>264</sup> BOINET, T., Burgois, J., Mendoza, H. y Vargas, R. 1989. La Falla de Bucaramanga (Colombia): su función durante la Orogenia Andina. Geol. Norandina, 1989, vol. 11, p. 3-10.

<sup>265</sup> TORO. Op cit., p. 6.

<sup>266</sup> ROYERO Y CLAVIJO. Op. cit., p. 47, 50.

<sup>267</sup> *Ibid.*, p. 50.

<sup>268</sup> BOINET. Op cit., p.4.

<sup>269</sup> PARIS *et al.* Op cit., p. 11.

<sup>270</sup> COLOMBIA. INGEOMINAS. Modelo de evolución morfotectónica cuaternaria basado en evidencias estructurales, neotectónicas y paleosismológicas de los principales sistemas de falla en la región de Bucaramanga. DIEDERIX, Hans *et al.* 2008, p. 1-145.

<sup>271</sup> WARD *et al.* Op. cit., p. 116.

<sup>272</sup> PAGE, W. Seismic geology and seismicity of Northwestern Colombia: San Francisco, California, Woodward-Clyde Consultants Report for ISA and Integral Ltda., Medellin, 1986. Citado por COLOMBIA. INGEOMINAS. Modelo de evolución morfotectónica cuaternaria basado en evidencias estructurales, neotectónicas y paleosismológicas de los principales sistemas de falla en la región de Bucaramanga. Op cit., p. 39.

<sup>273</sup> PARIS *et al.* Op cit. Citado por COLOMBIA. INGEOMINAS. Modelo de evolución morfotectónica cuaternaria basado en evidencias estructurales, neotectónicas y paleosismológicas de los principales sistemas de falla en la región de Bucaramanga. Op cit., p. 39.

atravesando el río en ángulo recto (Ward *et al.*, 1973)<sup>274</sup>. La parte sur de la Falla del Suarez desplaza rocas de edad Jurásico y Cretácico, en el sector norte afecta sedimentos del abanico de Bucaramanga (INGEOMINAS, 2008<sup>275</sup>). La Falla del Suarez converge con la Falla Bucaramanga en un ángulo aproximado de 35° (INGEOMINAS, 2008<sup>276</sup>).

#### 4.5 CUENCAS HIDROGRÁFICAS

Dentro del área de estudio se encuentran las cuencas Sogamoso, Chicamocha, Suárez y Lebrija (Figura 11). Estas se encuentran ubicadas en la vertiente hidrográfica del Magdalena Medio (Secretaria de planeación de Santander y UIS, 2011<sup>277</sup>) y sus características se describen en la siguiente tabla:

**Tabla 4. Cuencas de estudio de la vertiente hidrográfica del Magdalena medio**

	Cuenca	Área total [ha]	Pendiente media [m/km]	Caudal medio multianual [m <sup>3</sup> /s]
<b>Vertiente hidrográfica del Magdalena medio</b>	Río Lebrija	879.000	16	150,3
	Río Suárez	1.026.655*	17	195
	Río Chicamocha	957.412*	10	135
	Río Sogamoso	339.568*	5	540

Fuente: Elaborado a partir de información de Secretaria de planeación de Santander y UIS (2011)<sup>278</sup> y modificada\*.

<sup>274</sup> WARD *et al.* Op. cit., p. 116.

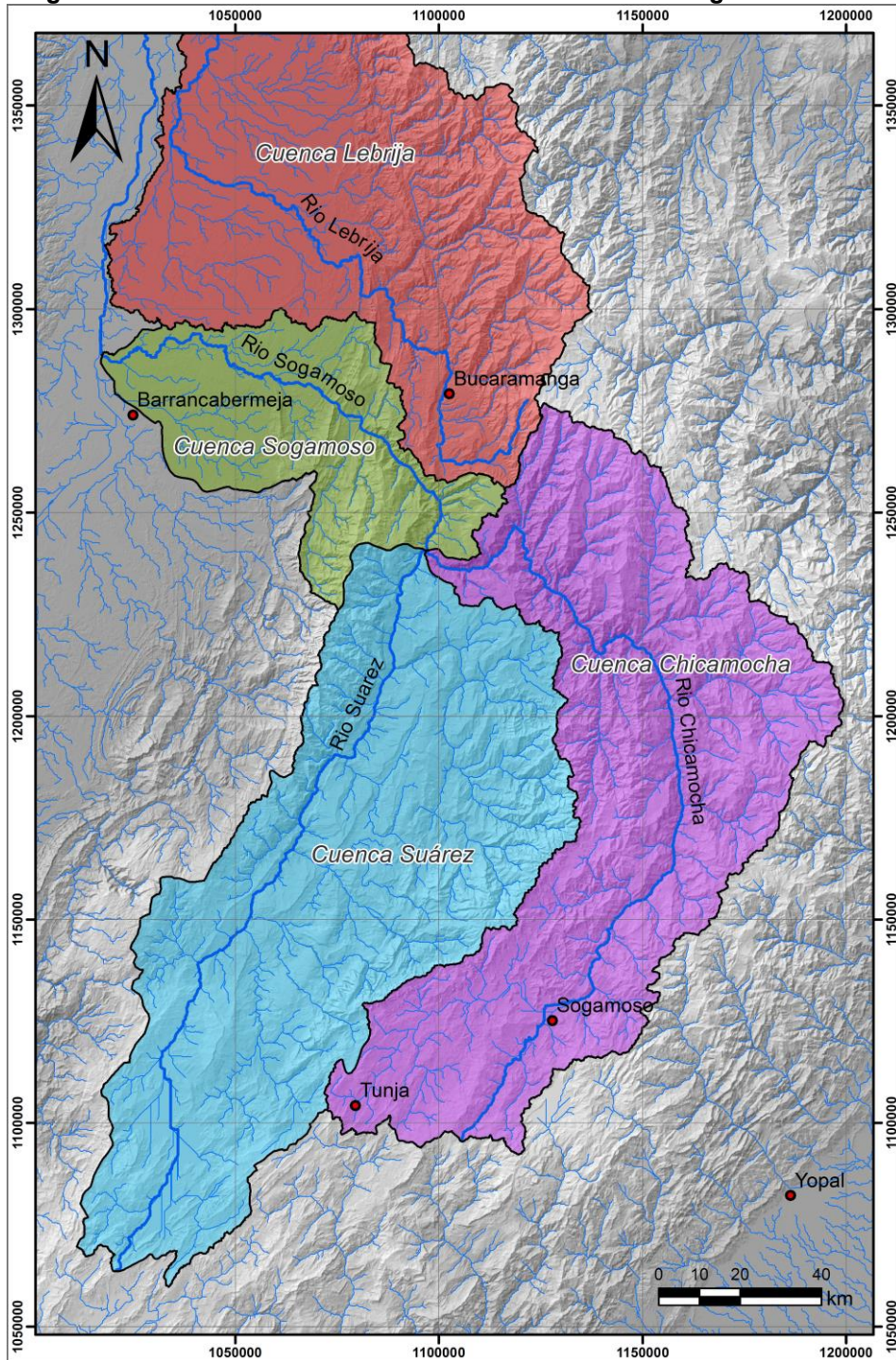
<sup>275</sup> COLOMBIA. INGEOMINAS. Modelo de evolución morfotectónica cuaternaria basado en evidencias estructurales, neotectónicas y paleosismológicas de los principales sistemas de falla en la región de Bucaramanga. Op cit., p. 39.

<sup>276</sup> *Ibid.*, p. 19.

<sup>277</sup> SANTANDER. SECRETARÍA DE PLANEACIÓN y UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER. Santander 2030. Tomo I. Diagnóstico dimensión biofísico ambiental territorial de Santander [en línea]. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. 2011. p. 1-250. Disponible en Internet: <<https://www.uis.edu.co/webUIS/es/investigacionExtension/documentos/docInteres/Tomo%20I%20Dimension%20Biofisica%20Ambiental.pdf>>.

<sup>278</sup> *Ibid.*, 123-129.

Figura 11. Cuencas del área de estudio de la vertiente Magdalena medio



Fuente: Elaborado a partir de información del IDEAM (2013)<sup>279</sup> y modificado.

<sup>279</sup> COLOMBIA. INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES – IDEAM. ZONIFICACIÓN Y CODIFICACIÓN DE UNIDADES HIDROGRÁFICAS E HIDROGEOLÓGICAS DE COLOMBIA, 2013. Colombia. p. 1-46.

#### **4.5.1 Cuenca del río Sogamoso**

Alimentada por las cuencas Chicamocha y Suarez. El río principal llamado Sogamoso, es afluente del río Magdalena en su margen derecha en dirección W, con un canal medio multianual de 540 m<sup>3</sup>/s. Comprende un área superficial de 111.944 ha, una longitud de 116 km y una pendiente media del cauce principal de 5 m/km; su altura respecto al nivel del mar se encuentra entre los 700 msnm en su punto más alto hasta los 70 msnm en su punto más bajo. El río discurre por un valle angosto y profundo en dirección NE conformado por laderas abruptas, posteriormente el valle se amplía a una extensa zona aluvial, que es inundable en épocas de avenidas (Secretaría de planeación de Santander y UIS, 2011)<sup>280</sup>.

##### **4.5.1.1 Cuenca del río Chicamocha**

Nace en el departamento de Boyacá, su río principal es el Chicamocha y la cuenca culmina como afluente del río Sogamoso en dirección NE, posee un canal medio multianual de 135 m<sup>3</sup>/s. Su área superficial comprende de 1.033.200 ha, con una pendiente media total de 10 m/km desde el punto de su nacimiento hasta su afluencia el inicio del río Sogamoso. El río principal traza su recorrido por pendientes abruptas, describiendo un valle angosto y profundo en la cordillera Oriental (Secretaría de planeación de Santander y UIS, 2011)<sup>281</sup>.

##### **4.5.1.2 Cuenca del río Suárez**

El nacimiento del río Suarez se encuentra en la laguna de Fumeque, entre los límites departamentales de Cundinamarca y Boyacá. El río Suarez continúa su trayecto hacia el río Sogamoso, cuyo punto de afluencia es el límite final de la cuenca presentando un canal multianual de 195 m<sup>3</sup>/s. (Secretaría de planeación de

---

<sup>280</sup> SANTANDER. SECRETARÍA DE PLANEACIÓN y UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER. Op. cit., p. 1-250.

<sup>281</sup> *Ibíd.*, p. 127.

Santander y UIS, 2011)<sup>282</sup>. El río Suárez tiene una pendiente media de 17 m/km, su altura se encuentra entre los 3800 msnm hasta llegar a los 700 msnm. A partir de su nacimiento, este río discurre sobre una zona con pendientes planas (Unión temporal AUDICON AMBIOTEC, 2006)<sup>283</sup> hasta llegar al departamento de Santander, donde el cauce recorre por laderas acentuadas (Secretaria de planeación de Santander y UIS, 2011)<sup>284</sup>.

#### **4.5.2 Cuenca del río Lebrija**

Nace en Piedecuesta al NE del municipio, el río Lebrija es afluente del río Magdalena en su margen derecha en dirección NW con un canal medio multianual de 150,3 m<sup>3</sup>/s. La cuenca cuenta con un área superficial de 879.000 ha, su cauce principal tiene una longitud de 228 km y tiene una pendiente media de 16 m/km; su altura respecto a nivel del mar se encuentra entre los 3.800 msnm y los 65 msnm. El recorrido del trazado del río en su zona baja se caracteriza por la formación de ciénagas y sus pendientes planas son inundables en épocas de avenidas (Secretaria de planeación de Santander y UIS, 2011)<sup>285</sup>.

---

<sup>282</sup> *Ibíd.*, p. 127.

<sup>283</sup> UNIÓN TEMPORAL AUDICON AMBIOTEC. Elaboración de los estudio de diagnóstico prospectiva y formulación para la cuenca hidrográfica de los ríos Ubaté y Suárez (Departamento de Cundinamarca). Informe de la fase de diagnóstico. Contrato de Consultoría No. 800 de 2005. Bogotá D.C. 2006, p. 1-160. Disponible en internet: <<https://www.car.gov.co/index.php?idcategoria=43494&download=Y>>.

<sup>284</sup> SANTANDER. SECRETARÍA DE PLANEACIÓN y UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER. Op. cit. p. 127.

<sup>285</sup> *Ibíd.*, p. 128-129.

## 5. METODOLOGÍA

Para entender la evolución reciente de los ríos Chicamocha y Suárez y la búsqueda de evidencias geomorfológicas que registren eventos de captura reciente, se empleó una metodología acorde con los trabajos de Struth *et al.* (2012)<sup>286</sup> y (2015)<sup>287</sup> modificada, la cual fue la base para los cálculos realizados. Se realizó un análisis topográfico y geomorfológico a partir del DEM SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) versión 2 (Ferranti, 2014)<sup>288</sup>, con resolución de 90 m y dentro del sistema de coordenadas MAGNA Colombia Bogotá. Las imágenes fueron tratadas en un software SIG, empleando una serie de herramientas que permitieron corregir imperfecciones rellenando vacíos existentes en la superficie del DEM (píxeles con elevaciones erróneas o ausentes).

La metodología empleada en este trabajo se divide en dos: i) Un primer análisis topográfico en el cual se obtuvieron las capas de pendientes locales, orientación del plano, dirección de flujo, acumulación del flujo y pendiente regional; y ii) un análisis fluvial. El análisis fluvial se realizó en ambiente SIG, cuyo algoritmo extrajo la red de drenaje a través del DEM y se exportó los datos de cada perfil longitudinal para su representación gráfica bidimensional (distancia vs. altura). Los perfiles longitudinales presentados en el presente trabajo muestran una escala vertical exagerada y un alisado (disminución de ruido de fondo) en los datos para una óptima visualización y un mejor análisis posterior.

A partir de los perfiles obtenidos, se procedió a la reconstrucción de paleoperfiles, los cuales se obtienen a través de la aplicación de la ecuación del perfil longitudinal

---

<sup>286</sup> STRUTH *et al.* Tectónica y evolución de la red de drenaje en la Cordillera Oriental de Colombia. Op. cit., p. 2-4.

<sup>287</sup> STRUTH *et al.* Drainage reorganization during mountain building in the river system of the Eastern Cordillera of the Colombian Andes. Op. cit., p. 376.

<sup>288</sup> FERRANTI, Jonathan de. Viewfinder panoramas digital elevation data [online]. 2012. Last revision 26 May 2014. Available from internet: <<http://www.viewfinderpanoramas.org/dem3.html>>.

bidimensional de un río en equilibrio (Whipple y Tucker, 1999<sup>289</sup>; Whipple *et al.*, 1999<sup>290</sup>; Whipple, 2001<sup>291</sup>). Los paleoperfiles son una herramienta muy útil para reconstruir el antiguo perfil del río en un inicio y poderlo comparar con el mismo perfil de río actual y con otros ríos. Siguiendo en ambiente SIG, se procedió a limitar las cuencas hidrográficas, trazar divisorias de aguas y efectuar la construcción de la red hídrica. Se extrajo el perfil de elevación de la divisoria topográfica que separa las cuencas Lebrija y Chicamocha-Sogamoso para identificar zonas con una elevación anómalamente baja respecto a la elevación media de la divisoria. Estas depresiones topográficas se relacionan con posibles valles abandonados donde fluían antiguos ríos, previos a la reorganización de drenaje que da lugar a su configuración actual.

Finalmente, el conjunto de características y la identificación de evidencias como *wind gaps*, *knickpoints*, *elbows*, entre otros, y comparando con otros estudios previos relacionados, permitieron establecer los puntos de captura fluvial y la historia reciente de la evolución del drenaje en la zona de estudio. Los análisis se hacen en base al modelo evolutivo propuesto por Babault *et al.* (2013)<sup>292</sup>.

---

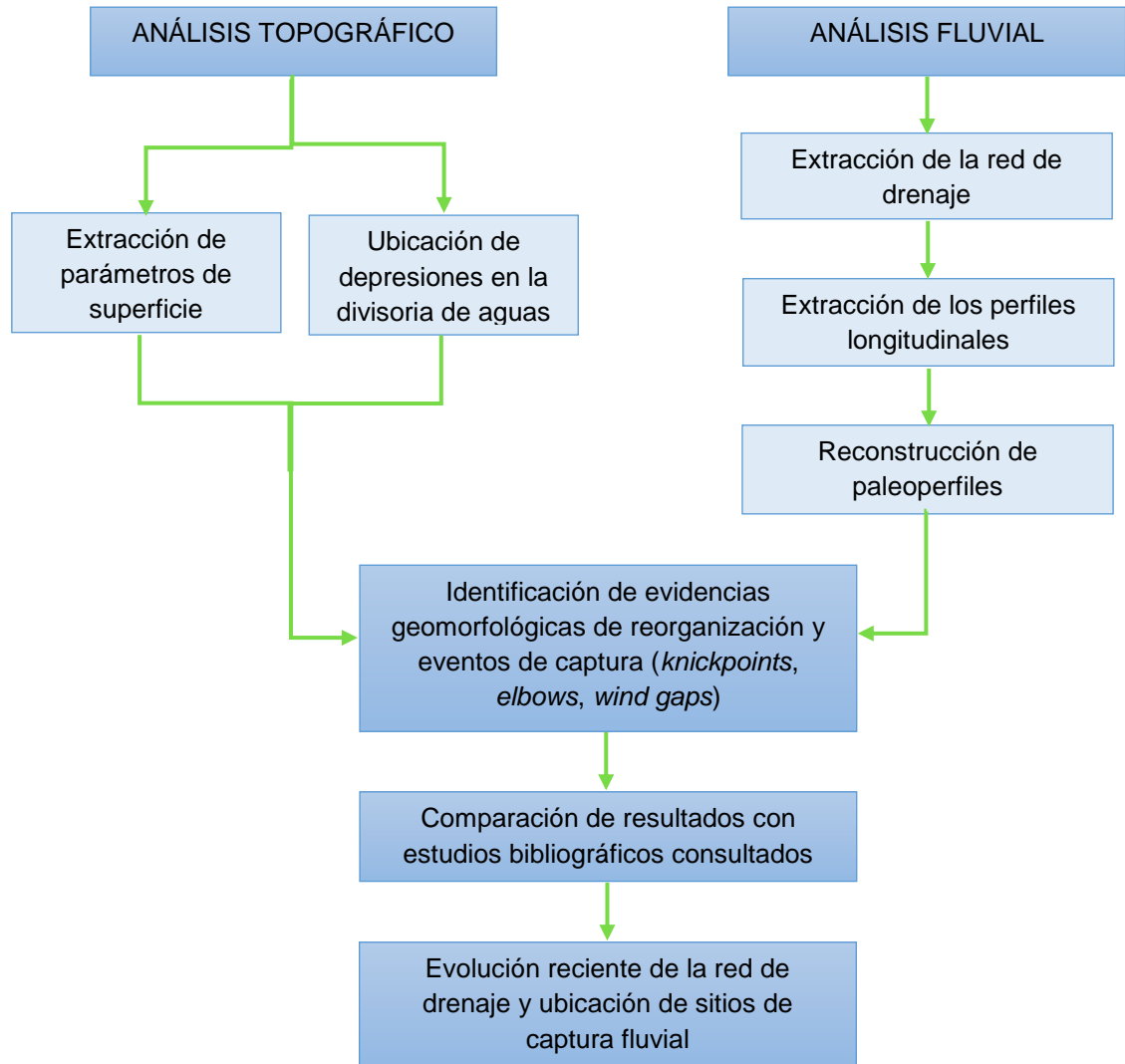
<sup>289</sup> WHIPPLE and TUCKER. Dynamics of the stream power river incision model: Implications for height limits of mountain ranges, landscape response timescales, and research needs. Op. cit. Citado por WHIPPLE. Fluvial landscape response time: How plausible is steady-state denudation? Op. cit., p. 315.

<sup>290</sup> WHIPPLE *et al.* Geomorphic limits to climate-induced increases in topographic relief. Op. cit. p. 40.

<sup>291</sup> WHIPPLE. Fluvial landscape response time: How plausible is steady-state denudation? Op. cit., p. 315.

<sup>292</sup> BABAULT *et al.* Shortening, structural relief and drainage evolution in inverted rifts: insights from the Atlas Mountains, the Easter Cordillera of Colombia and the Pyrenees. Op. cit., p. 149-154.

Figura 12. Esquema metodológico



Fuente: Elaborado a partir de información de Struth *et al.* (2012)<sup>293</sup> y Struth *et al.* (2015)<sup>294</sup>, y modificado.

<sup>293</sup> STRUTH *et al.* Tectónica y evolución de la red de drenaje en la Cordillera Oriental de Colombia. *Op. cit.*, p. 2-4.

<sup>294</sup> STRUTH *et al.* Drainage reorganization during mountain building in the river system of the Eastern Cordillera of the Colombian Andes. *Op. cit.*, p. 376.

## 6. RESULTADOS

### 6.1 CARTOGRÁFICA TEMÁTICA GENERAL Y LOCAL

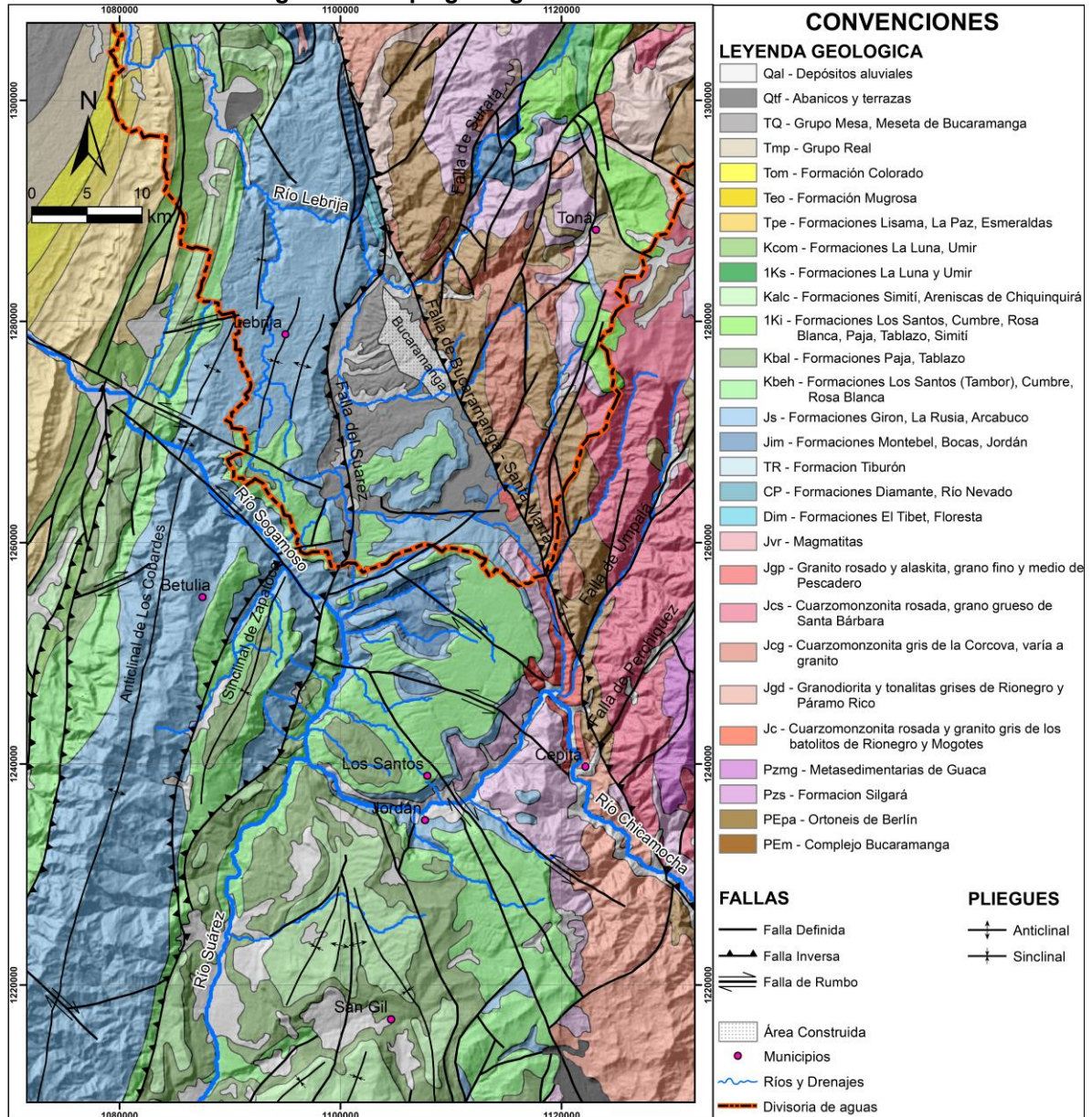
#### 6.1.1 Geología

Se elaboró dos mapas geológicos a partir de información secundaria: El primero a escala 1:300.000 de la zona de estudio (Figura 13). El área ubicada al oeste de la falla Bucaramanga-Santa Marta predominan las rocas sedimentarias del Devónico, Carbonífero-Pérmico, Jurásico, Cretácico, Paleógeno y Neógeno correspondientes a la cuenca del Valle Medio del Magdalena (CVM), anticlinales y sinclinales paralelos en dirección preferente N-S ubicados en las Mesas de Zapatoca y Lebrija. De otra parte, al este de la Falla Bucaramanga y al SE de la Mesa de los Santos, los materiales geológicos están conformado principalmente por rocas metamórfica del Proterozoico (Macizo de Santander) y Paleozoico, rocas ígneas del Jurásico (Grupo Plutónico de Santander); parte de estas litologías ígneo-metamórficas se extiende más al E del Sistema de Fallas Bucaramanga-Santa Marta hacia el SE de la Mesa de los Santos. Igualmente se encuentran rocas sedimentarias del Jurásico y Cretácico asociadas a la CVM y Cuenca Catatumbo-Maracaibo; exponen una serie de fallas normales de dirección preferente NNE-SSW. Por último, se destaca un depósito cuaternario acuñado por las Fallas Bucaramanga-Santa Marta y Falla del Suárez, llamada la meseta de Bucaramanga. Este sector se encuentra bañado por el Río de Oro y su afluentes.

Respecto a las litologías recorridas superficialmente por los cursos de agua principales, el río Chicamocha en dirección aguas abajo pasa por un grupo de rocas ígneo-metamórficas: Complejo de Bucaramanga, Batolito de Río negro y Mogotes (cuarzomonzonita y granodiorita), Granito de Pescadero y Formación Silgará; antes de llegar a su confluencia con el río Sogamoso incide sobre rocas sedimentaria en las Formaciones Jordán, Girón, Tambor y Rosablanca. El trazado aguas abajo del

río Suárez que sigue la Falla del Suárez hace su recorrido por rocas sedimentarias de la Formaciones Tablazo, Paja, Rosa Blanca y Tambor hasta su confluencia con el río Sogamoso.

Figura 13. Mapa geológico del sector de las Mesas



Fuente: Elaborado a partir de información de INGEOMINAS (1997)<sup>295</sup> e INGEOMINAS (1999)<sup>296</sup>.

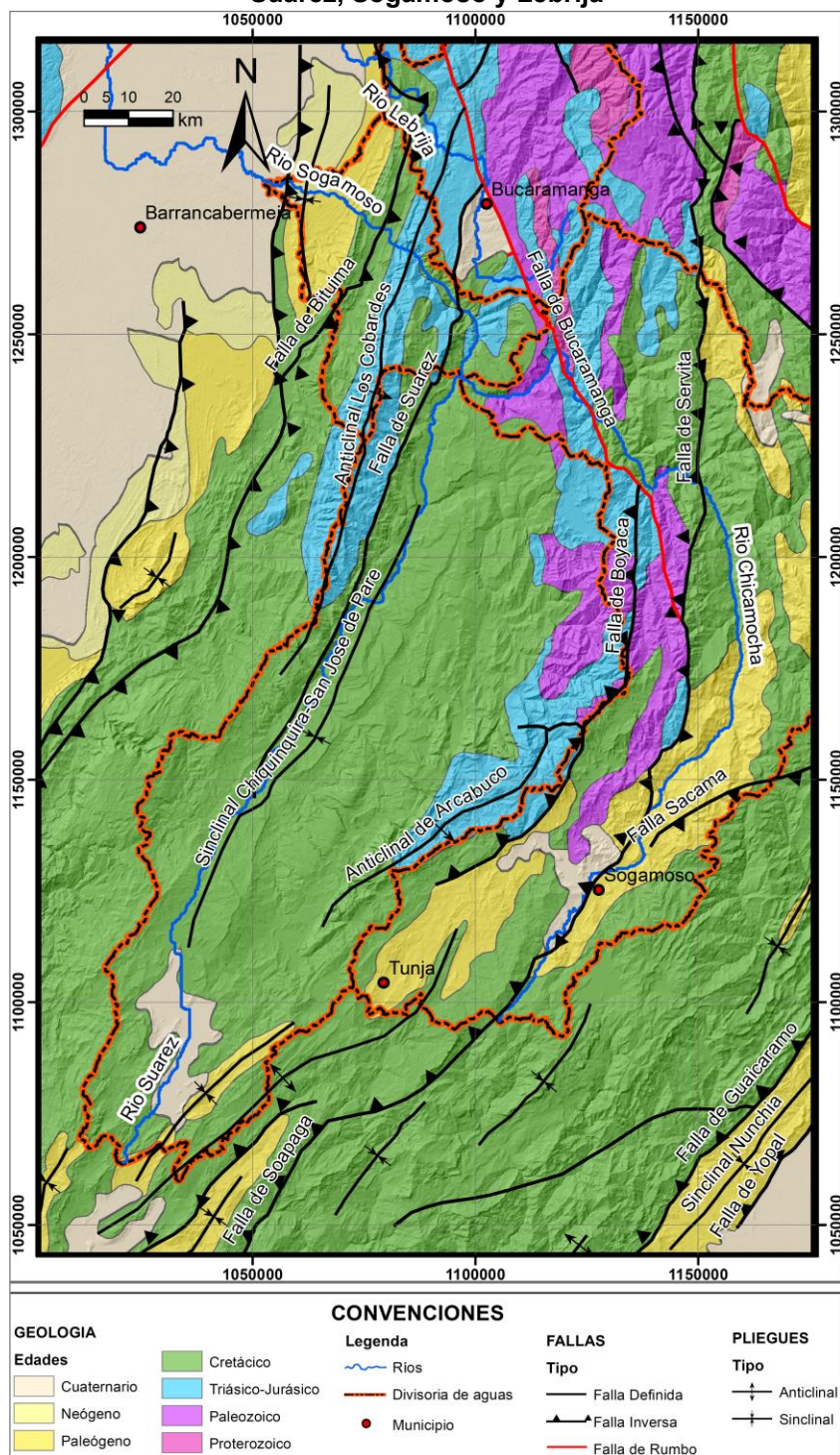
<sup>295</sup> COLOMBIA. INGEOMINAS. Geología de la Plancha 120 Bucaramanga. Escala 1:100.000. WARD, Dwight et al. con colaboración del: U.S.GEOLOGICAL SURVEY (Convenio 514-L-030 de la A.I. D.). 1997. Versión digital 2010.

<sup>296</sup> COLOMBIA. INGEOMINAS. Geología del Departamento de Santander. Escala 1:300.000. ROYERO, José y VARGAS, Rodrigo. 1999.

El río Sogamoso aguas abajo sigue su recorrido pasando por las Formaciones Tambor, Formaciones jurásicas de Girón y Jordán, siendo la Formación Girón la litología que más incide a lo largo de trayecto del cauce. Posteriormente, el flujo de río vuelve a encontrarse con rocas sedimentarias más jóvenes del Cretácico como las Formaciones Tambor, Rosa Blanca, Paja, Tablazo, Simití, La Luna, y Umir y las Formaciones del Paleógeno como las Formaciones Lisama, La Paz y Esmeraldas debido a que en este sector el cauce del río atraviesa el Anticlinal los cobardes, donde su núcleo aflora rocas más antiguas.

El segundo mapa geológico de escala 1:1.000.000 (Figura 14) permite reconocer de forma generalizada el tipo de litología que recorre los cauces fluviales principales de los ríos Chicamocha, Suárez, Sogamoso y Río de Oro, además de apreciar la divisoria de aguas de sus respectivas cuencas: el río Chicamocha desde su cabecera incide sobre rocas sedimentarias del Cretácico y Paleógeno, en las inmediaciones del Municipio de Covarachía (Boyacá) este río recorre un conjunto de rocas metamórficas del Paleozoico y Triásico-Jurásico de composición ígnea, al final de su trayectoria vuelve a reencontrarse con rocas sedimentarias de Cretácico. De otra parte, las aguas del río Suárez discurren sobre rocas sedimentarias del Cretácico y sobre pocos depósitos cuaternarios. El río Sogamoso sigue el trayecto de su flujo por litologías sedimentarias del Jurásico, Cretácico, Paleógeno, Neógeno y Cuaternario correspondientes a la CVM. Por último, el Río de Oro desde su cabecera erosiona con su lecho rocas metamórficas del Proterozoico y Paleozoico e ígneas del Jurásico hasta las cercanías del municipio de Piedecuesta, recorre los depósitos cuaternarios de la Mesa de Bucaramanga y continúa su flujo por rocas sedimentarias del Jurásico, Cretácico, Paleógeno, Neógeno y Cuaternario que hacen parte de la CVM.

**Figura 14. Mapa geológico y divisoria de aguas principales de las cuencas Chicamocha, Suárez, Sogamoso y Lebrija**



Fuente: Elaborado a partir de información de INGEOMINAS (2006)<sup>297</sup> e INGEOMINAS (2007)<sup>298</sup>.

<sup>297</sup> COLOMBIA. INGEOMINAS. Mapa Geológico de Colombia. Escala 1:2.800.000. Primera edición. GÓMEZ, Jorge. et al. 2006.

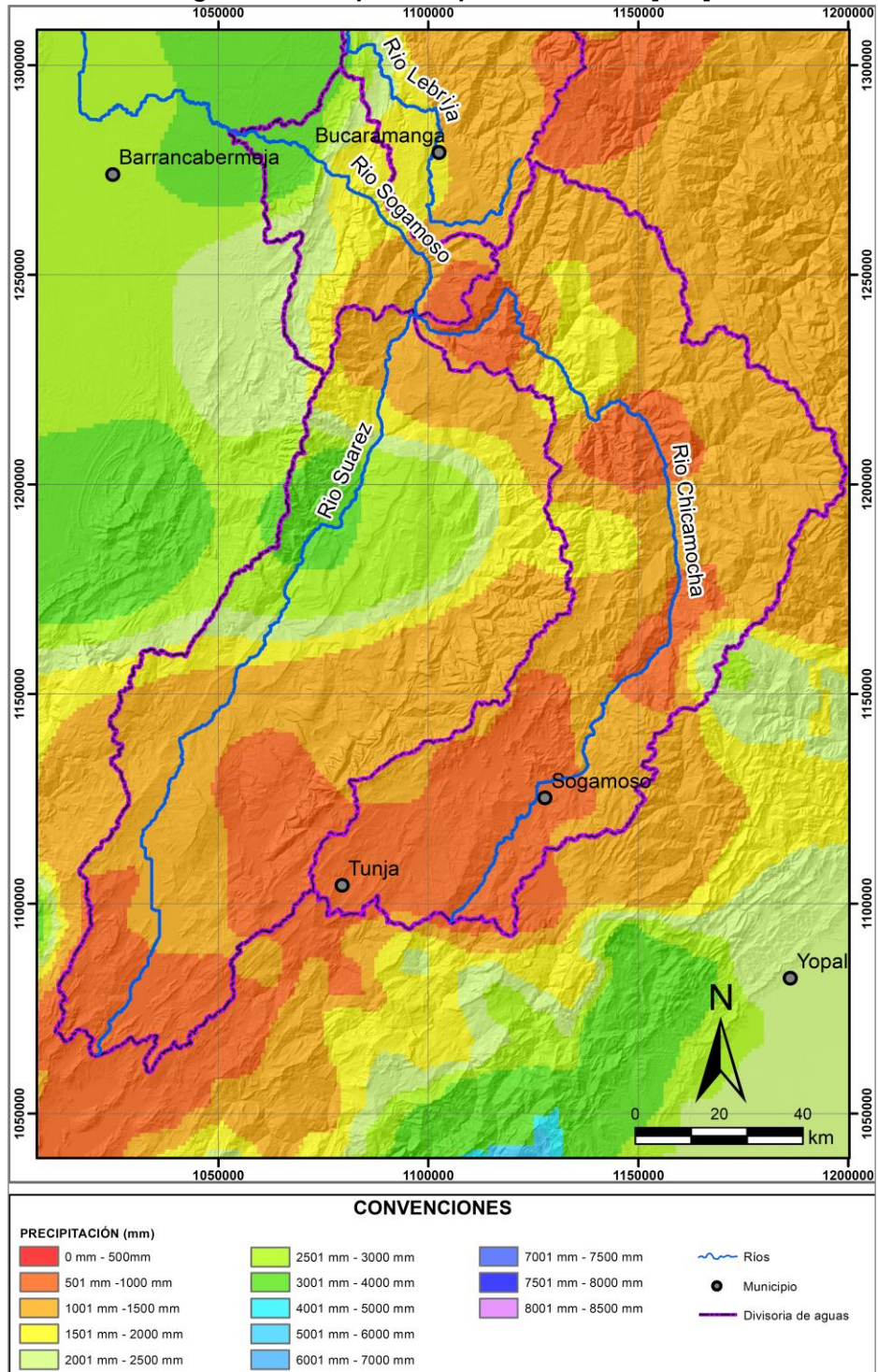
<sup>298</sup> COLOMBIA. INGEOMINAS. Geological map of Colombia. Scale 1:1.000.000. First edition. GÓMEZ, Jorge. et al. 2007.

Respecto a la distribución de las estructuras tectónicas y los cauces de los ríos principales se observa que el río Suárez se encuentra paralelo a la dirección de la Falla del Suárez y a los ejes del Sinclinal Chiquinquirá-San José de Pare y del Anticlinal Los Cobardes, todos en dirección NNE-SSW. El río Chicamocha desde su cabecera sigue la dirección SW-NE de la Falla Soapaga, posteriormente orienta su dirección hacia el NW alineándose a la Falla Bucaramanga y seguidamente ocurre un cambio brusco de la corriente de aguas en dirección SW, trazando un trayecto curvo que termina en la confluencia con el río Sogamoso en dirección NW. El río Sogamoso inicialmente discurre en la misma dirección que tiene el río Suárez (NE) y toma una nueva dirección NW para confluir en el río Magdalena; al inicio de este trayecto pasa una falla de rumbo sinistral de dirección NW. El Río de Oro inicia su flujo de aguas en dirección SSW, al llegar al Sistema de Fallas Bucaramanga-Santa Marta cambia en dirección E hasta encontrarse con la Falla del Suárez, direccionando su curso fluvial orientado a esta falla en dirección preferente N donde se une con el río Negro y cambia su dirección a NE para unirse al río Magdalena.

### **6.1.2 Precipitación promedio**

El mapa de la precipitación promedio para el periodo entre 1976-2005 (Figura 15) indica que las áreas de las cuencas Chicamocha, Suárez, Sogamoso y Lebrija que se extienden sobre la Cordillera Oriental predominan las tasas de precipitación entre 501-2000 mm; los sitios de las cabeceras de los ríos Chicamocha, Suárez y Río de Oro se caracterizan por tener tasas de precipitación más bajas entre 501-1500 mm. La zona que presentar mayores tasas de precipitación que oscilan entre los 2001-4000 mm se concentran en dos amplios sectores: en el Magdalena medio y los Llanos Orientales ubicados al E y al SE de la Cordillera Oriental respectivamente. La Tabla 5 expresa el rango de las tasa de precipitación de las cuencas mencionadas.

**Figura 15. Precipitación promedio anual [mm]**



Fuente: Elaborado a partir de información del IDEAM (2015)<sup>299</sup>.

<sup>299</sup> COLOMBIA. INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES – IDEAM. Sistema de Información Ambiental de Colombia - SIAC [online]. Catálogo de mapas. Escenario Precipitación para Colombia (mm) periodo 1976-2005. 2015. Escala 1:9.000.000. Disponible en internet: <[http://www.siac.gov.co/Catalogo\\_mapas.html](http://www.siac.gov.co/Catalogo_mapas.html)>.

**Tabla 5. Precipitación promedio anual [mm] periodo 1976-2005**

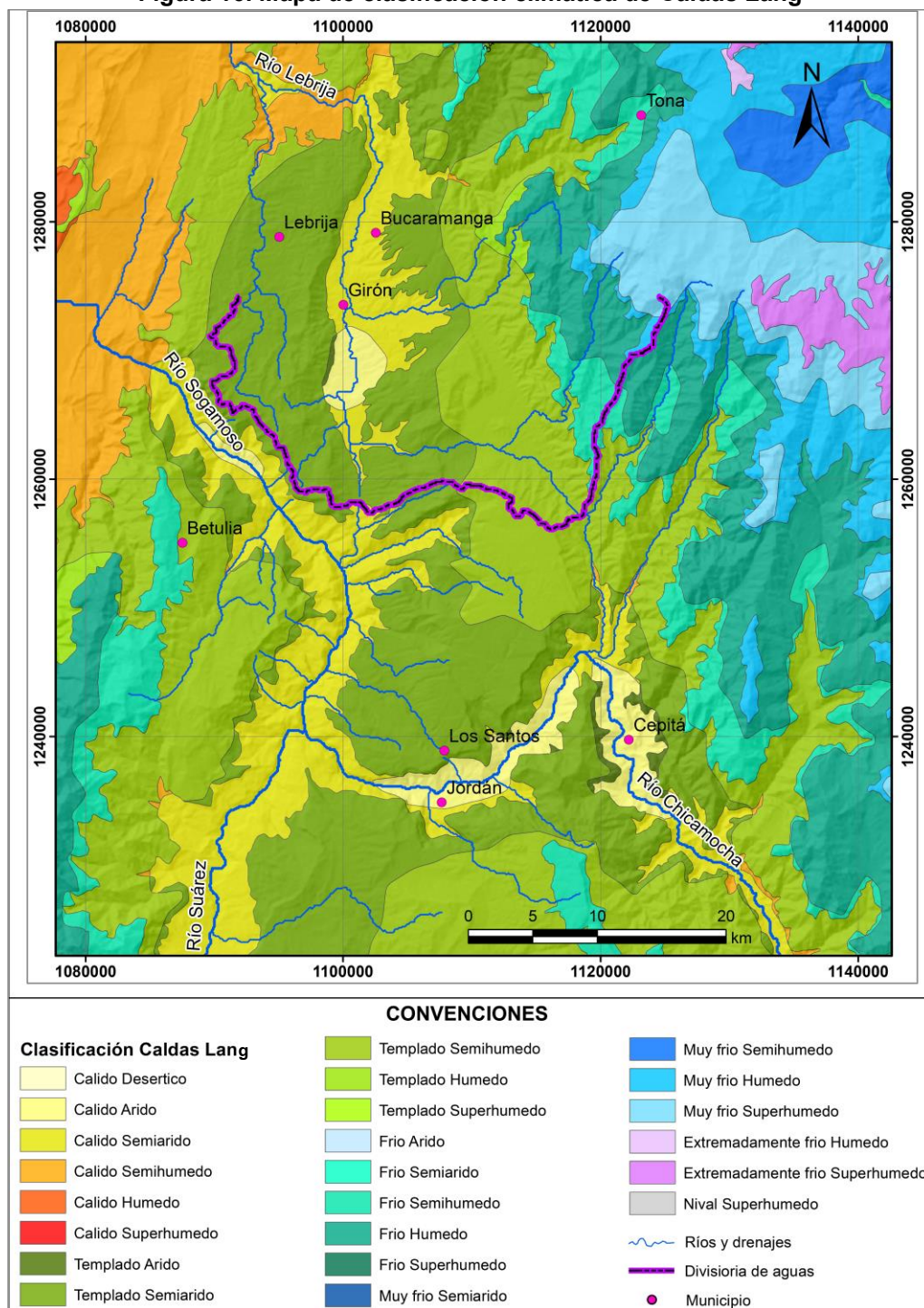
<b>CUENCA</b>	<b>PRECIPITACIÓN [mm]</b>
Chicamocha	501-2000
Suárez	501-4000
Sogamoso	501-4000
Lebrija	501-4000

### **6.1.3 Clasificación del clima**

Conforme al mapa de clasificación del climas por el método de Caldas Lang (Figura 16), la superficie y el porcentaje de las zonas climáticas en el área de estudio consignada en la Tabla 6, se observa que los climas predominantes son el Templado Semiárido y Templado Semihúmedo con una representación en porcentaje de 20,89% y 24,39% respectivamente; comprenden los sectores que rodean a pocos kilómetros de distancia los valles de los ríos Chicamocha, Suarez, Sogamoso y Río de Oro, abarcando los lugares donde están ubicados gran parte de los afluentes de los ríos principales. Estas zonas tiene altitudes entre 1001 a 2000m con variaciones topográficas de  $\pm 500$  m y una temperatura media anual entre 17,5-24°C. La precipitación promedio anual entre 501 y 2000 mm, en relación a la información de la Figura 15.

De otra parte, los sectores que cubren los valles de los ríos principales Chicamocha, Suárez, Sogamoso y Río de Oro es de clasificación climática Cálido Semiárido (11,36%) con pequeñas áreas aisladas de clasificación Cálida Árido (2,62%), muy notorias en el trayecto fluvial de río Chicamocha que comunica los municipios de Cepitá y Jordán del Departamento de Santander. Estas zonificaciones poseen una altura entre 0 y 1000 m con un margen variable de + 400 m y valores de la temperatura media anual superiores a 24°C. La precipitación promedio anual oscila entre los 501 y 1500 m, según el mapa de la Figura 15.

Figura 16. Mapa de clasificación climática de Caldas Lang



Fuente: Elaborado a partir de información del IDEAM (2012)<sup>300</sup>.

<sup>300</sup> COLOMBIA. INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES – IDEAM. Sistema de Información Ambiental de Colombia - SIAC [online]. Catálogo de mapas. Mapa de Clasificación Climática de Caldas Lang. 2012. Escala 1:3.448.396. Disponible en internet: <[http://www.siac.gov.co/Catalogo\\_mapas.html](http://www.siac.gov.co/Catalogo_mapas.html)>.

**Tabla 6. Clasificación climática Caldas Lang (2012) para la zona de estudio**

<b>CLIMA</b>	<b>AREA [km<sup>2</sup>]</b>	<b>AREA EN PORCENTAJE</b>
Cálido Árido	120,466	2,62%
Cálido Semiárido	522,933	11,36%
Cálido Semihúmedo	349,671	7,60%
Cálido Húmedo	7,354	0,16%
Templado Árido	11,961	0,26%
Templado Semiárido	961,165	20,89%
Templado Semihúmedo	1122,187	24,39%
Templado Húmedo	30,624	0,67%
Frío Semiárido	5,552	0,12%
Frío Semihúmedo	332,363	7,22%
Frío Húmedo	532,642	11,58%
Muy frío Semihúmedo	68,869	1,50%
Muy frío Húmedo	278,840	6,06%
Muy frío Superhúmedo	201,748	4,38%
Extremadamente frío Húmedo	3,591	0,08%
Extremadamente frío Superhúmedo	51,209	1,11%
<b>TOTAL</b>	<b>4601,17</b>	<b>100,00%</b>

Algunos afluentes de los ríos Chicamocha y Río de Oro situados sobre la laderas al E de la Falla Bucaramanga, en áreas cercanas a sus cabecera presenta una zonificación climática de Frío Semihúmedo, Frío Húmedo, Muy frío Húmedo y Muy frío Superhúmedo. Las dos primeras se encuentran a una altura topográfica entre 2001-3000 m con una variación de la altitud de  $\pm 500$  m y temperatura media anual entre 12 y 17,5°C; estas zonificaciones también se observa en la Mesa de Zapatoca al SE del municipio de Betulia. Las dos últimas se ubican a una altitud entre 3001 a 3700 m y una temperatura media anual 7-12°C. La tasa de precipitación promedio anual para las cuatro zonas climáticas oscila entre 501 y 2000 mm como muestra la Figura 15.

## **6.2 OBSERVACIONES TOPOGRÁFICAS**

### **6.2.1 Parámetros del terreno**

En este apartado se describieron tres parámetros de la superficie: la topografía, la pendiente local y la pendiente regional de la zona de estudio.

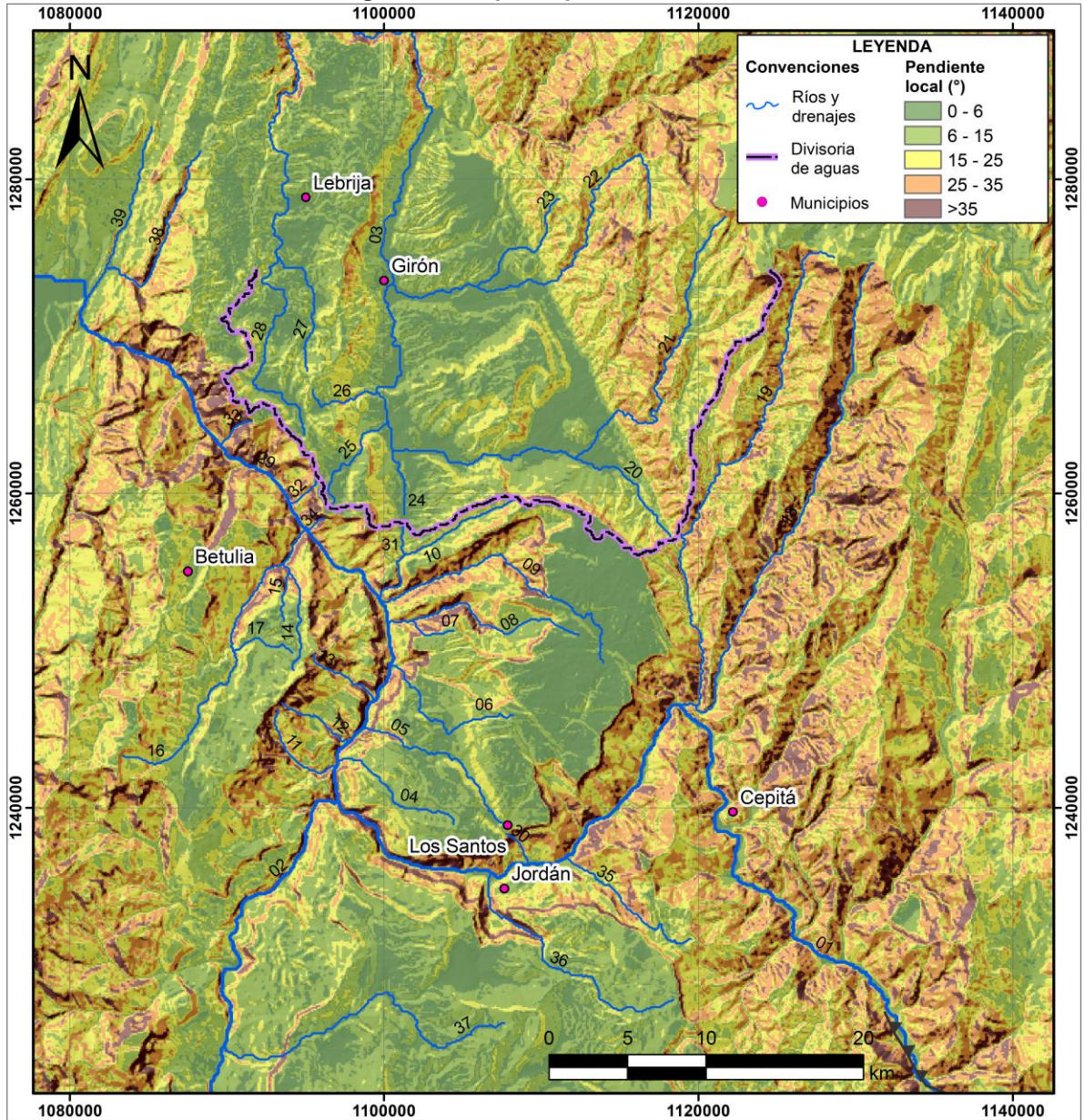
La topografía del terreno (Figura 20) muestra en general dos rasgos diferenciados: una gran región caracterizada por superficies casi planas bañada por los ríos principales y dos sectores conformada por laderas pronunciadas. El primero corresponde a la región de las mesas descritas por Julivert, en el área central se sitúa la Mesa de los Santos entre los 1000 a 1600 m sobre el nivel del mar, muy similar a la altitud de la Mesa de San Gil ubicada hacia el S; La Mesa de Lebrija se localiza al NE la con una altitud entre los 800 a 1200 m. En el N central se encuentra la Mesa de Bucaramanga, es la más homogénea respecto a su altitud (800-1000 m) donde se destaca un pequeño sector más elevando llamado la Mesa de los Santos (aproximadamente a más de 1200 m). De otro lado, La Mesa de Zapatoca ubicada hacia el SE es una pequeña área entre los 1400 a 1800 m sobre el nivel del mar, en la parte occidental está marcada por laderas de mayor pendiente coincidiendo con una estructura arqueada correspondiente al Anticlinal de los Cobardes (1800-2800 m de altitud aproximadamente). Por último, al E se ubica las laderas del Macizo de Santander, una región con la mayor altitud entre los 1200 hasta los 3400 m.

La pendiente local representada en la Figura 17 se clasifica en 5 rangos de pendiente, muestra la divisoria de aguas (línea discontinua resaltada en color lila) que separa las cuencas Lebrija y Chicamocha-Sogamoso, ubicada al N y al S respectivamente. Se observa un contraste en los valores de la pendiente local en cada lado de la divisoria: en la cuenca Lebrija al E de la Falla Bucaramanga predominan las pendiente entre 0-15° y al W de la misma falla prevalecen el rango de pendientes entre los 15-35°; la cuenca Chicamocha-Sogamoso dominan las pendientes entre 0-15° en su localidad central sobre la Mesa de los Santos, al E y W de la mesa de los Santos las laderas junto a la divisoria de aguas describe pendientes predominantes superiores a 15°.

Finalmente, la pendiente regional (Figura 18) es el producto del valor de las pendientes de la topografía media del terreno, obtenida mediante un operador de vecindad a una ventana móvil de 10 km de diámetro con el objeto resaltar las

diferencias topográficas desde un punto de vista más generalizado; el mapa regional relaciona los contornos de la topografía media (líneas color blanco cada 100 m).

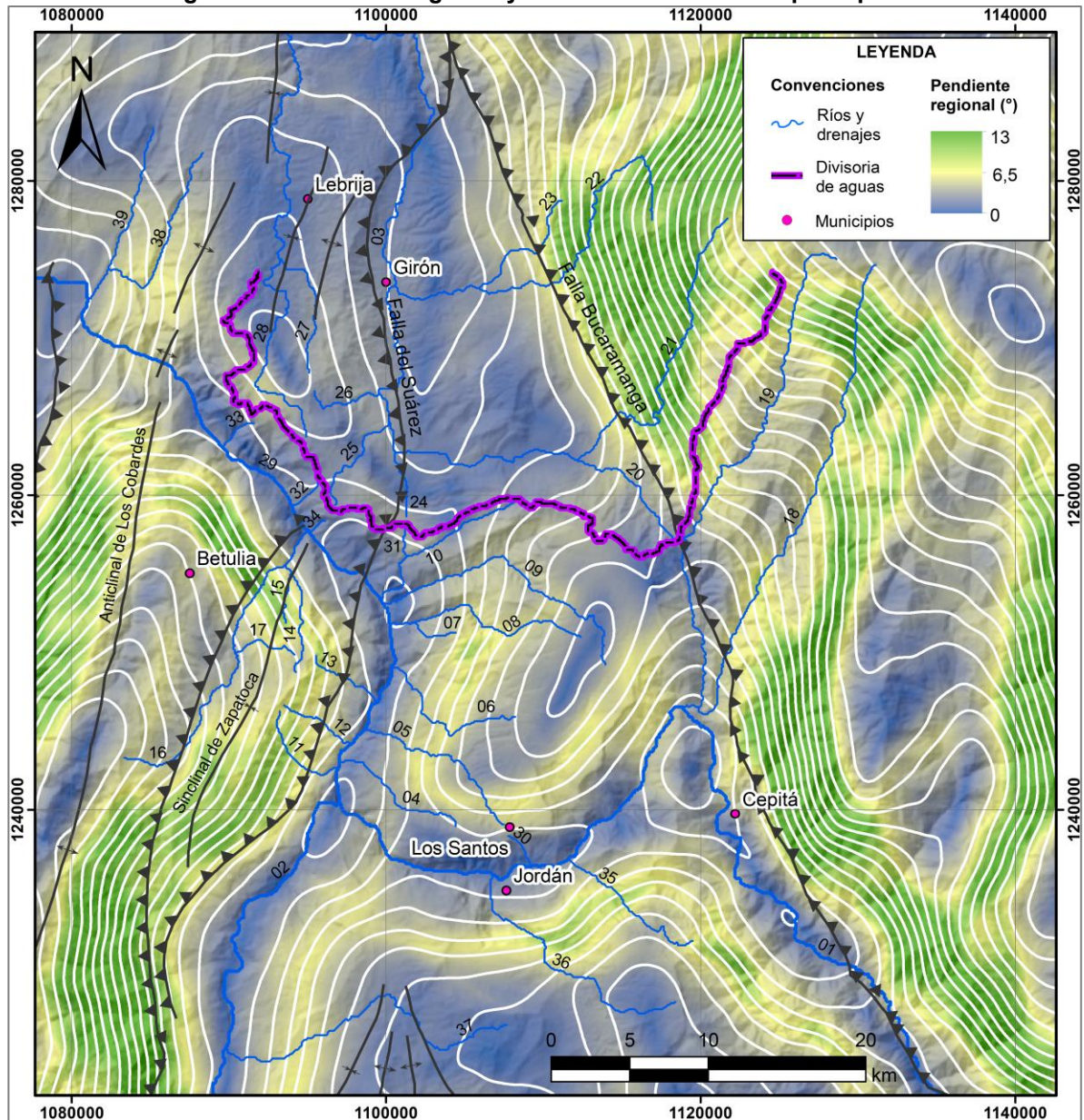
Figura 17. Mapa de pendiente local



Se observa que las zonas de las Mesas de Bucaramanga y Lebrija predominan valores de pendiente regional bajas entre 0-6°; los afluentes sobre la Mesa de Lebrija fluyen en dirección preferente N-S mostrando un patrón de drenaje paralelo

ejercido por control estructural como los anticlinales, en la Mesa Bucaramanga sólo el Río de Oro fluye con el mismo patrón siguiendo el curso de la Falla del Suárez.

**Figura 18. Pendiente regional y estructuras tectónicas principales**



Las Mesas de Los Santos y San Gil presentan pequeñas áreas localizadas con pendientes regionales bajas (0-6°), sin embargo los flancos que las rodean tiene

una pendiente regional entre 6-10°. En este mapa resalta dos sectores con altos valores en la pendiente regional: las laderas de las Mesa de Zapatoca y del Macizo de Santander, ambas se encuentran entre los 6-13°; la mayoría de los afluentes de la Mesa de Zapatoca discurren en dirección N-S, exhiben un patrón de drenaje paralelos a las estructuras tectónicas como el Anticlinal de los Cobardes, Sinclinal de Zapatoca y Falla del Suárez. De otra parte, el patrón de drenaje transversal predominan en las zonas de ladera o alta pendiente: en la Mesa de los Santos fluyendo en dirección aproximada E-W, en el Macizo de Santander que discurren en dirección NNE-SWW y en la Mesa de Zapatoca en dirección aproximada W-E. Otros ríos que se encuentran alineados a las fallas y estructuras tectónicas son el Suárez y parte del cauce del río Sogamoso con la Falla del Suárez en dirección aproximada N-S y parte del trayecto del río Chicamocha con la Falla Bucaramanga en dirección SE-NW. Los nombres de los drenajes están relacionados con su numeración en la Tabla 8.

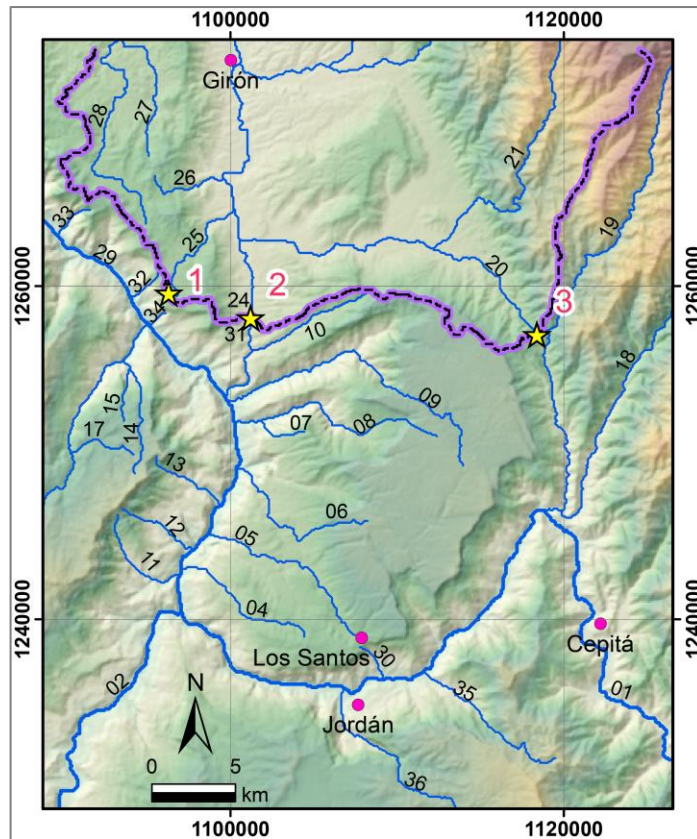
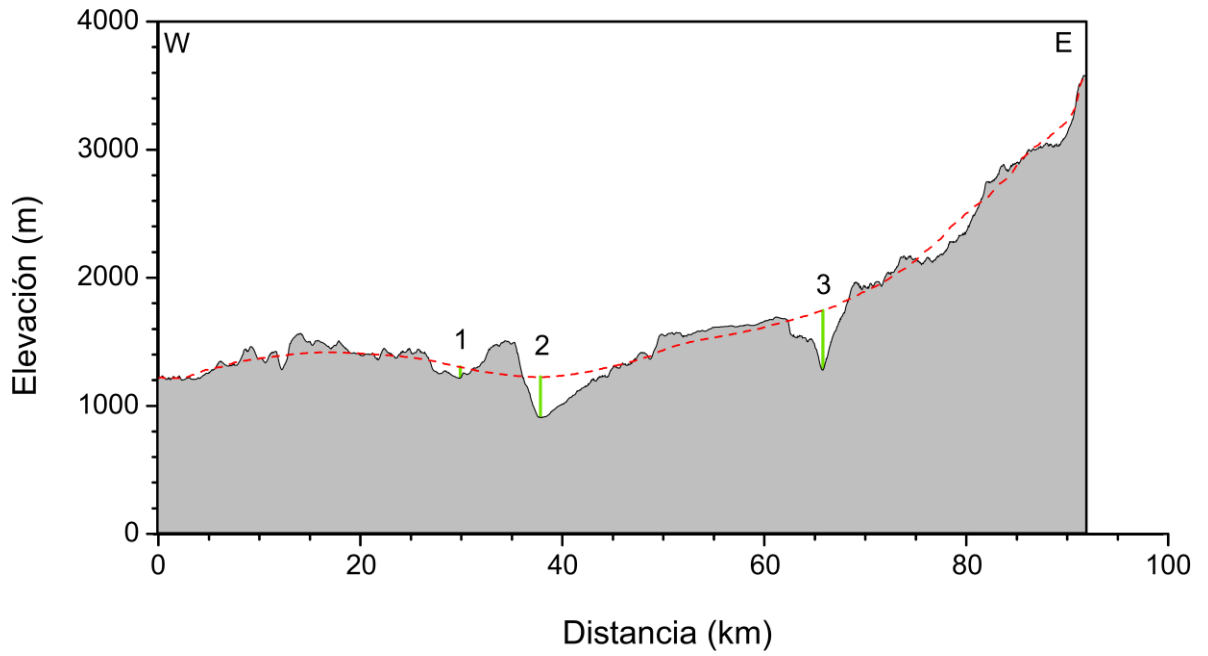
### 6.2.2 Depresiones en el perfil de la divisoria de aguas

La Figura 19 ilustra la divisoria de aguas entre las cuencas Lebrija y Chicamocha-Sogamoso en vistas de perfil y planta (línea discontinua resaltada en color morado), se identificaron tres depresiones enumeradas en el perfil y señaladas en el mapa (estrellas amarillas). La comparación de los valores de altura de las depresiones con la elevación promedio de la divisoria de aguas (línea discontinua roja) registra diferencias que superan los 86m (Ver Tabla 7).

**Tabla 7. Identificación de las depresiones sobre el perfil de la divisoria de aguas**

IDENTIFICACIÓN DE LA DEPRESIÓN	UBICACIÓN		ALTITUD DE LA DEPRESIÓN	DIFERENCIA ENTRE LA ALTITUD DE LA DEPRESIÓN Y LA ELEVACIÓN PROMEDIO
	X	Y		
1	1.096.294	1.259.582	1215	86
2	1.101.192	1.258.104	908	316
3	1.118.382	1.257.087	1279	467

Figura 19. Depresiones en la divisoria de aguas en vista perfil y planta



La depresión 1 situada a una altura de 1215 m separa las cabeceras de la quebrada Grande (2) que fluye en dirección NE y el zanjón de Pilas discurre en dirección SW. La altitud de la cabecera de la quebrada Grande (2) se ubica a 1235 m, a 20 m de diferencia en altura al punto más cercano de la divisoria de aguas (depresión 1).

Las cabeceras de las quebradas La Gacha y Los Orumos se encuentran próximos a la depresión 2, la primera quebrada tiene una altura de 885 m fluyendo hacia el N, la segunda se eleva a 904 m y discurre hacia el S. La diferencia de la altura topográfica entre los dos nacimientos y la depresión 2 (908 m) es menor a 23 m.

Finalmente, la depresión 3 se ubica a una altitud de 1279 m entre las cabeceras de la quebrada Grande (1) que fluye hacia el NW y el cauce del río Manco cuyo trayecto fluvial inicia en dirección NW y cambia a dirección S cuando se aproxima a la depresión 3. La elevación del nacimiento de la quebrada Grande (1) situada a 1278 m, tiene una diferencia de 1 m respecto a la altura de la depresión 3.

## **6.3 OBSERVACIONES FLUVIALES**

### **6.3.1 Generación de la red de drenaje**

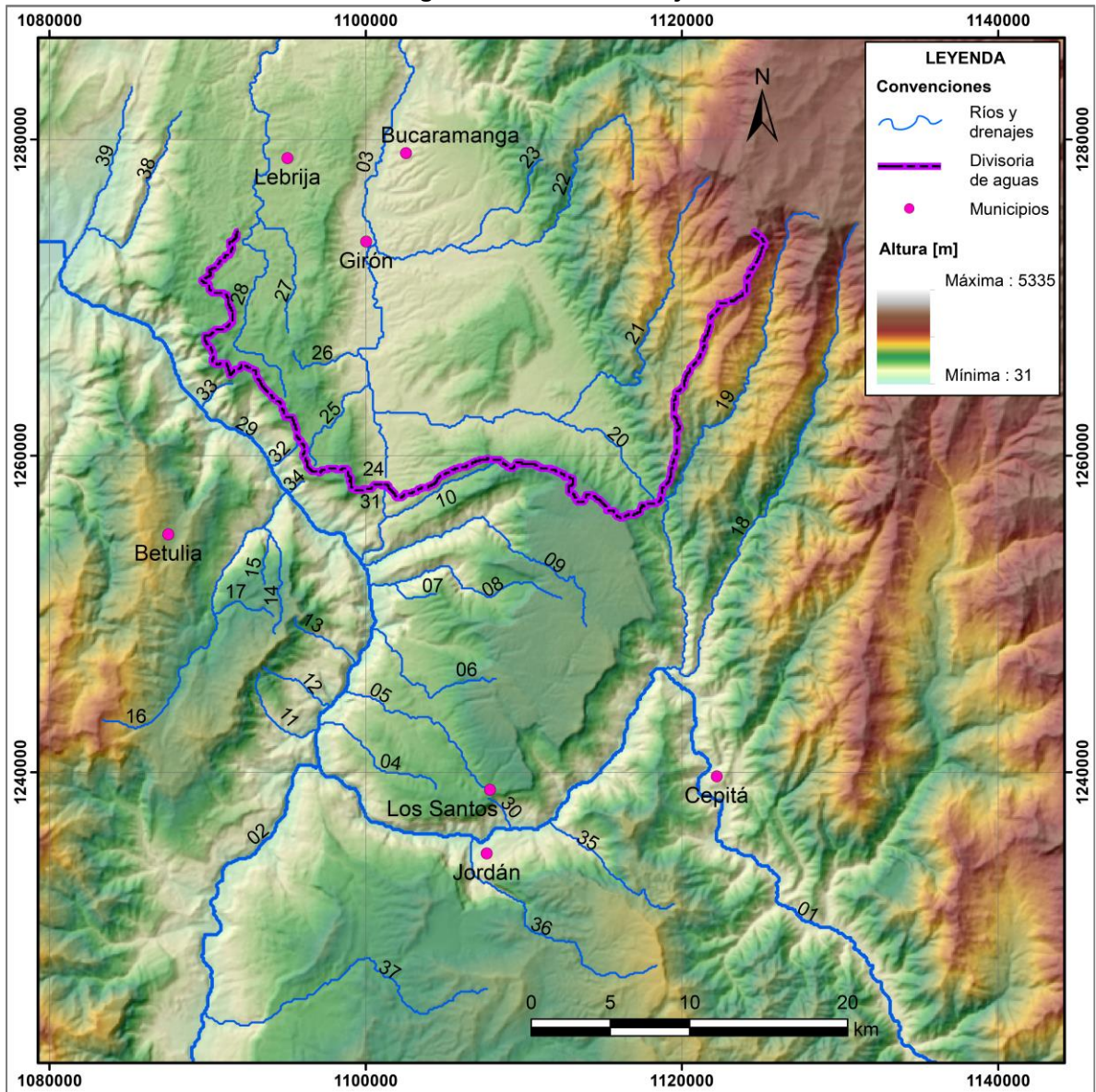
La red de drenaje generada a partir del DEM (Figura 20) comprende algunos afluentes de interés de la zona de estudio de los ríos Chicamocha, Suárez, Sogamoso y Lebrija. Se estableció una nomenclatura por número para identificar la red fluvial como se muestra en la Tabla 8, los nombres corresponden a algunos mencionados en el trabajo de Julivert (1958)<sup>301</sup> y otros se complementaron a través del Geoportal del IGAC<sup>302</sup>. En este trabajo se emplea los nombres establecidos por el IGAC.

---

<sup>301</sup> JULIVERT. Op. cit. p. 22-34.

<sup>302</sup> COLOMBIA. INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI. Op. cit.

Figura 20. Red de drenaje



Los ríos Chicamocha, Suárez, Sogamoso y Río de Oro se constituyen como principales en el área de estudio. La incisión profunda del lecho de los tres primeros dividen el área formado el conjunto de las mesas: Bucaramanga, Lebrija y Los Santos al N de los ríos Chicamocha y Sogamoso, San Gil al E del río Suárez y Zapatoca al S del río Sogamoso. La diferencia en altura entre la incisión fluvial y el terreno es superior a los 700m por ende los ríos principales están muy encajonados diferenciado ampliamente la zona de las mesas (Tabla 9).

**Tabla 8. Nomenclatura de la red de drenaje**

CODIGO	AFLUENTE		CODIGO	AFLUENTE	
	Nombre Anterior (Julivert 1958)	Nombre Actual (IGAC)		Nombre Anterior (Julivert 1958)	Nombre Actual (IGAC)
01	Río Chicamocha	Río Chicamocha	21	----	Q. La Moza
02	Río Suárez	Río Suárez	22	Río Frío	Río Frío
03	Río de Oro	Río de Oro	23	Q. la Despensa	----
04	Q. Aguablanca	Q. Aguagorda	24	Q. la Gacha	Q. La Gacha
05	Q. Chivatera	Q. Los Santos	25	Q. Grande (2)	Q. Grande (2)
06	Q. del Sumidero	Q. Sumidero	26	Q. Mataperros	Q. Mataperros
07	Q. la Aguada	Q. El Tigre	27	Q. la Puentana	Q. La Puentana
08	Q. del Angelino	Q. Lajas	28	Q. la Angula	Q. La Angula
09	Q. de la Honda	Q. Honda	29	Río Sogamoso	Río Sogamoso
10	Q. los Montes	Q. El Monte	30	----	Q. Seca
11	Q. las Vegas	Q. Seca	31	----	Q. Los Orumos
12	Q. Lagunetas	Q. La Hondura	32	----	Zanjón de Mutis
13	Q. Cimarronera	Q. El Gachal	33	----	Q. de la Peña
14	Q. la Laja (1)	Q. San Isidro	34	----	Zanjón de Pilas
15	Q. Mensulí	Q. Mensulí	35	Q. de Aratoca	Q. Aratoca
16	Q. de Zapatoca	Q. Zapatoca	36	Q. la Laja (2)	Q. La Laja
17	Q. la Cueva	Q. La Curva	37	Q. Barichara	Q. Barichara
18	----	Río Umpalá	38	Q. Pujamanes	Q. Pujomanes
19	----	Río Manco	39	Q. Aguablanca	Q. Agua Buena
20	Q. Grande (1)	Q. Grande (1)			

Fuente: Elaborado a partir de información de Información tomada Julivert (1958)<sup>303</sup> e IGAC<sup>304</sup>.

El río Suárez discurre en dirección preferente N-S hasta unirse con el Chicamocha. De otro lado, el río Chicamocha fluye con rumbo NW hasta el corregimiento Pescadero del municipio de Piedecuesta, donde los cauces de los ríos Manco y Umpalá se unen en uno y confluyen en el río Chicamocha a una altitud de 541 m. Posteriormente la dirección flujo cambia abruptamente hacia el SW, describiendo una trayectoria de longitud de arco cóncavo que termina hacia el ENE, punto de confluencia con el río Sogamoso elevado a 343 m sobre el nivel del mar. El río Sogamoso que inicia su recorrido de la unión del Suárez y Chicamocha, continúa la dirección preferente N-S hasta los 297 m de altura donde se encuentra con la quebrada La Honda, luego toma un rumbo NW para unirse al río Magdalena.

El nacimiento del Río de Oro se encuentra en el Alto el Picacho a 3199 m de altura, desciende hacia el SSW hasta pasar por la vereda El Granadillo, se desvía hacia el E realizando un trayecto en U y nuevamente retoma su dirección inicial atravesando

<sup>303</sup> JULIVERT. Op. cit. p. 22-34.

<sup>304</sup> COLOMIBA. INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI. Op. cit.

el municipio de Piedecuesta. A los 909 m de altitud se une a la quebrada Grande (1) cambiando su rumbo hacia el W hasta llegar a elevación de 815 m, donde se alinea a la Falla del Suárez fluyendo en dirección N, a su paso por el corregimiento Bocas del municipio de Girón para unirse al río Negro y tomar el nombre de río Lebrija.

**Tabla 9. Comparación de alturas entre la topografía y los cauces de los ríos principales**

ZONA DE LAS MESAS	ALTURA TOPOGRÁFICA		ALTURA DEL CAUCE			DIFERENCIA ENTRE EL TERRENO Y EL CAUCE PROMEDIO [m]
	Rango [m]	Promedio [m]	Rango [m]	Promedio [m]	Cauce	
Mesa de Bucaramanga	800-1000	1000	645-886	766	Q. La Gacha-Río de Oro	234
Mesa de Lebrija	800-1200	1000	334-886	610	Q. La Gacha-Río de Oro-Lebrija	390
			195-297	246	Sogamoso	754
Mesa de Los Santos	1000-1600	1300	297-541	419	Chicamocha-Sogamoso	881
Mesa de San Gil	1000-1600	1300	343-831	587	Chicamocha	713
			343-536	440	Suárez	860
Mesa de Zapatoca	1400-1800	1600	195-536	366	Suárez-Sogamoso	1234

Los drenajes de la zona de estudio se destacan por fluir en dos direcciones dominantes: los afluentes N-S y los flujos E-W. Los primeros se observan en las Mesas de Los Santos y Zapatoca con las quebradas Pujomanes, Agua Buena, Zapatoca, Mensulí y San Isidro; igualmente ocurre en el Río de Oro, río Suárez y parte de los cauces de los ríos Chicamocha y Sogamoso. La dirección E-W se visualiza principalmente en los afluentes de la Mesa de Los Santos, Mesa de Bucaramanga y San Gil.

### 6.3.2 Extracción de los perfiles longitudinales

La Figura 21 representa los perfiles longitudinales de la de las cuencas Sogamoso y Lebrija, corresponde a la red de drenaje representada en vista de planta en la Figura 20. Los perfiles están ilustrados desde su nacimiento hasta una altura aproximada de 73 m del cauce principal en su cuenca respectiva, los afluentes se

clasificaron por colores conforme a la dirección preferente del flujo en su punto de confluencia con el río principal, ya que este último varía de dirección durante el trayecto de su recorrido.

Para la zona de estudio en la cuenca Lebrija se toma como el trayecto inicial del río principal el cauce del Río de Oro, que comienza a alinearse a la Falla del Suárez discurrendo en dirección N-S. A continuación se muestra la descripción de los perfiles longitudinales de la Figura 21 (Tabla10), donde se agruparon características relevantes por zonas geográficas que permitan asociar diferencias y similitudes de los niveles bases fluviales de una región a otra, haciendo énfasis en la región de las mesas.

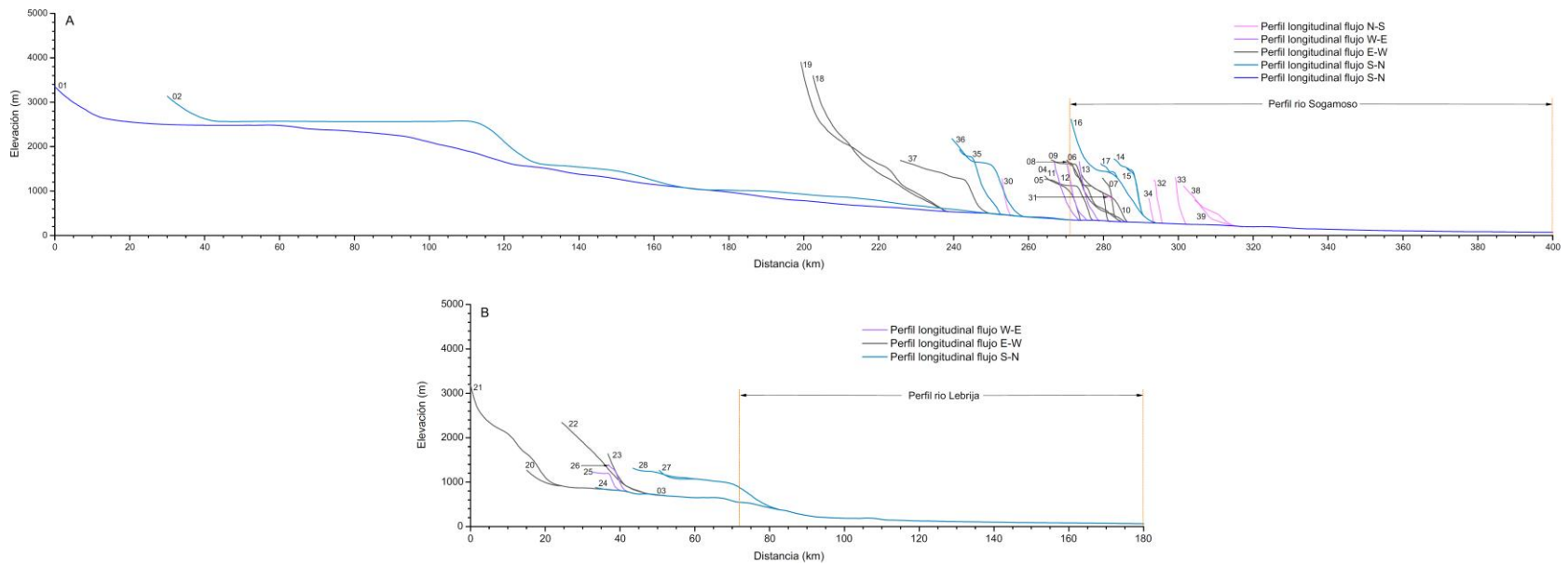
**Tabla 10. Descripción de los perfiles longitudinales en el área de estudio**

Zona geográfica	Afluente	Dirección en el punto de confluencia	Confluencia	Descripción de los perfiles
Mesa de Bucaramanga	20, 21, 22, 23	E-W	Río de Oro	Estos drenajes ubican su cabecera sobre la ladera del Macizo de Santander a alturas diversas entre 1278-3199 m. Desde el nacimiento sus perfiles describen una línea de pendiente alta sin presentar puntos de quiebre, salvo el afluente 21 se evidencia dos <i>knickpoints</i> difusos: uno a los 2077 m y otro a los 1530 m de altura.
	24	S-N	Río de Oro	Inicia su curso de aguas a una elevación de 886 m, a un ángulo muy bajo sin apreciar una concavidad marcada. No se observa quiebres de pendiente.
Mesa de Lebrija	25, 26	W-E	Río de Oro	Los nacimientos se localizan entre los 1394-1235 m sobre el nivel del mar. El afluente 25 muestra una topografía plana desde el inicio de su perfil longitudinal hasta el punto de quiebre de la pendiente. Ambos tienen un <i>knickpoint</i> definido entre los 1194-1269 m de altitud.
	32, 33, 34,	N-S	Río Chicamohca	Las cabeceras se localizan entre los 844-1241 m de elevación, los perfiles se destacan por sus pendientes abruptas. No registra <i>knickpoints</i> reflejado en sus perfiles
	38, 39			La cabecera del afluente 38 se eleva a los 1118 m y el afluente 39 nace a una altitud de 796 m. Solo el afluente 38 evidencia un quiebre del perfil longitudinal a los 484 m. Ambos drenajes describen una pendiente muy inclinada
	27, 28	S-N	Río Lebrija	Los nacimientos se elevan entre los 1310-1288 m, los perfiles exponen una topografía suavemente inclinada. El afluente 28 muestra un quiebre difuso de su perfil a los 1233 m de altitud. Estos dos afluentes se unen antes de confluir al río Lebrija, en el trayecto del cauce compartido presenta un <i>knickpoint</i> definido a una elevación de 954 m.

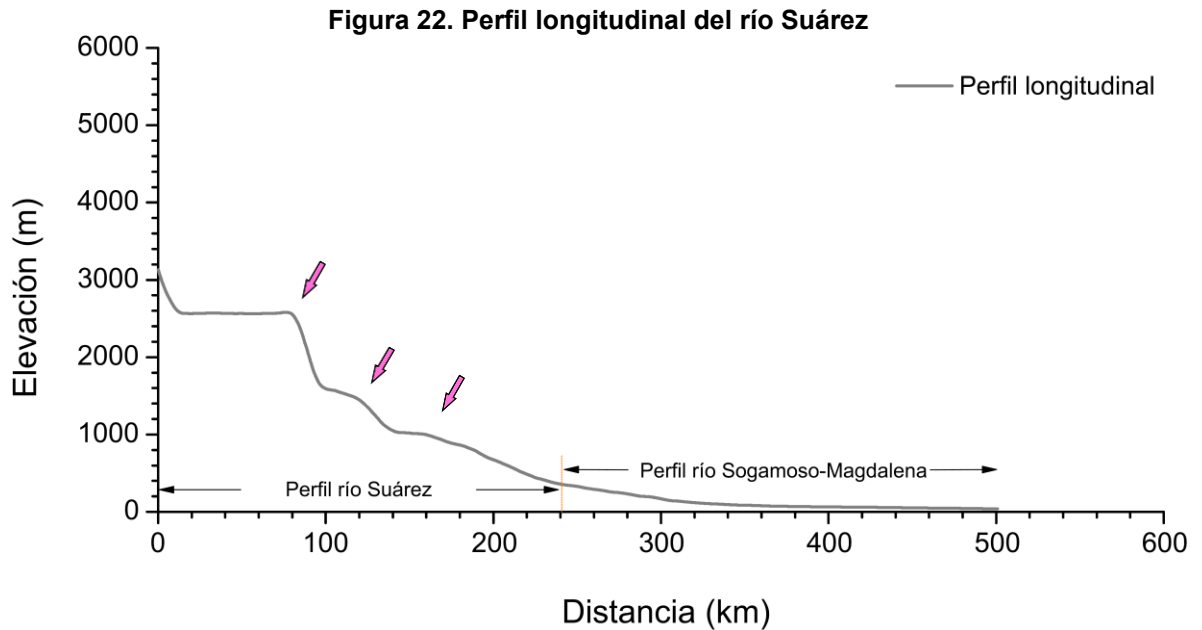
Tabla 10. (Continuación)

Zona geográfica	Afluente	Dirección en el punto de confluencia	Confluencia	Descripción de los perfiles
Mesa de los Santos	04, 05, 06, 07, 08, 09, 10	E-W	Río Sogamoso	Se observa patrones en la ubicación de cabeceras y puntos de quiebre de los perfiles: las alturas de las cabeceras coinciden por grupos: los afluentes 06, 08 y 09 nace a una mayor elevación entre 1667-1704 m, coincidiendo con un <i>knickpoint</i> entre los 1572-1628 m de altitud. Los afluentes 04, 05, 07 y 10 nacen a una altura entre los 1272-1354 m y poseen un único punto de quiebre. Existe un <i>knickpoint</i> en común casi para todos los afluentes, se localiza a los 980-1109 m de altitud, esto se aplica para los afluentes 04, 05, 06, 07 y 08. El afluente que difiere en su punto de quiebre de su perfil con los demás es el 07 con una altura de 1077 m, los puntos de quiebre más bajos los tiene los afluentes 08 y 09 entre 479-550 m de altura. Los afluentes 05 y 06 muestran en sus perfiles un pequeño trayecto de planicie, los demás afluentes inician desde su cabecera con una pendiente muy pronunciada.
	30	N-S	Río Chicamocha	Nace a una elevación de 1277 m, tiene una pendiente abrupta y no se aprecia <i>knickpoints</i> a lo largo del perfil.
	31	N-S	Río Sogamoso	Su nacimiento se localiza a los 904 m de altura, tiene una pendiente inclinada y no presenta <i>knickpoints</i> .
Mesa de San Gil	37	E-W	Río Suárez	Nace a una altitud de 1714 m, se aprecia una trayectoria inicial no cóncava con una pendiente inclinada. Tiene un punto de quiebre definido a una elevación de 1250 m.
	35, 36	N-S	Río Chicamocha	La cabecera de los afluente 35 y 36 se encuentran a 195 m y 2184 m de elevación respectivamente, sus perfiles describen una pendiente empinada y una clara concavidad que culmina en un punto de quiebre definido en común, localizado entre los 1591-1767 m.
Mesa de Zapatoaca	11, 12, 13	W-E	Río Sogamoso	Estos afluentes inician su curso a una altitud entre 1635-1659 m, su perfil se destaca por tener pendientes abruptas y no presenta puntos de quiebre.
	14, 15, 16, 17	S-N	Río Sogamoso	La cabecera del afluente 16 se encuentra muy elevada a 2616 m, mostrando una trayectoria empinada. Los demás afluente nace entre los 1498-1743 m de altitud y sus curvas describen pendientes muy inclinadas. Todos tienen <i>knickpoints</i> en común entre los 1382-1544 m de altitud.
Macizo de Santander	18, 19	E-W	Río Chicamocha	Son los afluentes que nacen a mayor elevación de la red de drenaje (entre los 3606-3820 m de altura), exponen los perfiles más empinados. En el afluente 18 se aprecia un <i>knickpoint</i> definido a una altura de 2070 m y el afluente 19 tiene dos <i>knickpoints</i> difusos a una elevación de 1500 y 1995 m.

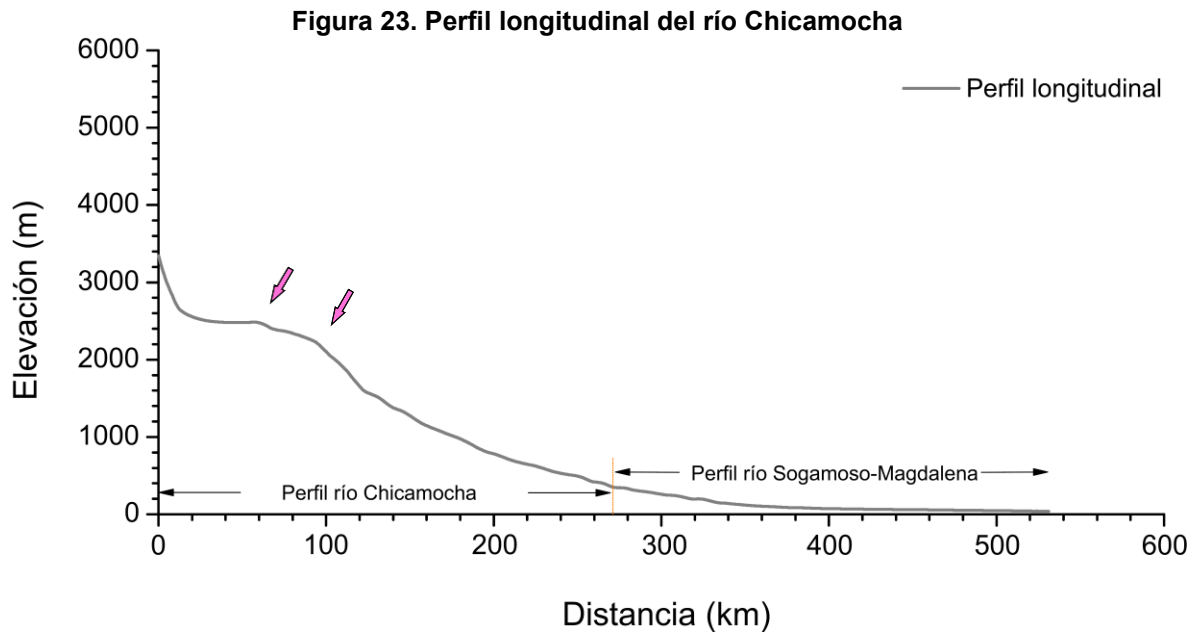
Figura 21. Perfiles longitudinales cuenca Sogamoso (A) y cuenca Lebrija (B)



Mirando en detalle los perfiles longitudinales de los ríos principales de la cuenca del Sogamoso, la Figura 22 y Figura 23 expone los cauces individuales para los ríos Suárez y Chicamocha con el objeto de averiguar si encontramos indicios que responda al cambio de dirección de los ríos Chicamocha y Suárez que se encontraban alineados a fallas Bucaramanga y del Suárez respectivamente.



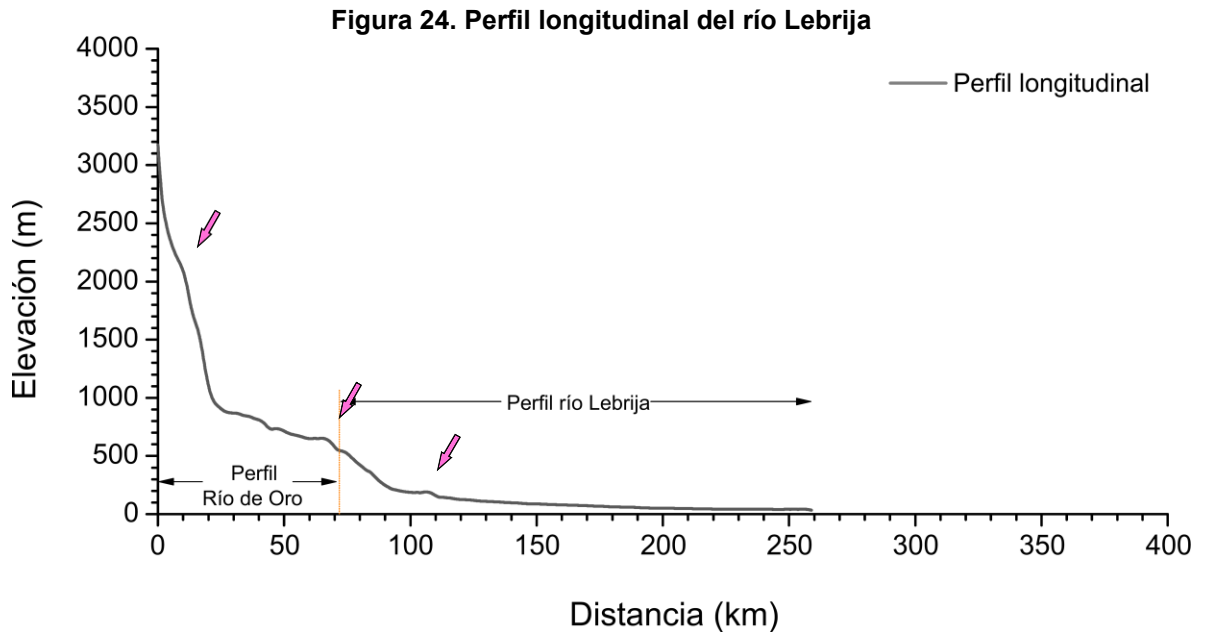
El río Sogamoso se deriva de la confluencia de los ríos Suárez y Chicamocha. El perfil de río Suarez describe aguas abajo una cabecera empinada ubicada a 3105 m de altura, continúa con un trazado cóncavo pasando por un sector de topografía plana. Se visualiza dos *knickpoints* (flechas color rosado) o quiebres de pendiente notorios mostrando un cambio de nivel base a los 2564 m y 1461 m de altura, seguido de un tercer *knickpoint* difuso a una altitud de 995 m, el perfil continúa con una curva regular (sin ondulaciones) a partir de los 670 m.



De otro lado, el perfil longitudinal del río Chicamocha inicia su cabecera con una pendiente empinada a una elevación de 3246 m seguido de una zona de planicie. Se observa dos *knickpoints* ubicados a 2481 m y 2247 m de altitud, ilustrando una trayectoria convexa difusa; a partir de los 1522 m se aprecia una curva irregular con pequeñas ondulaciones hasta llegar a una altitud cercana a los 200 m, donde el trazado del río toma una trayectoria regular. Comparando los perfiles fluviales del Chicamocha y Suarez en términos generales, el primero describe un trazado irregular más cercano a un nivel base en equilibrio y *knickpoints* difusos; el segundo imperan los tramos de superficie regular (escasas ondulaciones) exponiendo un perfil más alejado de su nivel base, dos *knickpoints* definidos y un *knickpoint* difuso.

El río Lebrija no aparece en la zona de estudio pero si su afluente el Río de Oro, sin embargo su perfil longitudinal se puede visualizar en la Figura 24. El perfil del río Lebrija inicia con una pendiente muy inclinada, su cabecera se encuentra elevada a 3199 m, más adelante se divisa un punto de quiebre difuso a los 2077 m de altitud. A los 912 m de altura se observa una pendiente suavemente inclinada, su trazado describe una línea irregular seguido de un *knickpoint* a los 641 m, posteriormente

se aprecia un trazado con ligeras ondulaciones hasta la altura de 190 m donde vuelve haber un punto de quiebre. Finalmente el trazado del perfil se vuelve regular hasta a partir de los 145 m.



### 6.3.3 Reconstrucción de paleoperfiles

En condiciones *steady-state* la tasa de levantamiento se compensa con la tasa de erosión sin variación en el tiempo (Whipple y Tucker, 1999; Whipple y Tucker, 2002<sup>305</sup>). Asumiendo esta condición en la zona de estudio, el método de la reconstrucción de los paleoperfiles se basa en la ecuación (8) (ver sección 3.1.2, página 39), descrita por Hoke *et al.* (2007)<sup>306</sup>.

Dentro de la ecuación se encuentran parámetros fijos: la constante  $k_a = 6,7$  y exponente  $h = 1,67$  derivadas de la ley de Hack (1957)<sup>307</sup>, que expresa una relación

<sup>305</sup> WHIPPLE and TUCKER. Implications of sediment-flux-dependent river incision models for landscape evolution. Op. cit., p. ETG 3-1-ETG 3-20.

<sup>306</sup> HOKE et al. Op. cit., p. 5-9.

<sup>307</sup> HACK. Op. cit. Citado por WHIPPLE and TUCKER. Dynamics of the stream power river incision model: Implications for height limits of mountain ranges, landscape response timescales, and research needs. Op. cit., p. 17665.

potencial entre en área de drenaje y la tasa de erosión local, que satisface la ley de potencial de la corriente “*stream power law*” (Howard et al., 1994<sup>308</sup>); el índice de concavidad  $\theta = 0,45$  es un valores estándar estimado de diversos estudios en sistemas fluviales que han demostrado la existencia de una relación matemática potencial entre la pendiente local y el área drenada (e.g. Flint, 1974<sup>309</sup>; Tarboton et al., 1989<sup>310</sup>; Wobus et al., 2006<sup>311</sup>; Snyder et al., 2000<sup>312</sup>). Finalmente las variables  $x_c$ ,  $L$  y  $z(L)$  y  $k_s$  son parámetros variables que se ajustan al perfil longitudinal.

Para reproducir el paleoperfil se realizó un trazado sobre un nivel base identificado en un perfil longitudinal, la proyección de este (líneas discontinuas en las siguientes figuras) se puede visualizar gracias a la ecuación con el fin de comparar los niveles bases proyectados con otros niveles bases existente en la dirección de flujo el antiguo cauce. Se compararon los niveles base de algunos afluentes ubicados al sur de la divisoria de aguas que separan las cuencas Lebrija y Chicamocha-Sogamoso con las cabeceras de otros afluentes situados sobre la ladera norte de la divisoria de aguas mencionada.

---

<sup>308</sup> HOWARD, Alan et al. Modeling fluvial erosion on regional to continental scales. Op. cit. WHIPPLE et al. Geomorphic limits to climate-induced increases in topographic relief. Op. cit. p. 40.

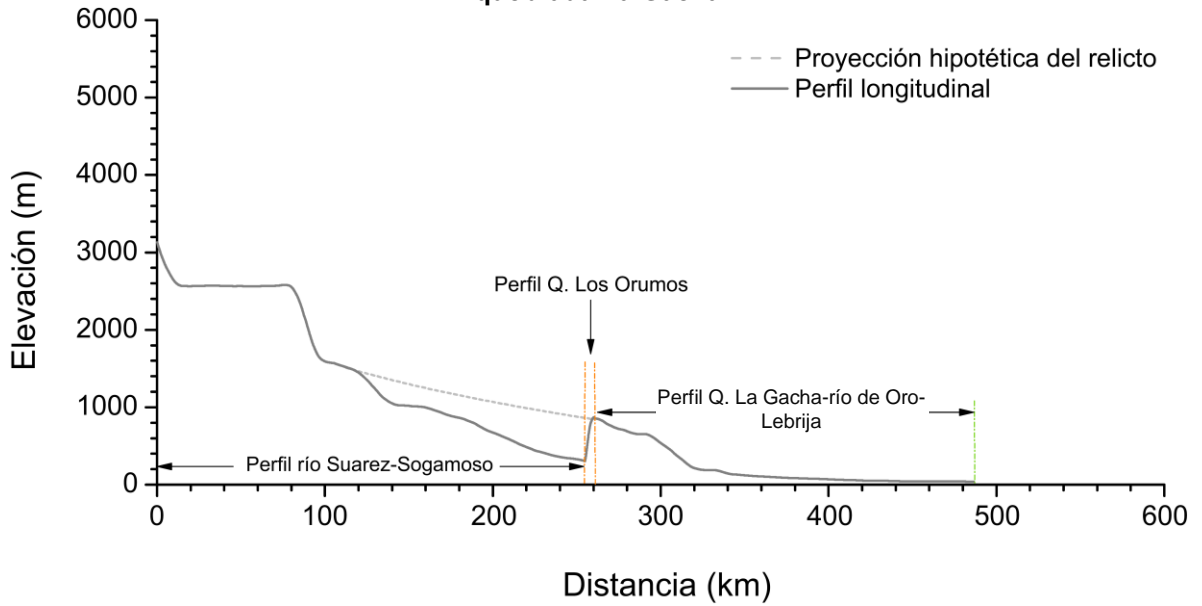
<sup>309</sup> FLINT, J. Op. cit. Citado por WHIPPLE. Fluvial landscape response time: How plausible is steady-state denudation? Op. cit. p.

<sup>310</sup> TARBOTON, et al. Op. cit. Citado por WHIPPLE. Fluvial landscape response time: How plausible is steady-state denudation? Op. cit., p. 319.

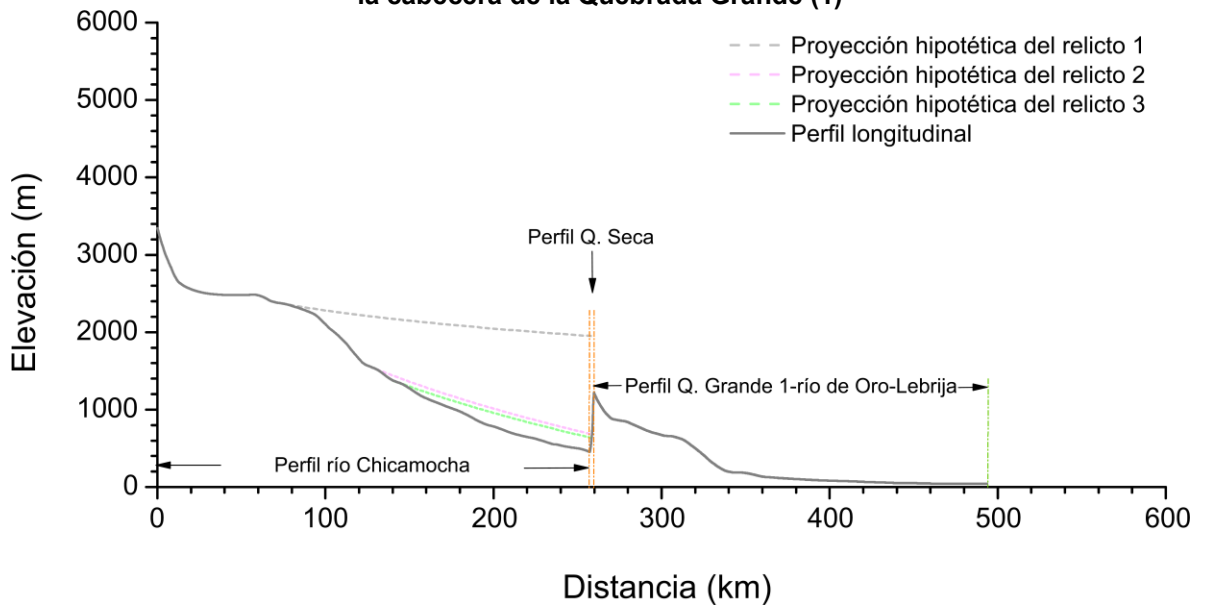
<sup>311</sup> WOBUS et al. Op. cit. p. 60, 67.

<sup>312</sup> SNYDER et al. Landscape response to tectonic forcing: Digital elevation model analysis of stream profiles in the Mendocino triple junction region, northern California. Op. cit., p. 1258.

**Figura 25. Proyección del paleocauce entre un nivel base del río Suarez y la cabecera de la quebrada La Gacha**



**Figura 26. Proyección de los paleocauces entre algunos niveles base del río Chicamocha y la cabecera de la Quebrada Grande (1)**

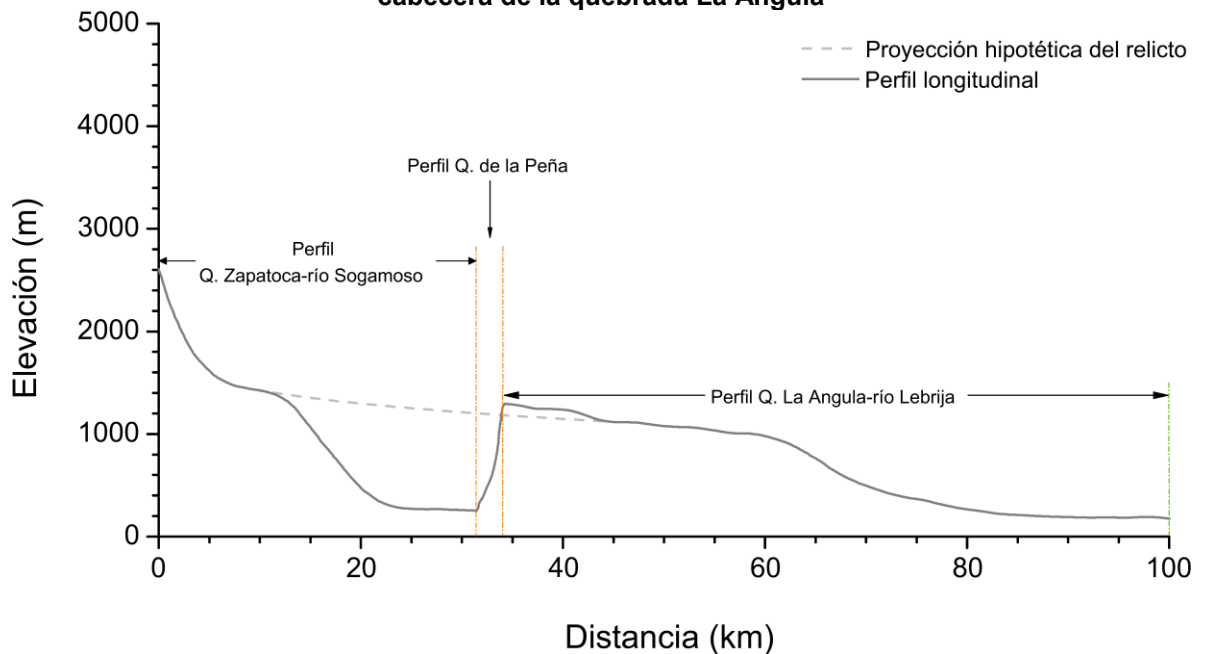


La proyección del paleoperfil del nivel base del Suárez (Figura 25) llega a otro extremo de la divisoria de aguas a una altura de 851 m, coincidiendo con una diferencia de pocos metros con la altura de la cabecera de la quebrada La Gacha

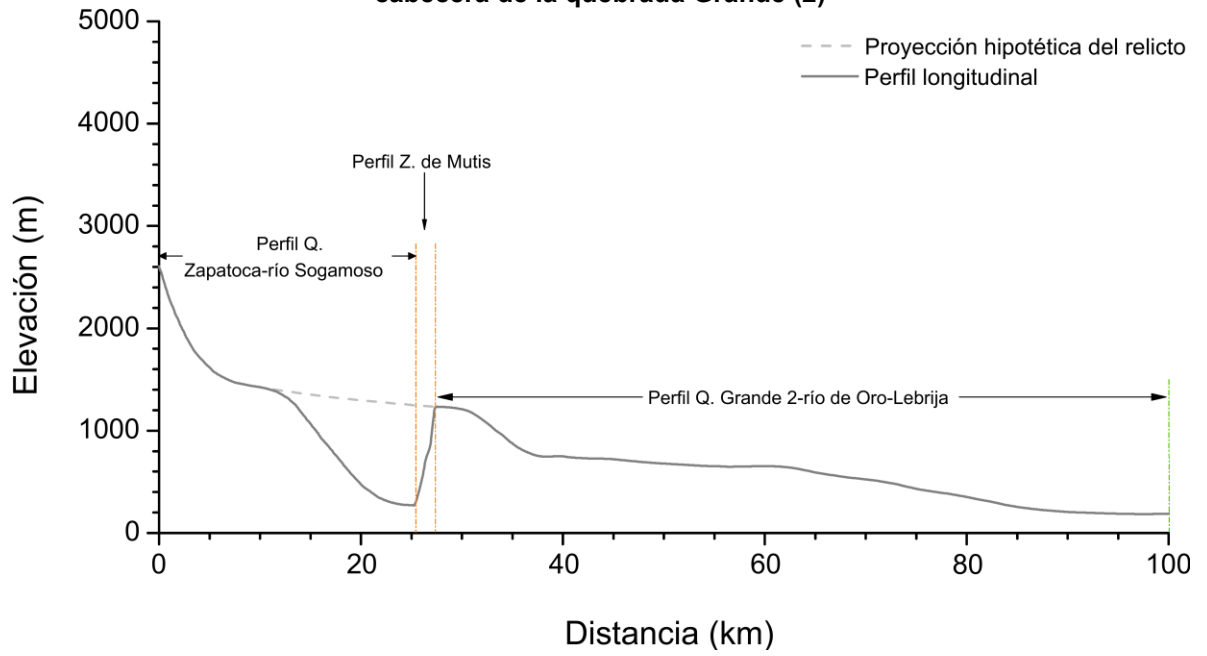
ubicada a 853 m de altura. Esta quebrada es uno de los afluentes de Río de oro que fluye en dirección N-S y confluye en el río de Oro. De otro lado, las proyecciones de paleoperfiles del río Chicamocha (Figura 26) demuestran que no encuentra ninguna alineación con algún otro nivel base cercano a la línea de la divisoria de aguas.

El perfil de la quebrada Zapatoca, afluente del río Sogamoso se proyectó hacia la cabecera de un afluente del río Lebrija, el paleoperfil llega a los 1125 m alineándose con gran parte del perfil fluvial de la quebrada la Angula a partir de una elevación de 1120 m de su cauce como se observa en la (Figura 27). A su vez, se hizo proyección con otro afluente de Lebrija, donde el paleoperfil se acerca a la cabecera de la quebrada Grande (2) a una elevación de 1234 m, con una diferencia mínima ya que el nacimiento de la quebrada Grande se encuentra a los 1233 m de altitud (Figura 28).

**Figura 27. Proyección de un paleocauce entre un nivel base de la quebrada Zapatoca y la cabecera de la quebrada La Angula**



**Figura 28. Proyección de un paleocauce entre un nivel base de la quebrada Zapatoca y la cabecera de la quebrada Grande (2)**



## **7. ANÁLISIS**

### **7.1 ANÁLISIS TOPOGRÁFICO**

#### **7.1.1 Distribución de la red de drenajes y estructuras tectónicas en la pendiente regional**

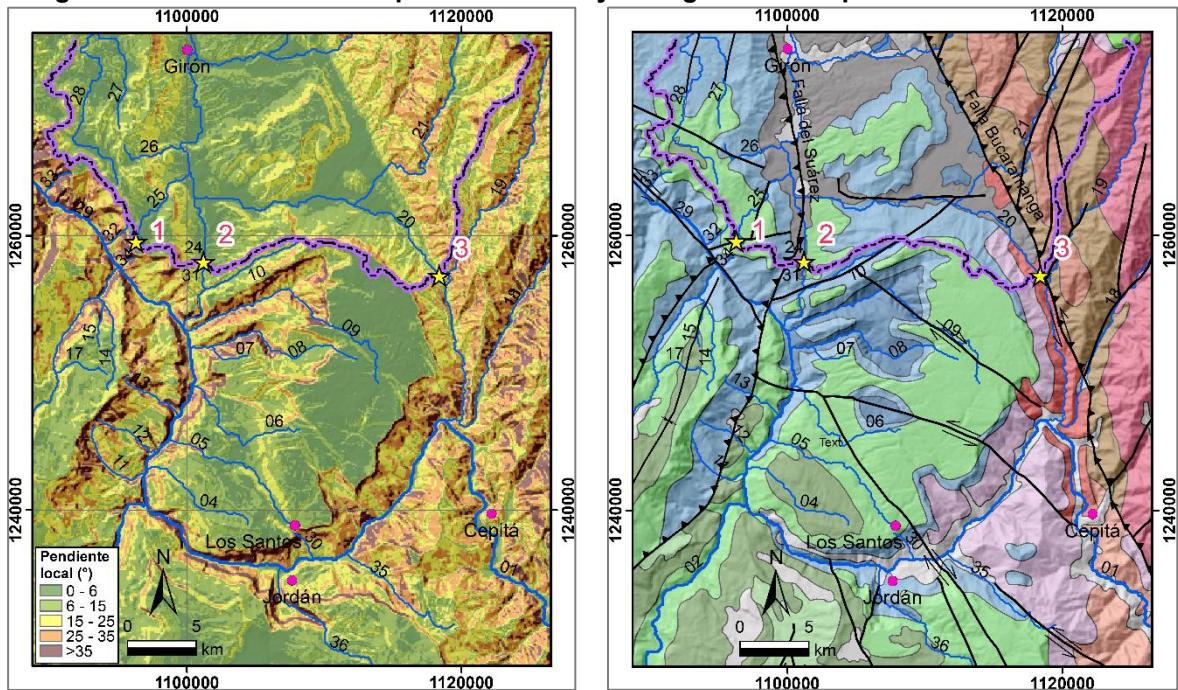
El comportamiento de la pendiente regional en la zona de estudio (Figura 18) se resume en tres rangos. La primera, pendientes regionales entre 0-6° conformadas por las Mesas de Lebrija y Bucaramanga: los patrones de drenaje exhibidos es paralelo a varias estructuras como anticlinales, sinclinales y la Falla del Suárez en dirección predominante N-S; en la Mesa de Bucaramanga solo el Río de Oro se encuentra alineado a esta dirección, los afluentes de este río fluyen perpendicular a la Falla del Suárez. La segunda, pendientes regionales entre 6-10° se observan en las laderas de la Mesa de los Santos y San Gil, los drenajes ubicados en esta zona tiene un patrón de drenaje transversal salvo el sector de las de la Mesa de Zapatoca, aunque presenta valores altos en la pendiente regional, el patrón de drenaje es longitudinal controlado por estructuras tectónicas como el Sinclinal de Zapatoca y la Falla del Suarez con dirección preferente N-S. La tercera, pendientes regionales entre 6-13° donde se encuentra las laderas de la Mesa de Zapatoca y Macizo de Santander se observa un patrón de drenaje transversal.

La ubicación de la Mesa de Zapatoca, un área pequeña cuya topografía oscila entre los 1400-1800 m con pendientes locales entre 0-15° que colinda con una estructura de mayor altitud llamada el Anticlinal de los Cobardes (1800-2800 m), posiblemente se vea afectada por reflejar valores altos en la pendiente regional.

### 7.1.2 Depresiones en la divisoria de aguas

El perfil de la divisoria de aguas que separa las cuencas Lebrija y Chicamocha-Sogamoso (Figura 19) muestra las depresiones 1, 2 y 3 que coinciden con las cabeceras de las quebradas Grande (2), La Gacha y Grande (1) respectivamente. Las quebradas mencionadas se encuentran dentro de la cuenca Lebrija, es decir hacia norte de la divisoria, la diferencia de altura entre las depresiones y las cabeceras mencionadas son menores a 23 m.

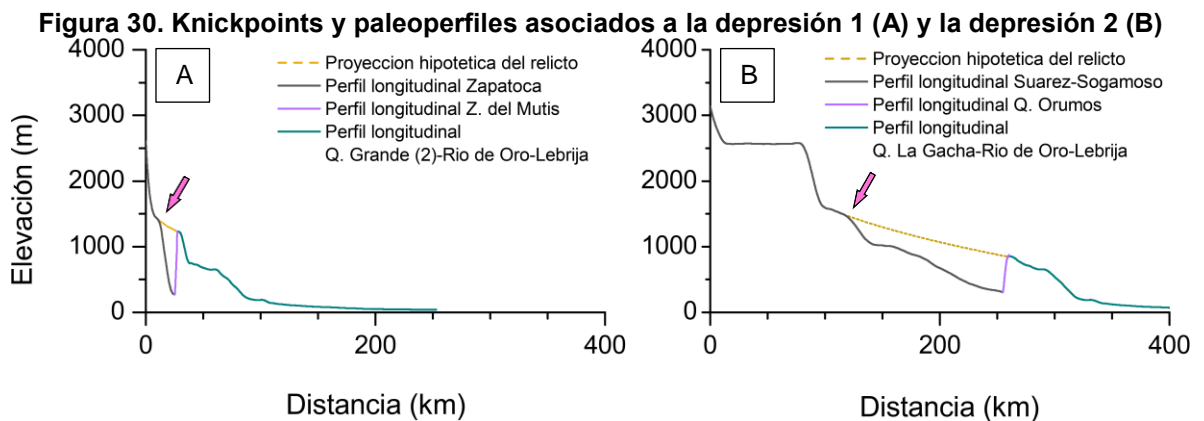
**Figura 29. Distribución de la pendiente local y litología en las depresiones en la divisoria**



Comparando las pendientes locales y la litología a cada lado de la divisoria (Figura 29): respecto a la primera, el área de dominio de la cuenca Lebrija predominan las pendiente entre 0-6° exceptuando las laderas de Macizo de Santander, en cambio el dominio de la cuenca Chicamocha-Sogamoso se imponen las pendientes entre 15 y >35° a excepción del sector de la Mesa de los Santos. En general se observa un contraste de pendiente a lado y lado de la divisoria de aguas, donde la pendiente baja predomina al N y las pendientes más marcadas se observa al S. Lo

concerniente a la litología se observa que la depresión 1 se ubica sobre Kbeh (Formación Tambor), el segundo sobre TQ (Formación Bucaramanga) y el tercero sobre Jgp (Granito de Pescadero); estas ubicaciones no muestran ningún patrón litológico en la en las depresiones.

Las diferencias entre la altitud de la depresión y la elevación promedio para la depresión 1 es de 86 m, las depresiones 2 y 3 se encuentran a una altura mayor a 316 y 416 m respectivamente, además las proyecciones de las paleocorrientes se ajustaron a las dos primeras depresiones (Figura 25 y Figura 28). Relacionando las paleocorrientes y las depresiones con los *knickpoints* anteriormente observados, se aprecia una asociación con los puntos de quiebre identificados (flecha color rosado) para los perfiles de la quebrada Zapatoca (Figura 30, A) y el río Suárez (Figura 30, B).



Finalmente, estas depresiones en la divisoria se podrían identificar como *wind gaps*; para ser consideradas como tal la anchura de su valle no se relacionaría con el área actual de la cuenca aguas arriba, sugiriendo que fue formado por un río antiguo que pertenecía en un pasado a un área de drenaje más grande (Struth, 2016)<sup>313</sup>. Aunque es claro que dichas depresiones siguen la dirección preferente de los ríos

<sup>313</sup> STRUTH. Op cit., p.29.

principales N-S uniendo las cuencas Lebrija y Chicamocha-Sogamoso, aludiendo que la zona de estudio estuvo conectada.

De otro lado, la depresión 1 se encuentra cerca de la Falla del Suárez y la depresión 2 contigua a la Falla Bucaramanga. El área de estudio, al tratarse de una misma zona morfotectónica cuya actividad en las estructuras es negligible, no afectará los resultados obtenidos ya que estos obedecen a patrones fluviales mismos o a cambios litológicos.

### 7.1.3 Identificación de evidencias geomorfológicas

En la zona de estudio el río Chicamocha inicia con una dirección NW el rumbo de la Falla Bucaramanga, al llegar a las inmediaciones del corregimiento el Pescadero del Municipio de Piedecuesta el Chicamocha cambia su dirección en un ángulo agudo ( $<90^\circ$ ) tomando un rumbo SW, se desplaza por una curvatura hasta llegar a la confluencia con el río Suárez. De otra parte, el río Suárez discurre en dirección de la Falla del Suárez, confluye en el río Sogamoso y abandona la falla cambiando el rumbo del cauce en aproximadamente  $90^\circ$  fluyendo en dirección NW.

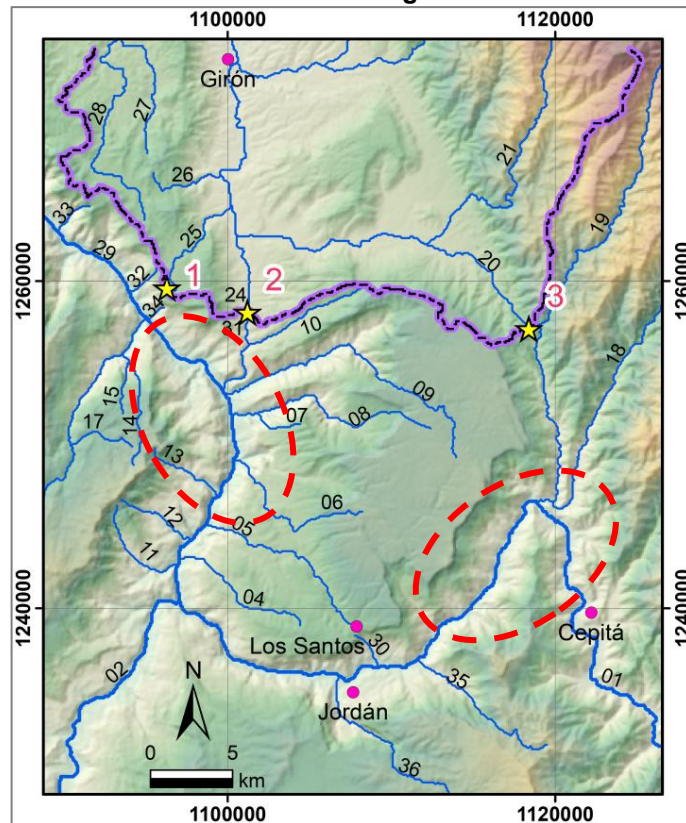
Anteriormente se identificaron las depresiones como *wind gaps*, valles donde fluía un cauce antiguo antes de ser capturado. Además, se observan unos extraños rumbos que toman los trayectos de los ríos Chicamocha y Suarez, estos cambios se puede atribuir a *elbows* o codos de captura (marcados en línea roja discontinua en la Figura 31), caracterizados por cambios bruscos en la dirección del canal (Haworth y Ollier, 1992<sup>314</sup>; Taylor, 1991<sup>315</sup>).

---

<sup>314</sup> HAWORTH, R. J.; OLLIER, C. D. Continental rifting and drainage reversal: the Clarence River of eastern Australia. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1992, vol. 17, no 4, p. 387-397. Citado por BISHOP. Drainage rearrangement by river capture, beheading and diversion. *Op. cit.*, p. 458.

<sup>315</sup> TAYLOR, T. G. A discussion of the salient features in the physiography of eastern Australia: Commonwealth Bur. Meteorology Bull, 1911, vol. 8, no 18, p. 77-95. Citado por BISHOP. Drainage rearrangement by river capture, beheading and diversion. *Op. cit.*, p. 458.

**Figura 31. Ubicación de codos de capturas y depresiones que afectan al trazado fluvial Chicamocha-Sogamoso**



## 7.2 ANÁLISIS FLUVIAL

### 7.2.1 Distribución y comportamiento de los knickpoints en el área de estudio

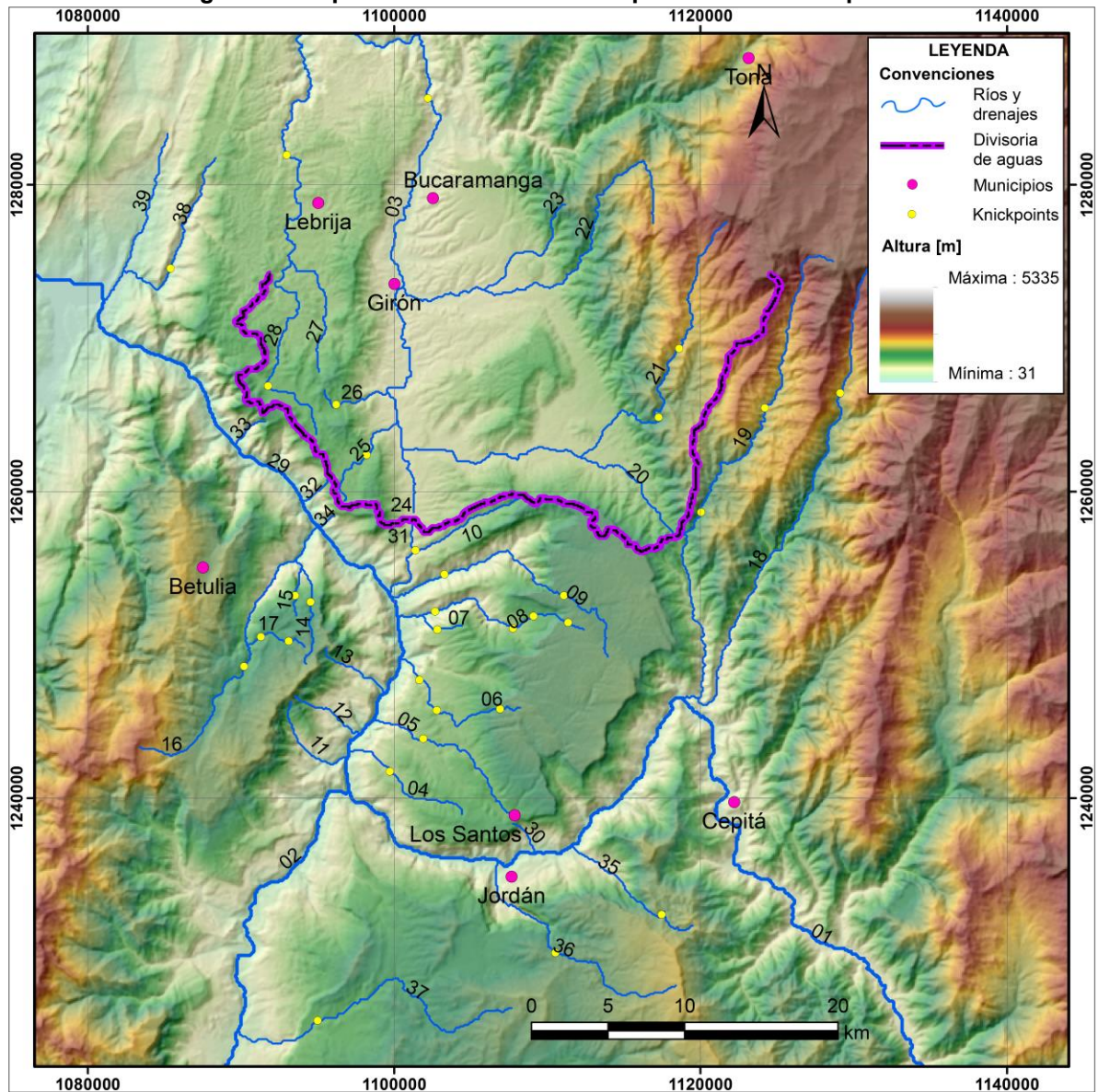
La Figura 32 muestra la ubicación de los *knickpoints* sobre los afluentes (puntos amarillos), estos se concentran principalmente en la mesa de los Santos sobre las quebradas que se dirigen en dirección preferente E-W, incluso se tiene pocos afluentes con tres y hasta cuatro punto de quiebre en la pendiente identificados. Otro sitio donde se observa una concentración considerable de *knickpoints* es en la Mesa de Zapatoca, mientras en la Mesa de Lebrija y de San Gil se encuentran más dispersos. En la Mesa de Bucaramanga no refleja *knickpoints* sobre su área, sin embargo se localizan muy pocos sobre uno de sus afluentes.

Algo interesante por apreciar es la gran cantidad de *knickpoints* se encuentran bajo el dominio de la cuenca Sogamoso en los afluentes de largo recorrido en sentido S-N y E-W, al contrario de lo observado en los afluentes de dirección preferente N-S y W-E donde casi no se localizan *knickpoints*. Lo anterior podría corresponder que la cuenca del Chicamocha-Sogamoso tiene un mayor potencial erosivo relativo comparado con la cuenca Lebrija, esto se puede apreciar en los encajonamientos de los ríos Chicamocha, Suárez y Sogamoso en el terreno, exponiendo una diferencia de altura cercana superior a los 713 m; sin embargo la cuenca Lebrija posee un menor potencial erosivo debido a una menor incisión de los ríos Lebrija y Río de Oro sobre la Mesas de Bucaramanga y de Lebrija con una diferencia de alturas menor a los 390 m aproximadamente (Tabla 9).

**Tabla 11. Knickpoints de los afluentes identificados en la zona de estudio**

Kp	COORDENADAS		ELEVACIÓN	AFLUENTE	DIRECCIÓN EN EL PUNTO DE CONFLUENCIA	CONFLUENCIA
	X	Y				
1	1.102.209	1.285.644	639	03	S-N	Río Lebrija
2	1.099.714	1.241.746	1.008	04	E-W	Río Sogamoso
3	1.101.886	1.243.872	1.109	05	E-W	Río Sogamoso
4	1.106.922	1.245.812	1.572	06	E-W	Río Sogamoso
5	1.102.763	1.245.720	1.103	06	E-W	Río Sogamoso
6	1.101.654	1.247.707	981	06	E-W	Río Sogamoso
7	1.102.810	1.250.988	1.077	07	E-W	Río Sogamoso
8	1.111.358	1.251.450	1.628	08	E-W	Río Sogamoso
9	1.109.094	1.251.866	1.262	08	E-W	Río Sogamoso
10	1.107.754	1.251.080	1.031	08	E-W	Río Sogamoso
11	1.102.671	1.252.189	550	08	E-W	Río Sogamoso
12	1.111.081	1.253.206	1.599	09	E-W	Río Sogamoso
13	1.103.272	1.254.592	479	09	E-W	Río Sogamoso
14	1.101.377	1.256.163	849	10	E-W	Río Sogamoso
15	1.094.538	1.252.790	1.474	14	S-N	Río Sogamoso
16	1.093.522	1.253.206	1.382	15	S-N	Río Sogamoso
17	1.090.195	1.248.585	1.399	16	S-N	Río Sogamoso
18	1.093.106	1.250.248	1.544	17	S-N	Río Sogamoso
19	1.091.304	1.250.526	1.427	17	S-N	Río Sogamoso
20	1.129.102	1.266.421	2.070	18	E-W	Río Chicamocha
21	1.124.204	1.265.451	1.995	19	E-W	Río Chicamocha
22	1.120.045	1.258.658	1.500	19	E-W	Río Chicamocha
23	1.118.613	1.269.332	2.077	21	E-W	Río de Oro
24	1.117.273	1.264.850	1.530	21	E-W	Río de Oro
25	1.098.189	1.262.401	1.194	25	W-E	Río de Oro
26	1.096.202	1.265.682	1.269	26	W-E	Río de Oro
27	1.091.766	1.266.883	1.233	28	S-N	Río Lebrija
28	1.092.967	1.281.947	954	28	S-N	Río Lebrija
29	1.117.458	1.232.412	1.767	35	N-S	Río Chicamocha
30	1.110.526	1.229.917	1.591	36	N-S	Río Chicamocha
31	1.095.000	1.225.481	1.250	37	E-W	Río Suarez
32	1.085.389	1.274.554	484	38	N-S	Río Sogamoso

Figura 32. Representación de los knickpoints en vista de planta



Relacionando los *knickpoints* con la litología (Figura 33) se puede visualizar que gran parte de ellos se encuentra sobre las unidades del Cretácico Kbeh (Formaciones Tambor y Rosa Blanca) y Kbal (Formación Paja), especialmente sobre el sector de la Mesas de Los Santos donde sus afluentes presentan varios por perfil; también se aprecia algunos *knickpoints* en rocas jurásicas Jim (Formación Jordán) y Js (Formación Girón). En la Mesa de Lebrija y Mesa de San Gil se ubican algunos sobre rocas del Cretácico y del Jurásico mencionada, mientras que en la

Mesa de Zapatoca solo se sitúan en rocas cretácicas. Pocos *knickpoints* se localizan en litologías ígneo-metamórficas como Pzs (Formación Silgará), PEpa (Ortoneis de Berlin), PEm (Complejo Bucaramanga), Jcg (Cuarzomonzonita de la Corcova) y Jcs (Cuarzomonzonita de Santa Bárbara), esto se manifiesta en el sector E de la zona de estudio. Al parecer, los *knickpoints* de la Mesa de los Santos, Lebrija y San Gil están sometidos a control litológico ya que gran parte de ellos se sitúan en zonas aledañas a los contactos geológicos o sobre los mismos (Hack, 1973)<sup>316</sup> entre las unidades Kbeh y Kbal.

El mapa geológico ilustra que pocos *knickpoints* se ubican sobre fallas normales al E de la Falla Bucaramanga, de este grupo la mayoría se encuentran en litologías ígneo-metamórficas en el Macizo de Santander; también, al W de esta misma falla se localizan escasos *knickpoints* sobre fallas normales y fallas de rumbo que a su vez coinciden con contactos litológicos. De otro lado, al parecer se muestra una alineación de varios *knickpoints* de la Mesa de los Santos con la Falla del Suárez y los *knickpoints* de la Mesa de Zapatoca tratan de alinearse al eje del Sinclinal de Zapatoca (trazo discontinuo color rojo en la Figura 34), ambas estructuras son paralelas con dirección preferente N-S sugiriendo un control estructural de los *knickpoints* en dicho sector.

El comportamiento de los *knickpoints* (puntos anaranjados) sobre la pendiente regional (Figura 34) ilustra una tendencia a establecerse en lugares con pendientes regionales igual o mayor a 7°, gran parte de ellos se localizan sobre zonas de ladera y algunos en límites de ladera, especialmente los *knickpoints* que se encuentra hacia el sur de la divisoria de aguas que dividen las cuencas Lebrija y Chicamocha-Sogamoso.

---

<sup>316</sup> HACK, John. Stream-profile analysis and stream-gradient index. Journal of Research of the US Geological Survey, 1973, vol. 1, no 4, p. 421-429. Citado por CASTILLO y LUGO-HUBP. Op. cit., p. 358.

Figura 33. Relación de los knickpoints con la litología y estructuras tectónicas

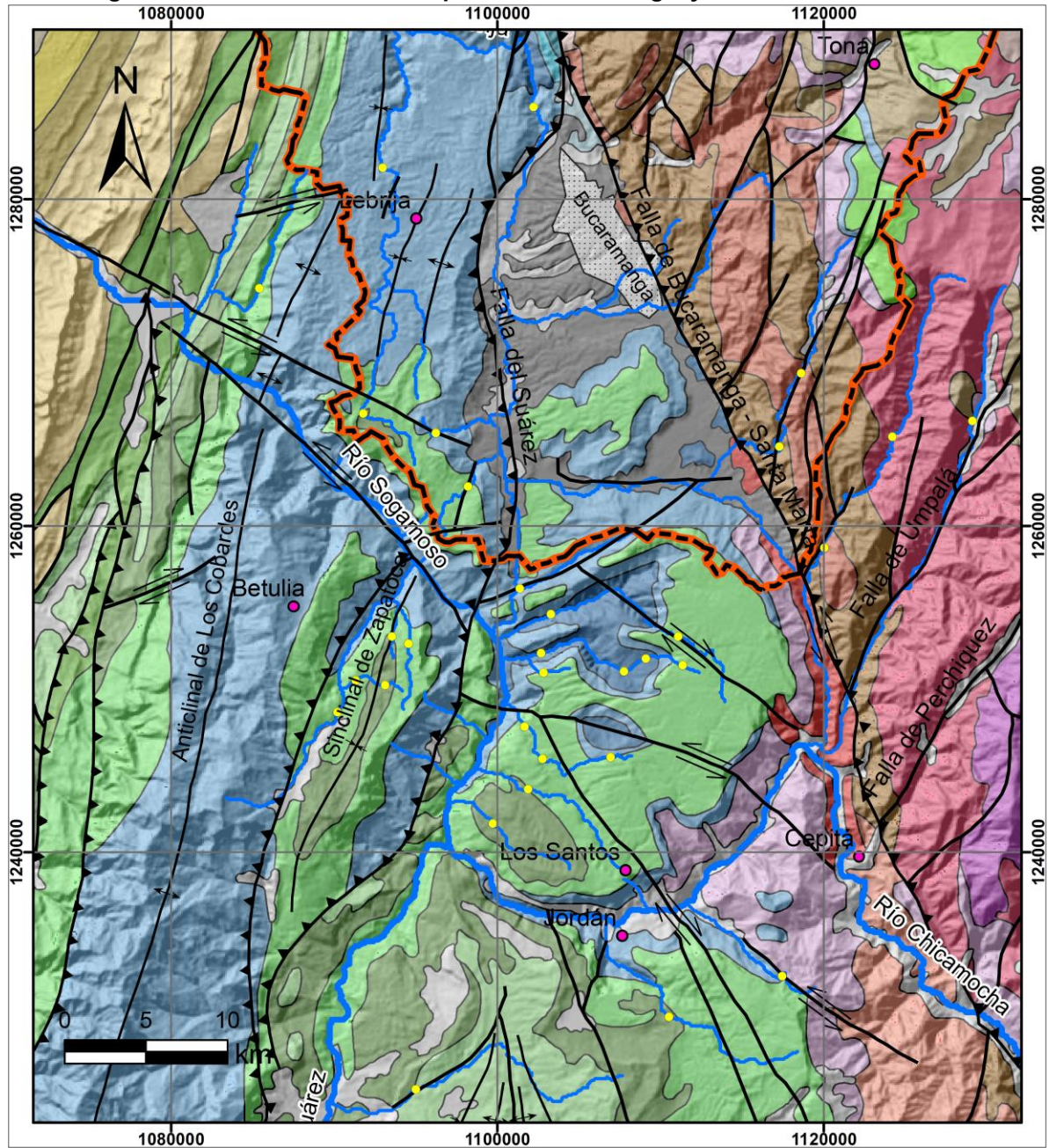
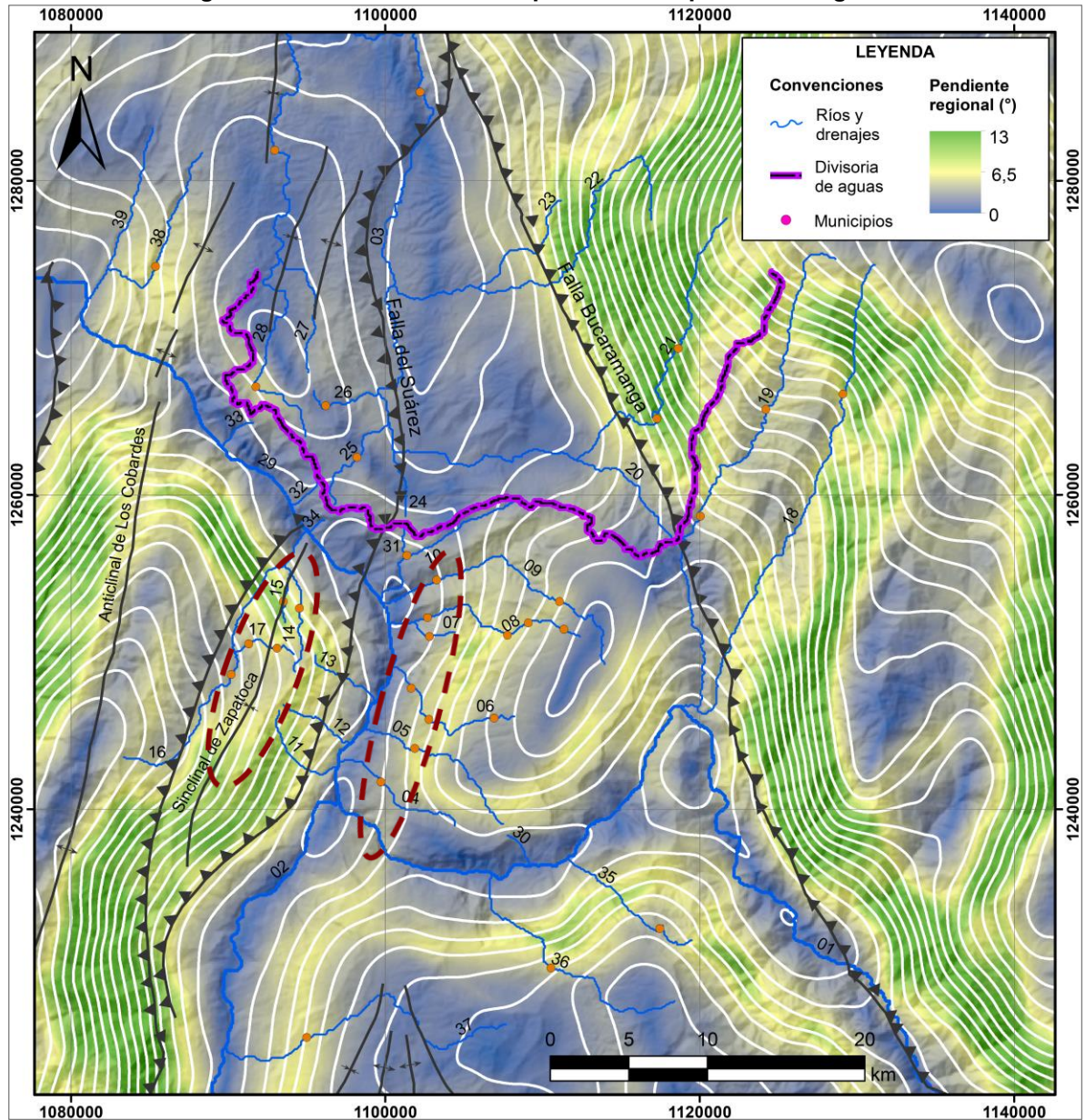


Figura 34. Relación de los knicpoints con la pendiente regional



Contemplando la precipitación promedio anual (Figura 15) es difícil de establecer una relación con los *knickpoints*, el área de estudio se encuentra a una tasa de precipitación anual promedio entre 501 y 2000 mm, pero el sector dominado por los *knickpoints* presenta tasas de precipitación entre 501-1000 mm, es un intervalo pequeño para comparar un dominio de esta variable. Comparando la distribución espacial de los *knickpoints* con el mapa de clasificación climática (Figura 16) no se

visualiza relación alguna, ya que los *knickpoints* se sitúan en varias zonas climáticas; sin embargo se observa que la zona de las mesas se encuentran dominadas por un clima Templado Semiárido a Templado Semihúmedo y que los valles de los cauces principales se clasifican entre las zonas climáticas Cálido Árido a Cálido Semiárido, exponiendo su clima más árido en el tramo del cauce del río Chicamocha entre los alrededores del municipio de Cepitá y el municipio de Jordán.

### **7.2.2 Perfiles fluviales y paleoperfiles asociados a la plataforma de las Mesas**

Desde el punto de vista de perfil los *knickpoints* de la cuenca Sogamoso (Figura 35) se concentran en los afluentes de la mesa de los Santos, presentan varios quiebres de pendiente a diversas elevaciones, habitualmente son los perfiles que tiene más *knickpoints* por afluente; el segundo grupo de perfiles en tener más número de *knickpoints* son las quebradas que se encuentran sobre la Mesa de Zapatoca. En general, hay una tendencia de desarrollo de *knickpoints* en los drenajes que fluyen de S-N y de E-W, mientras que los drenajes que discurren en sentido N-S y W-E no tiene presencia de puntos de quiebre en sus perfiles, menos el afluente 38 que es la excepción. También, se visualiza que los perfiles de orientación S-N poseen pocos *knickpoints* aproximadamente uno por afluente, salvo el afluente 17 que tiene dos puntos de quiebre pero sus diferencias de altura es minúscula (aproximadamente 140 m).

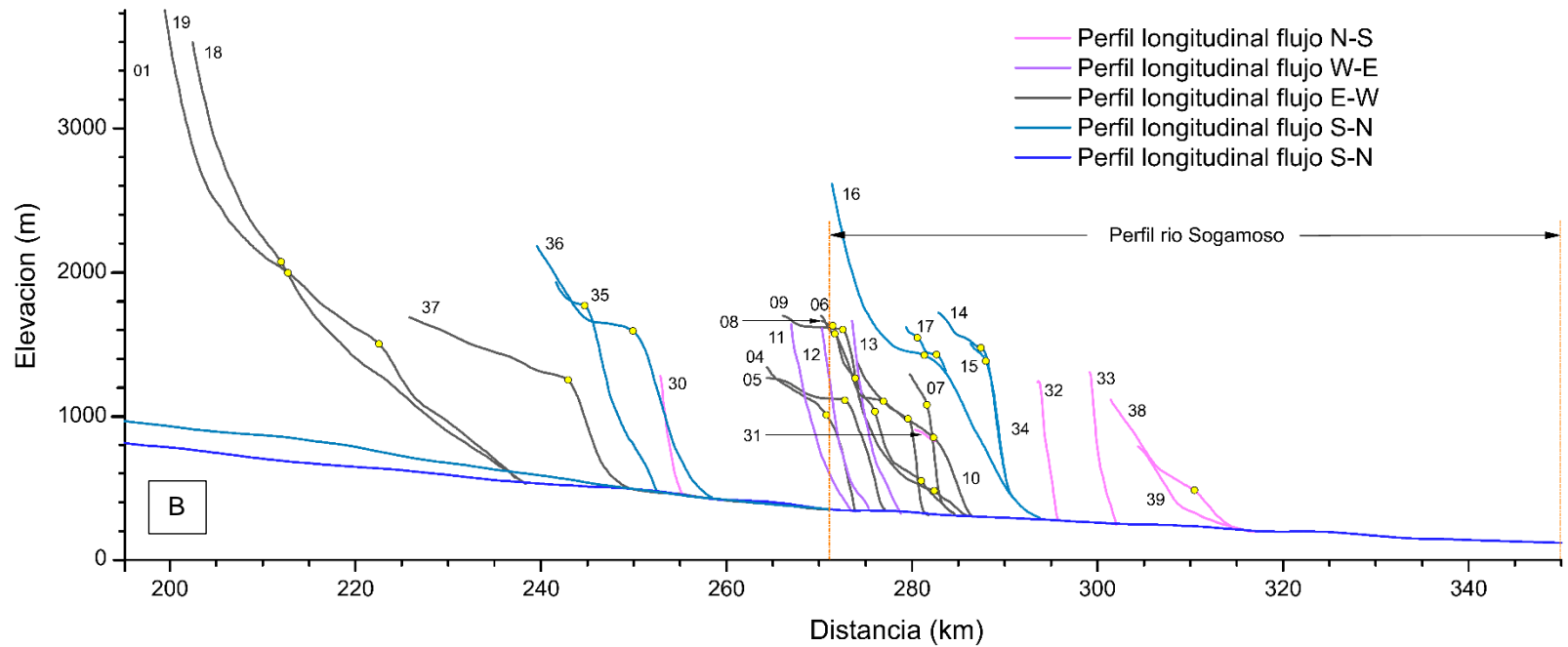
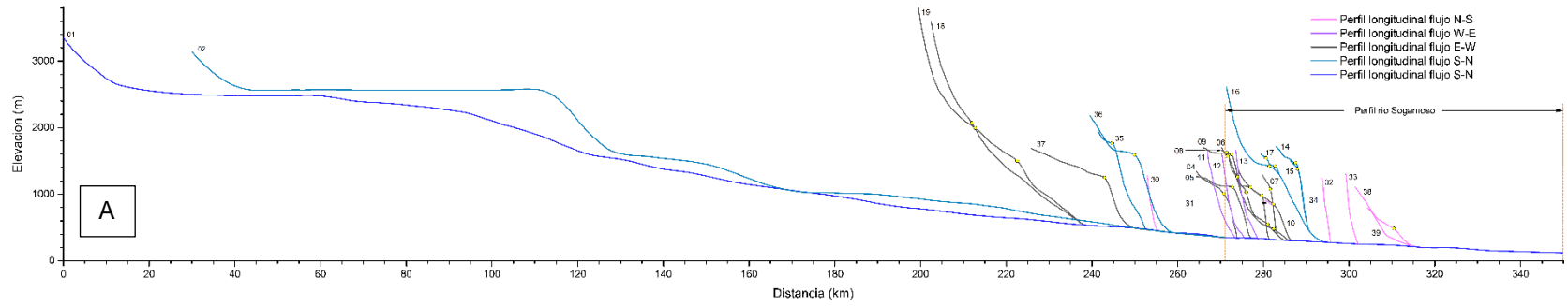
En el perfil de la cuenca Lebrija (Figura 36) la mayoría de afluentes que discurren en dirección S-N y W-E tienen puntos de quiebre excepto los afluentes 24 y 27, los que se dirigen con rumbo E-W no se observan *knickpoints* salvo el afluente 21, la elevación de sus *knickpoints* de este último no se encuentran relacionadas con los demás quiebres de pendiente de los perfiles de la cuenca. Se divisa una trayectoria inclinada sobre el lecho de río de Oro, de igual manera se observa una pendiente similar en el trazado de los afluentes 27 y 28, indicando que hay una inclinación hacia el N de las Mesas de Lebrija y de Bucaramanga.

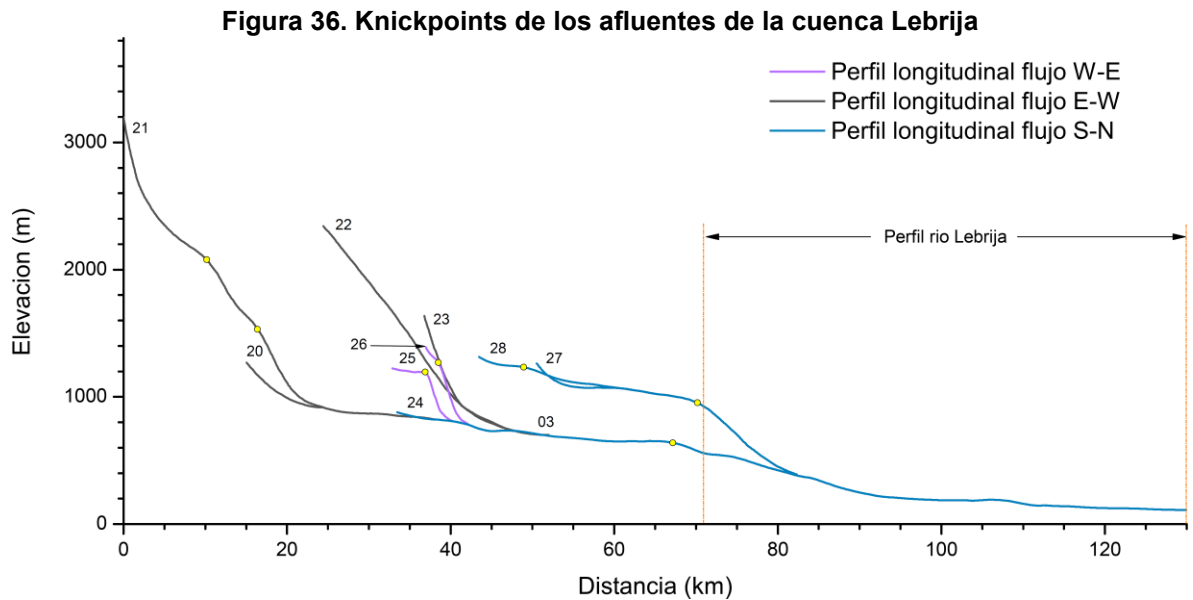
Los afluentes 11, 12 y 13 situados al borde E de la Mesa de Zapatoca nacen entre los 1635-1659 m, estas elevaciones son equiparables con el grupo de *knickpoints* más elevados de los afluentes 06, 08 y 09 ubicados próximos al borde W de la plataforma en la Mesa de Los Santos, cuya altitud oscila entre 1572-1628 m; de otro lado, se muestra un conjunto de *knickpoints* de los afluentes 14, 15, 16 y 17 correspondiente a la cuenca Sogamoso con un rango de alturas entre 1382-1474 m, comparables con la elevación de los nacimientos de los afluentes 26, 27 y 28 de la cuenca Lebrija en la Mesa de Lebrija entre los 1288-1394 m.

Por otra parte, la proyección de paleoperfiles apuntan a lo siguiente: el paleocauce de la quebrada Zapatoca se acerca a la quebrada La Angula y se ajusta muy bien a un tramo de su cauce con una diferencia en altura de 5 m (Figura 27), igualmente se aproxima a la cabecera de la quebrada Grande (2) con una diferencia mínima de 1 m (Figura 28), la representación del paleoperfil muestra que la Mesa de Zapatoca estuvo comunicada con la Mesa de Lebrija; el paleocauce del río Suárez con la cabecera de la quebrada La Gacha coincide casi a la misma altura con una diferencia de 4 m (Figura 25), esta es una evidencia que el paleoperfil recreado corresponde al antiguo cauce del Suarez que fluía con rumbo S-N direccionado por la Falla del Suarez y alcanzaba al sector de la Mesa de Bucaramanga.

La proyección del paleoperfil del río Chicamocha alineado a la Falla de Bucaramanga no encajó en algún perfil fluvial situado sobre la Mesa de Bucaramanga (Figura 26). El perfil de este río tiene un aspecto muy erosionado (Figura 23), no se identifican trayectos claramente definidos que permita tener un mejor ajuste de la proyección de los cauces antiguos. Sin embargo, la obtención de estos resultados no indica la inexistencia del paleocauce en cuestión, es posible que la evidencia de este en el perfil del Chicamocha haya sido borrada por la erosión remontante.

Figura 35. Knickpoints de los afluentes de la cuenca Sogamoso (A) y vista ampliada (B)





Las similitudes en alturas topográficas y de algunos cauces en la zona de las Mesas aluden a una antigua plataforma actualmente fragmentada. Además, se suma los cauces de los afluentes que discurren con rumbo S-N son los menos erodados, describiendo perfiles con pocos puntos de quiebre de pendiente y lejanos de establecer su equilibrio, sugiriendo la preservación de tramos de cauces antiguos que estuvieron comunicando las zonas de las mesas fluyendo en sentido S-N.

## 7.3 REORGANIZACIÓN DE LA RED DE DRENAJE

### 7.3.1 Disposición del patrón de drenaje

Como la zona de estudio no puede apreciar bien la distribución de la red de drenajes en sectores como la Mesa de San Gil y en estructuras como el Anticlinal de los Cobardes, se apoyará en la Figura 37 que amplía un poco el área y expone más cauces fluviales para esclarecer si existe un patrón definido.

### 7.3.1.1 Características de los drenajes longitudinales

La Figura 13 ilustra la disposición de los ríos principales en la zona de estudio, estos se encuentran alineados a fallas principales con algunos cambios bruscos de dirección que abandonan el rumbo de dichas fallas, inciden sobre litologías muy variadas: rocas metamórficas del Paleozoico, ígneas del Jurásico, unidades sedimentarias del Jurásico, Cretácico, Paleógeno y Neógeno incluyendo depósitos Cuaternarios, excepto el río Suárez que recorre sólo litologías sedimentarias del Cuaternario desde su cabecera hasta su cambio de rumbo hacia el NW posterior a la confluencia con el río Sogamoso; en la zona de estudio el río Suárez recorre sus aguas sobre algunos depósitos aluviales, incidiendo especialmente las litologías de las Formaciones Rosa Blanca y Tambor.

Respecto a los afluentes que discurren paralelos a las estructuras tectónicas de la zona de las mesas, la quebrada Zapatoca discurre sobre el Sinclinal de Zapatoca. De acuerdo al mapa de la Figura 13 su cauce incide sobre la unidad Kbeh asociada con las Formaciones Los Santos (Tambor) y Rosa Blanca; en los Mapa Geológico de Cuadrángulo H-12 Bucaramanga (INGEOMINAS, 1997)<sup>317</sup> y Geología de la Plancha 120 Bucaramanga (INGEOMINAS, 1997)<sup>318</sup> ambos a escala 1:100.000, se aprecia que la mayoría del cauce de la quebrada reposa sobre la Formación Paja, es decir sobre la litología más blanda que aflora en el sinclinal.

La estructura más grande de la zona de estudio es el Anticlinal de los Cobardes, ligeramente asimétrica, con una longitud de 80 km aproximadamente, su eje axial se acerca a un rumbo N10°E, más inclinado en su flanco E, cabeceo hacia el S con cierre periclinal y truncado al NE por la Falla Bucaramanga-Santa Marta; además su núcleo lo conforma principalmente la Formación Girón (Royero y Clavijo,

---

<sup>317</sup> COLOMBIA. INGEOMINAS. Mapa Geológico del Cuadrángulo H-12, Bucaramanga. Escala 1:100.000. WARD, Dwight et al. con colaboración del: U.S.GEOLOGICAL SURVEY (Convenio 514-L-030 de la A.I.D.). 1997. Versión digital 2000.

<sup>318</sup> COLOMBIA. INGEOMINAS. Geología de la Plancha 120 Bucaramanga. Op. cit.

2001)<sup>319</sup>. Al norte del río Sogamoso, en la Mesa de Lebrija donde reposa la parte N del anticlinal, se encuentra una superficie casi plana que no registra rastros topográficos de la estructura mencionada. De acuerdo con Royero y Clavijo (2001)<sup>320</sup> las unidades más antiguas se encuentran al extremo NE, posiblemente dicha litología sea la más blanda expuesta en superficie del anticlinal que permitió lograr su actual topografía con una baja pendiente regional (0-6°). Sin embargo, se observan pequeñas estructuras de anticlinales y sinclinales menores con dirección predominante N-S y las quebradas La Puentana y La Angula, afluentes longitudinales que fluyen paralelo a estas estructuras en dirección S-N para confluir en el río Lebrija.

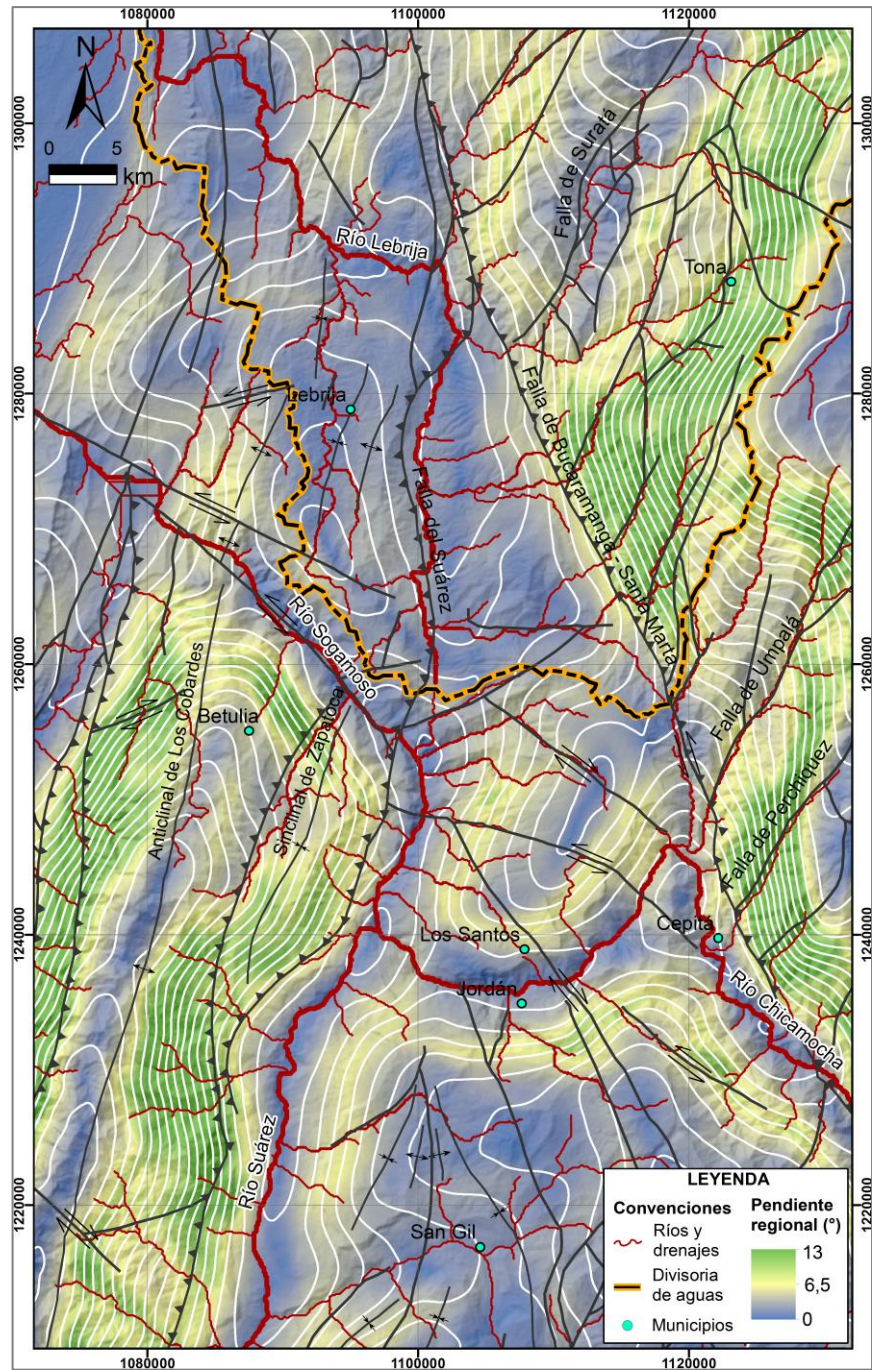
Hacia el sur del río Sogamoso, el Anticlinal de los Cobardes es incidido longitudinalmente por el río Chucurí y sus afluentes la quebrada El Ramo cuyo nacimiento se sitúa al E del Municipio de San Vicente de Chucurí y la quebrada La Ramera localizada al W y SW del municipio de Betulia; todos estos afluentes discurren en dirección S-N. El río Chucurí fluye sobre un depósito aluvial donde la mayor longitud de su cauce reposa sobre rocas de las Formaciones Umir y Simití, la quebrada El Ramo fluye gran parte de su cauce cerca al contacto litológico entre las Formaciones Tambor y Rosa Blanca, en medio de estos dos afluentes se ubica una estructura de sinclinal menor cuyo eje axial es de dirección predominante N-S. La quebrada La Ramera discurre por la Formación Girón alineándose al eje del Anticlinal de los Cobardes, también con eje axial de dirección predominante N-S.

---

<sup>319</sup> ROYERO Y CLAVIJO. Op. cit., p. 51.

<sup>320</sup> *Ibíd.*, p. 51.

Figura 37. Pendiente regional, estructuras tectónicas y drenajes para área de estudio extendida



Otra estructura importante es el Sinclinal de Nuevo Mundo ubicado al W del piedemonte de la Cordillera Oriental y al W de la región de las Mesas y del Anticinal de los Cobardes. En el sector NE del Valle Medio del Magdalena, este sinclinal tiene

una estructura con c. 60 m de longitud y c. 25 m de amplitud con inmersión hacia el N (Caballero *et al.*, 2013)<sup>321</sup>. Mirando los mapas de (INGEOMINAS, 1997<sup>322</sup>; INGEOMINAS, 1997<sup>323</sup>) en el flanco E se ubica los afluentes la quebrada Pujomanes y la quebrada Agua Buena que discurren en dirección predominante N-S, el primero se sitúa sobre los contactos de las Formaciones Tambor y Rosa Blanca, el segundo fluye principalmente sobre unos depósitos cuaternarios, al parecer cerca del contacto de las Formaciones La Luna y Simití. Cabe señalar que el rumbo de las capas donde se sitúan los afluentes mencionados tiene un rumbo predominante N-S.

Parte del cauce del Río de Oro localizado en la Mesa de Bucaramanga fluye con rumbo S-N sobre un extenso depósito aluvial limitado al W por la Mesa de Lebrija y hacia el E se encuentra un vasto depósito Cuaternario de la Mesa de Bucaramanga, la Falla del Suárez es la responsable de encauzar este río.

Relacionando las incidencias de los ríos principales y afluentes longitudinales sobre la litología, se observa que hay una gran frecuencia sobre las Formaciones Rosa Blanca y Tambor como se contempló en el Sinclinal de Nuevo Mundo, en el Anticlinal de los Cobardes y en el río Suárez, es posible considerar que este comportamiento en el sector W y SW del área de estudio. No obstante la dirección de las estructuras tectónicas principales desarrolla un rol importante en el encauzamiento de los ríos principales y afluentes longitudinales: el río Suárez se alinea al Sinclinal Chiquinquirá-San José de Pare y del Anticlinal Los Cobardes, posteriormente toma una dirección SW-NE siguiendo a la Falla del Suárez; el río Chicamocha cerca de su nacimiento sigue la dirección SW-NE de la Falla Soapaga y cambia a una dirección SE-NW en ángulo obtuso ( $>90^\circ$ ) para seguir a la Falla Bucaramanga hasta llegar a las inmediaciones del corregimiento de Pescadero; el

---

<sup>321</sup> CABALLERO, Víctor et al. Tectonic controls on sedimentation in an intermontane hinterland basin adjacent to inversion structures: The Nuevo Mundo syncline, Middle Magdalena Valley, Colombia. Geological Society, London, Special Publications, May 16, 2013, vol. 377, no 1, p. 315-342. Available from internet: <<http://sp.lyellcollection.org/content/377/1/315.short>>.

<sup>322</sup> COLOMBIA. INGEOMINAS. Mapa Geológico del Cuadrángulo H-12, Bucaramanga. Op cit.

<sup>323</sup> COLOMBIA. INGEOMINAS. Geología de la Plancha 120 Bucaramanga. Op. cit.

río de Oro se encauza a la Falla Bucaramanga después de discurrir por la Mesa de Bucaramanga, tomando un rumbo S-N hasta alcanzar el corregimiento Bocas. Teniendo en cuenta lo anterior se puede decir que los ríos principales y afluentes longitudinales están sometidos a un control de la distribución de las estructuras tectónicas (fallas principales, anticlinales, sinclinales, rumbos de capas) derivadas de la formación del orógeno en inversión (Cordillera Oriental) con un pequeño dominio del control litológico en el sector central y SW de la zona de estudio, especialmente entre los contactos de las Formaciones Tambor y Rosa Blanca.

### **7.3.1.2 Características de los drenajes transversales**

La Figura 37 muestra un patrón de drenaje transversal en los flancos E y W del Anticlinal de los Cobardes, al sur del río Sogamoso; de la misma manera, se observa este mismo patrón para los drenajes de las laderas del Macizo de Santander. Aunque estos fluyen a diferente dirección: los primeros al NW (flanco oriental) y SE (flanco occidental); los segundos al SW donde los ríos Umpalá, Manco, Frío y la quebrada La Moza que nacen en el Macizo se caracterizan por discurrir en la misma dirección del conjunto de fallas ubicadas a lo largo de la ladera como las Fallas de Umpalá y de Perchiquez, esto obedece a que los curso de los cauces están influenciados por estas fallas (Ballesteros, 2002)<sup>324</sup>. No obstante, las laderas del Anticlinal de los Cobardes y Macizo de Santander no comparten la misma litología ni las mismas estructuras tectónicas, pero ambas presentan el mismo patrón de drenaje transversal y tienen en común que el valor de la pendiente regional en estas laderas se encuentra entre 6-13°.

La Mesa de Bucaramanga a pesar de tener una pendiente regional baja (0-6°) se observan drenajes perpendiculares a las dos fallas principales que la limitan (Falla Bucaramanga y Falla del Suárez), los afluentes discurren de E-W hasta confluir en el tramo del Río de Oro encauzado en la Falla de Suárez. El depósito de la

---

<sup>324</sup> BALLESTEROS. Op cit., p. 73

Formación Bucaramanga es disectada por varias quebradas donde la mayoría son afluentes del Río de Oro, es descrita con una topografía suavemente ondulada, de pendiente ligeramente inclinada hacia el W entre 2-7°, el espesor de los depósitos aumenta hacia el occidente con estimaciones en profundidad máxima promedio de 250 m (INGEOMINAS, 2001)<sup>325</sup>. Esta inclinación no se aprecia en la pendiente regional pero es suficiente para hacer que los afluentes del Río de Oro tengan su dirección de discurriramiento actual, sin considerar otra razón como la litología o estructuras tectónicas que sean responsable del rumbo de los afluentes.

En la Mesa de Los Santos se observa que todos los drenajes discurren en dirección preferente E-W, igualmente como sucede en la Mesa de San Gil. La pendiente regional en la primera tiene una pequeña área localizada entre 0-6° y las pendientes de sus laderas oscilan entre 6-10°; para la segunda su pendiente regional es de 0-6° y sus laderas entre 6-10°. Los afluentes de las dos mesas no tiene un trayecto regular E-W como el observado en la Mesa de Bucaramanga, pero tiene en común que estos discurren en las formaciones sedimentarias del Cretácico (Formaciones Tambor, Rosa Blanca, Paja y Tablazo); los *knickpoints* asociados a las formaciones mencionadas se ubican en las Mesas de Lebrija, Los Santos, San Gil y Zapatoca (Figura 33) especialmente sobre los contactos de la Formación Tambor, infiriendo un control litológico para estas zonas.

A esta escala de trabajo no hay una tendencia de una pendiente regional homogénea y continua, la zona de estudio se conforma de bloques limitado por fallas (Julivert, 1958<sup>326</sup>; Niño y Vargas, 1993<sup>327</sup>; INGEOMINAS, 2001<sup>328</sup>; INGEOMINAS, 2005<sup>329</sup>) sometidos a procesos de levantamiento, subsidencia,

---

<sup>325</sup> COLOMBIA. INGEOMINAS. Zonificación sismogeotécnica indicativa del área metropolitana de Bucaramanga. Op cit. 19.

<sup>326</sup> JULIVERT. Op. cit., p 37.

<sup>327</sup> NIÑO y VARGAS. Op. cit. Citado por SOLANO. Op. cit., p. 41.

<sup>328</sup> COLOMBIA. INGEOMINAS. Zonificación sismogeotécnica indicativa del área metropolitana de Bucaramanga. Op cit. 40-41.

<sup>329</sup> COLOMBIA. INGEOMINAS. Zonificación de amenaza por movimientos en masa de algunas laderas de los municipios de Bucaramanga, Floridablanca, Girón y Piedecuesta. 2005. Citado por SOLANO. Op. cit., p. 39-42.

basculamiento y erosión (Julivert, 1958)<sup>330</sup>, razón por la cual se reflejan valores de pendiente regional fraccionadas, es decir no hay un incremento de la pendiente regional hacia alguna dirección determinada (Figura 18). En estudios de menor escala se puede apreciar una distribución más homogénea y definida, donde la Cordillera Oriental se caracteriza por ser una meseta elevada con baja pendiente regional y flancos abruptos debido al incremento de la pendiente regional hacia el E y W de la meseta, producto de la formación tectónica de la cadena montañosa (Struth *et al.*, 2012<sup>331</sup>; Struth *et al.*, 2015<sup>332</sup>; Struth, 2016<sup>333</sup>).

Conforme a lo anterior, los drenajes transversales se encuentran bajo la disposición de la ubicación espacial de los bloques y levantamiento de estructuras tectónicas: al E de la Falla del Suarez en el sector de las Mesas, los drenajes discurren de E-W por la inclinación del Bloque Ruitoque-Los Santos-Barichara y el Bloque Bucaramanga hacia el W; al W de la Falla del Suárez, en la Mesas Lebrija no se observa un desarrollo de drenajes transversales predominante ya que el Bloque Lebrija-Zapatoca tiene una inclinación hacia el N, no obstante en el Bloque Lloriqués-Los Cobardes donde se ubica el Anticinal de los Cobardes, presenta drenajes transversales a los flancos de esta estructura (ver flechas rojas de la Figura 38).

La Cordillera Oriental a nivel regional presenta un cambio de dirección de las principales estructuras: inician a NNE-SSW, pasan a N-S y vuelve a su dirección anterior NNE-SSW en la Serranía del Perijá (Raavel, 1956)<sup>334</sup>; el primer cambio de rumbo se evidencia en las inmediaciones del Macizo de Santander (Toussaint, 1993)<sup>335</sup>. La Geología de la Plancha 121 Cerrito (Ward *et al.*, 1997)<sup>336</sup> muestra un

---

<sup>330</sup> JULIVERT. Op. cit., p 36-38.

<sup>331</sup> STRUTH *et al.* Tectónica y evolución de la red de drenaje en la Cordillera Oriental de Colombia. Op. cit., p. 2.

<sup>332</sup> STRUTH, Lucía *et al.* Drainage reorganization during mountain building in the river system of the Eastern Cordillera of the Colombian Andes. Op. cit., p. 376-378.

<sup>333</sup> STRUTH. Op. cit., p. 33-34.

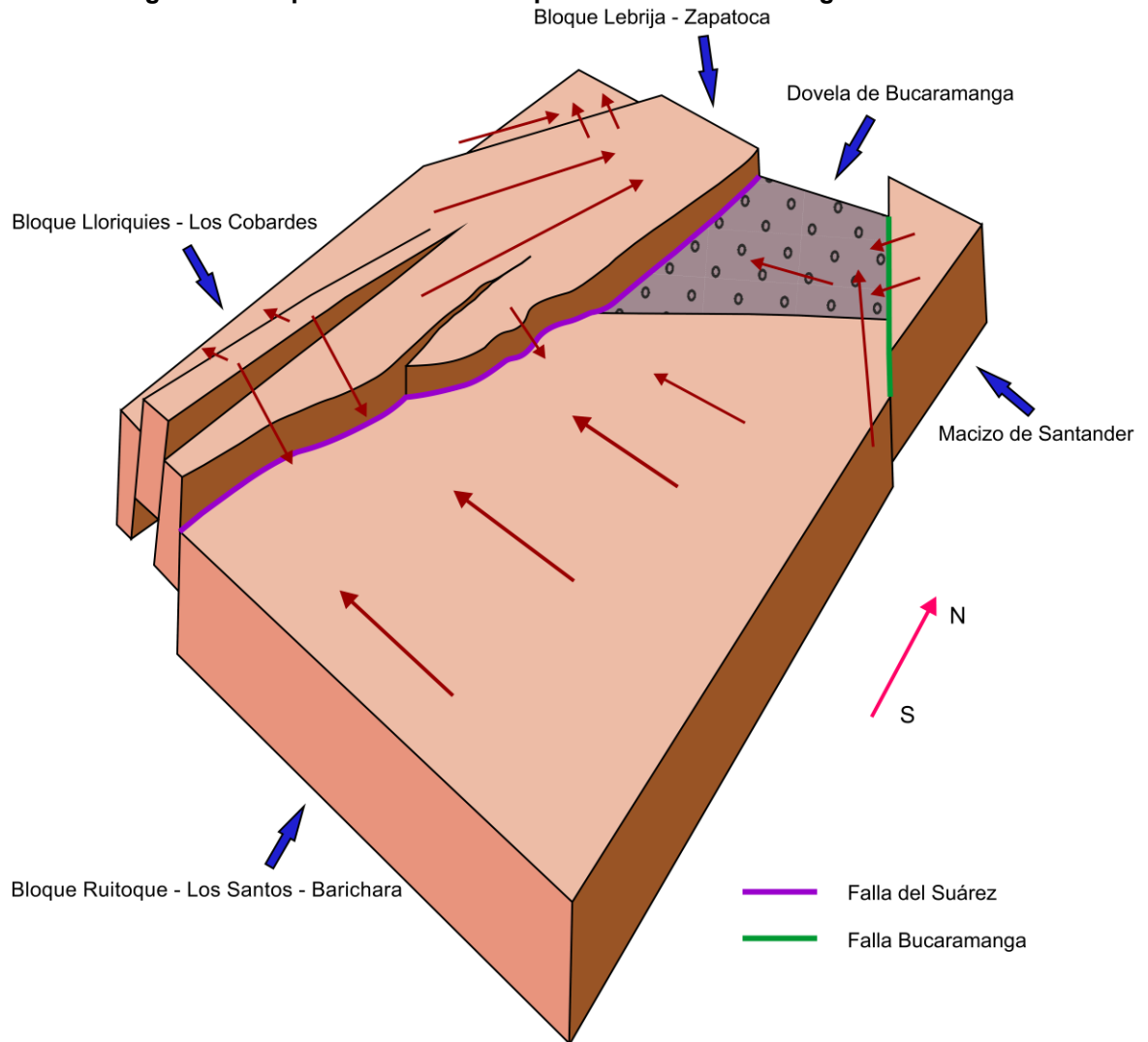
<sup>334</sup> RAASVELDT, H. C. Fallas de rumbo en el nordeste de Colombia. Revista del Petróleo. Bogota, 1956. vol. 7, p. 19-26. Citado por UJUETA. Op cit., p. 136.

<sup>335</sup> TOUSSAINT, Jean-François. Evolución geológica de Colombia. Universidad Nacional de Colombia, 1993.

<sup>336</sup> COLOMBIA, INGEOMINAS. Geología de la Plancha 121 Cerrito. Escala 1:100.000. WARD, Dwight *et al.* con colaboración del: U.S.GEOLOGICAL SURVEY (Convenio 514-L-030 de la A.I.D.). 1997. Versión digital 2010.

sector más al oriente de la zona de estudio, se observa que al E de la Falla Bucaramanga las principales estructuras (sinclinales, anticlinales, fallas de cabalgamiento) se disponen en rumbo N-S y NNW-SSE; en dirección perpendicular fluyen los drenajes que nacen en el Macizo de Santander (dirección SSW), debido al escalonamiento de la Falla Bucaramanga.

**Figura 38. Disposición de los bloques tectónicos en la región de la Mesas**



Fuente: Tomado y modificado de Julivert (1958)<sup>337</sup>.

<sup>337</sup> JULIVERT. Op. cit., p. 37-38.

### 7.3.2 Evidencias de captura fluvial

Es posible que los *elbows* se produzcan por reorganización de los cauces y los *knickpoints* por levantamiento del terreno, para un diagnóstico de captura fluvial los *elbows* y los *knickpoints* deben asociarse y no tomarlos como evidencia de captura por separado (Struth, 2016)<sup>338</sup>. Según Small (1978)<sup>339</sup>, un *knickpoint* puede ser encontrado en el cauce capturado o aguas arriba del codo de captura, pero esta características no se ven reflejada en el perfil fluvial del río Chicamocha (Figura 26), esto es posible ya que los *knickpoints* son elementos transitorios del paisaje (Castillo y Lugo-Hubp, 2011)<sup>340</sup> y probablemente este registro se encuentre borrado del perfil longitudinal.

Además, las depresiones en la divisoria de aguas también son indicadores de captura fluvial (Struth, 2016)<sup>341</sup>. Las depresiones 1 y 2 de la zona de estudio corresponden a eventos de captura, previamente se identificaron los *knickpoints* y los paleoperfiles relacionados a dicho evento (Figura 30). El *elbow* de la depresión 2 fue reconocido (Figura 31, codo sobre el río Sogamoso) más no el de la depresión 1, pero su captura fue previa a la del río Suárez mediante un afluente del río Magdalena (actual río Sogamoso) que avanzó en dirección SE hasta lograr su captura, así que el codo de captura atribuido a la depresión 1 es el que forma la confluencia de la quebrada Zapatoca en el río Sogamoso. El mecanismo empleado en el avance de estos afluentes transversales que logran una captura fluvial es la erosión remontante (Babault *et al.*, 2012<sup>342</sup>; Struth *et al.*, 2012<sup>343</sup>; Struth 2016<sup>344</sup>).

---

<sup>338</sup> STRUTH. Op. cit., p. 28-29.

<sup>339</sup> SMALL. Op. cit. Citado por BISHOP. Drainage rearrangement by river capture, beheading and diversion. Op. cit., p. 462.

<sup>340</sup> CASTILLO y LUGO-HUBP. Op. cit., p. 355.

<sup>341</sup> STRUTH. Op. cit., p. 28-29.

<sup>342</sup> BABAULT *et al.* Longitudinal to transverse drainage network evolution in the High Atlas (Morocco): The role of tectonics. Op. cit. Citado por BABAULT *et al.* Shortening, structural relief and drainage evolution in inverted rifts: insights from the Atlas Mountains, the Easter Cordillera of Colombia and the Pyrenees. Op. cit., p. 154.

<sup>343</sup> STRUTH *et al.* Tectónica y evolución de la red de drenaje en la Cordillera Oriental de Colombia. Op. cit. Citado por BABAULT *et al.* Shortening, structural relief and drainage evolution in inverted rifts: insights from the Atlas Mountains, the Easter Cordillera of Colombia and the Pyrenees. Op. cit., p. 154

<sup>344</sup> STRUTH. Op. cit., p. 82.

Para el *elbow* de la depresión 3 (Figura 31, codo sobre el río Chicamocha) no se encontró la asociación del *knickpoint* y del paleoperfil de la captura. No podemos tomar el codo mencionado como una evidencia de captura fluvial, no obstante la extensión y espesor de los depósitos en la Mesa de Bucaramanga (Formación Bucaramanga) no podrían ser justificados por la depositación de la actual red hidrográfica. Por tal razón, se plantea la posibilidad que anteriormente los ríos Suárez y Chicamocha transportaron los sedimentos presentes de la Formación Bucaramanga (Julivert, 1958<sup>345</sup>; García *et al.*, 2015<sup>346</sup>; Tesón *et al.*, 2015<sup>347</sup>; Solano, 2016<sup>348</sup>; Struth, 2016<sup>349</sup>), condicionaban su trazado fluvial alineados a las Fallas Bucaramanga y del Suárez respectivamente, el primero seguía su recorrido sobre la quebrada La Gacha continuando por el río de Oro y el segundo se extendía hasta la cabecera de la quebrada Grande (1), cambiando su dirección de flujo a E-W hasta confluir al cauce del Río de Oro encauzado a la Falla del Suárez.

No se encontró una depresión en la divisoria y un *elbow* relacionado con la quebrada La Angula. Si bien, la proyección del paleoperfil de la quebrada Zapatoca se ajustan a los perfiles longitudinales de la quebradas Grande (2) (Figura 27) y La Angula (Figura 28), independiente de por cuál continuó el paleocauce de la quebrada Zapatoca, aunque para este trabajo se considera la opción más probable la primera quebrada ya que esta se relaciona a la depresión 1 y el codo de captura de la quebrada Zapatoca, no hay duda que existe una correspondencia de la proyección del paleoperfil con un perfil longitudinal de la Mesa de Lebrija. Junto con las evidencias derivadas de los perfiles longitudinales que permitieron relacionarse con otros situados sobre la plataforma de las mesas, soportan que la zona de estudio estaba conformada por una plataforma inicial, donde la actuales zonas de las Mesas

---

<sup>345</sup> JULIVERT. Op. cit., p 27, 35.

<sup>346</sup> GARCÍA, Yenny et al. Ríos Chicamocha y Suárez: Un ejemplo de la evolución de la red de drenaje en orógenos de inversión. XV Congreso Colombiano de Geología (Agosto 31 – Septiembre 5, 2015: Bucaramanga, Colombia). Memorias. Bucaramanga. Sociedad Colombiana de Geología, 2015. p. 719-722. ISBN 978-958-57950-1-3.

<sup>347</sup> TESÓN, Eliseo et al. Capturas fluviales recientes de los ríos Chicamocha y Suárez: El origen de la Terraza de Bucaramanga y causas de la reorganización de la red de drenaje. XV Congreso Colombiano de Geología (Agosto 31 – Septiembre 5, 2015: Bucaramanga, Colombia). Memorias. Bucaramanga. Sociedad Colombiana de Geología, 2015. p. 127-130. ISBN 978-958-57950-1-3.

<sup>348</sup> SOLANO. Op. cit., p. 41.

<sup>349</sup> STRUTH. Op. cit., p. 81-82.

estaban conectadas (Julivert, 1958)<sup>350</sup> por antiguos drenajes que fluían con dirección S-N y posiblemente debieron existir más eventos de captura a parte de los identificados en este estudio.

### **7.3.3 Reorganización del drenaje y mecanismos**

La zona de estudio consistía en una plataforma inicial, sus drenajes fluían longitudinales a eje axial de la cordillera en una dirección preferente N-S paralelos a las estructuras tectónicas emergentes, antiguos cauces de los ríos Chicamocha y Suárez cuyos curso estaban alineados a las fallas Bucaramanga y del Suárez respectivamente, trasportaba su caudal a la actual cuenca Lebrija y depositaron sedimentos en la Mesa de Bucaramanga: la trayectoria del primero continuaba por los actuales cauces de la quebrada La Gacha y río de Oro; el segundo se prolongaba hasta la quebrada Grande (1). El río Magdalena ubicado en dirección E que igualmente fluía en dirección S-N, con un nivel base menor a los dos ríos mencionados anteriormente, extiende uno de sus afluentes por erosión remontante que avanza en dirección SE hasta lograr la captura de la quebrada Zapatoca y el río Suárez; para este momento no hay más aporte sedimentario del río Suárez en el sector de la Mesa de Bucaramanga. Posteriormente, un afluente del río Suárez avanza hacia el E por erosión remontante hasta dar lugar a la captura del río Chicamocha. Las potentes capturas fluviales ocurridas al interior del orógeno lograron transferir las áreas de las cuencas de drenaje de los ríos Chicamocha y Suárez a la cuenca Magdalena conservando sus trazados iniciales; esta reorganización fluvial sumada al ascenso del terreno e incisión profunda de los ríos principales desfragmentaron la plataforma inicial dando origen a la actual zona de las Mesas.

En base a las observaciones realizadas en este trabajo, la actual red de drenaje presenta ríos longitudinales conformado por ríos principales y afluentes de mayor

---

<sup>350</sup> JULIVERT. Op. cit., p. 22, 29.

longitud, discurriendo en dirección preferente S-N que se encuentran paralelos a las estructuras tectónicas y ríos transversales que corresponden a afluentes de menor longitud, fluyendo en dirección predominante E-W y W-E bajo el dominio de laderas de estructuras tectónicas con topografía ascendente y bloques que fueron expuestos a procesos de emersión, hundimiento y basculamiento, acompañado de potentes eventos de captura. Además existen algunos mecanismos que pueden afectar la capacidad de incisión fluvial y distribución de los cauces que se explican a continuación.

La erodabilidad es inversamente proporcional a la dureza de la roca del lecho, es decir las litologías duras (ej. rocas graníticas) son menos erodibles que las litologías blandas (ej. rocas sedimentarias), este es uno de los parámetros que limitan la capacidad de incisión de un cauce (Pastor, 2013)<sup>351</sup>. De acuerdo a la ley potencial de esorrentía (*shear stress* o *stream power law*) (Howard y Kerby, 1983<sup>352</sup>; Howard et al., 1994<sup>353</sup>; Whipple y Tucker, 1999<sup>354</sup>) la erodabilidad o coeficiente de erosión *K* depende de la litología, clima y carga sedimentaria (Whipple y Tucker, 1999)<sup>355</sup>.

Una diferencia entre los perfiles de los ríos Chicamocha y Suárez es la trayectoria litológica que realiza cada uno: el primero fluye por rocas sedimentarias del Cretácico y el segundo incide sobre rocas metamórficas del Paleozoico, Triásico-Jurásico de composición ígnea y sedimentarias del Cretácico (Figura 14). El perfil del Suárez cuya composición litológica debería ser más erodible presenta un perfil más estable con trazado regular y *knickpoints* visualmente claros; el perfil del Chicamocha tiene un trazado irregular, un aspecto erosionado con *knickpoints* difusos y casi sin vestigios de antiguos cauces a comparación del río Suárez. Se

---

<sup>351</sup> PASTOR. Op. cit., p. 32-33.

<sup>352</sup> HOWARD and KERBY. Channel changes in badlands. Op. cit. Citado por WHIPPLE and TUCKER. Implications of sediment-flux-dependent river incision models for landscape evolution. Op. cit., p. ETG 3-3.

<sup>353</sup> HOWARD, Alan et al. Modeling fluvial erosion on regional to continental scales. Op. cit. Citado por WHIPPLE and TUCKER. Implications of sediment-flux-dependent river incision models for landscape evolution. Op. cit., p. ETG 3-3.

<sup>354</sup> WHIPPLE and TUCKER. Dynamics of the stream power river incision model: Implications for height limits of mountain ranges, landscape response timescales, and research needs. Op. cit. p. 17663.

<sup>355</sup> *Ibíd.*, p. 17664.

debía esperar que el perfil longitudinal del Chicamocha al tener rocas ígneas intrusivas en parte de su lecho debería resistirse a la erodabilidad, pero es todo lo contrario a lo observado. Además, La Figura 21 compara los perfiles longitudinales del Suárez y Chicamocha, se observa que el último tiene un mayor encajonamiento en el sector de la Mesa de San Gil siendo un bloque basculado hacia el W (Julivert, 1958)<sup>356</sup>, presentando mayores cotas de elevación hacia el E en el Macizo de Santander. Esto sugiere que el río Chicamocha tiene una capacidad de incisión relativamente mayor al río Suárez.

El clima a escala estacional tiene una variabilidad en latitudes medias con la secuencia de cuatros estaciones (invierno, primavera, verano y otoño), para las latitudes tropicales donde se encuentra ubicada Colombia se resumen en dos estaciones: temporada lluviosa y temporada seca (Montealegre, 2014)<sup>357</sup>; las tasas de precipitación no son diferenciables en la zona de estudio pero son apreciables si se comparan las tasas de precipitación por cuenca, La Figura 15 ilustra que las tasas de precipitación promedio para la cuenca del río Suárez se encuentra entre 501-4000mm, mientras que en la cuenca Chicamocha está entre los rangos de los 501-2000mm. Además, las mediciones en estaciones hidrométricas en Santander han demostrado que existe una relación directa del régimen del caudal con el de lluvias, es decir al aumentar la precipitación se incrementan los valores registrados del caudal (Secretaría de planeación de Santander y UIS, 2011)<sup>358</sup> y posiblemente las altas precipitaciones se encuentre relacionadas con la alta capacidad erosiva del caudal, no obstante se carece de datos de la carga sedimentaria por cuenca para observar su relación con la precipitación. Los caudales medio multianual que se muestran en la Tabla 4 se observa que es mayor para la cuenca Suárez 195 m<sup>3</sup>/s y menor para la Chicamocha 135 m<sup>3</sup>/s; Los valores más bajos de caudal y

---

<sup>356</sup> JULIVERT. Op. cit., p. 37.

<sup>357</sup> MONTEALEGRE, José. COLOMBIA. Actualización del componente Meteorológico del modelo institucional del IDEAM sobre el efecto climático de los fenómenos El Niño y La Niña en Colombia, como insumo para el Atlas Climatológico. Informe Final, Bogotá, D.C., Agosto 20 de 2014. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. p. 1-134.

<sup>358</sup> SANTANDER. SECRETARÍA DE PLANEACIÓN y UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER. Op. cit. p. 118.

precipitación los posee la cuenca Chicamocha, sin embargo estos datos no explican la alta erodabilidad de su perfil longitudinal comparado con el Suárez.

El drenaje longitudinal no tiene una fuerte relación con pendientes regionales bajas en zonas como la Mesa de Zapatoca cuya pendiente regional se encuentra entre 6-10°, presenta más afluentes paralelos a las estructuras como la del Sinclinal de Zapatoca y Anticlinal de los cobardes. Igualmente, se encuentran zonas de baja pendiente regional con drenajes transversales a las fallas principales, como en las Mesas de Bucaramanga y de San Gil cuyos cursos de aguas discurren en dirección predominante E-W (Figura 18). La distribución de los afluentes transversales obedece a la disposición y distribución espacial de los bloques y sus escalonamientos que conforman el área de estudio (Figura 38): el bloque Bucaramanga-Ruitoque-Los Santos-Barichara inclinados hacia el N y mayormente al W con afluentes que fluyen de E-W acompañado de un hundimiento en Mesa de Bucaramanga, el bloque Lebrija-Zapatoca inclinado hacia el N con drenajes que discurren de S-N y los escalonamientos de la Falla del Suárez con afluentes de rumbo E, el escalonamiento de la Falla Bucaramanga con cauces que discurren hacia el SW sobre el Macizo de Santander, Valle del Magdalena con drenajes que se dirigen hacia el W y bloque Lloriqués-Los Cobardes donde discurren drenajes hacia el E y W (Julivert, 1958)<sup>359</sup>.

#### **7.3.4 Comparativa con el modelo de Babault et al. (2013)**

Comparando con el modelo de Babault *et al.*, (2013)<sup>360</sup>, este describe que al interior del orógeno comprende de mesetas poco deformadas, con bajo relieve estructural y su acortamiento se concentra a lo largo del margen del anterior *rift*; la zona de estudio se encuentra al interior de la Cordillera Oriental cercano al flanco occidental,

---

<sup>359</sup> JULIVERT. Op. cit., 37-38.

<sup>360</sup> BABAULT et al. Shortening, structural relief and drainage evolution in inverted rifts: insights from the Atlas Mountains, the Easter Cordillera of Colombia and the Pyrenees. Op. cit., p. 154.

conformada por bloques tectónicos que se asemejan a las mesetas poco deformadas con un bajo relieve estructural como se observa en la Figura 39.

La pendiente regional no es consecuente al patrón de drenaje transversal de los afluentes, pero esto difiere si se toma en cuenta el patrón de drenajes de los ríos de mayor longitud en estudios a escala menor donde contemplan gran parte de la extensión de la Cordillera Oriental (Struth *et al.*, 2012<sup>361</sup>; Babault *et al.* 2013<sup>362</sup>; Struth *et al.*, 2015<sup>363</sup>; Struth, 2016<sup>364</sup>), por otro lado si se observa concordancia del patrón de drenaje de los ríos principales del área de estudio con la pendiente regional baja.

Estructuras incipientes como el Anticlinal de los Cobardes cuyo núcleo se compone principalmente por areniscas y conglomerados intercalados con lodolitas de la Formación Girón, no es una litología que se destaque por su resistencia teniendo en cuenta que no conserva la estructura topográfica de anticlinal en la Mesa de Lebrija (Figura 39). De otro lado, se observa cierta frecuencia que los cauces de los afluentes que discurren en dirección S-N pasan sobre el contacto de las Formaciones Tablazo y Rosa Blanca, aunque ambas formaciones se conforman principalmente de calizas (la primera intercalada con lodolitas calcáreas y la segunda intercalada por shales) no se podría estimar cual litología es más erodible, además que estas se vinculan a litologías resistentes; solo uno de los afluentes longitudinales cuyo valle se sitúa sobre el Sinclinal de Zapatoca, incide sobre litologías blandas como la Formación Paja (shales calcáreo). Estas características difieren de las encontradas por (Babault *et al.*, 2013)<sup>365</sup> donde los valles de los ríos

---

<sup>361</sup> STRUTH *et al.* Tectónica y evolución de la red de drenaje en la Cordillera Oriental de Colombia. Op. cit., p. 2.

<sup>362</sup> BABAULT *et al.* Shortening, structural relief and drainage evolution in inverted rifts: insights from the Atlas Mountains, the Easter Cordillera of Colombia and the Pyrenees. Op. cit., p. 151.

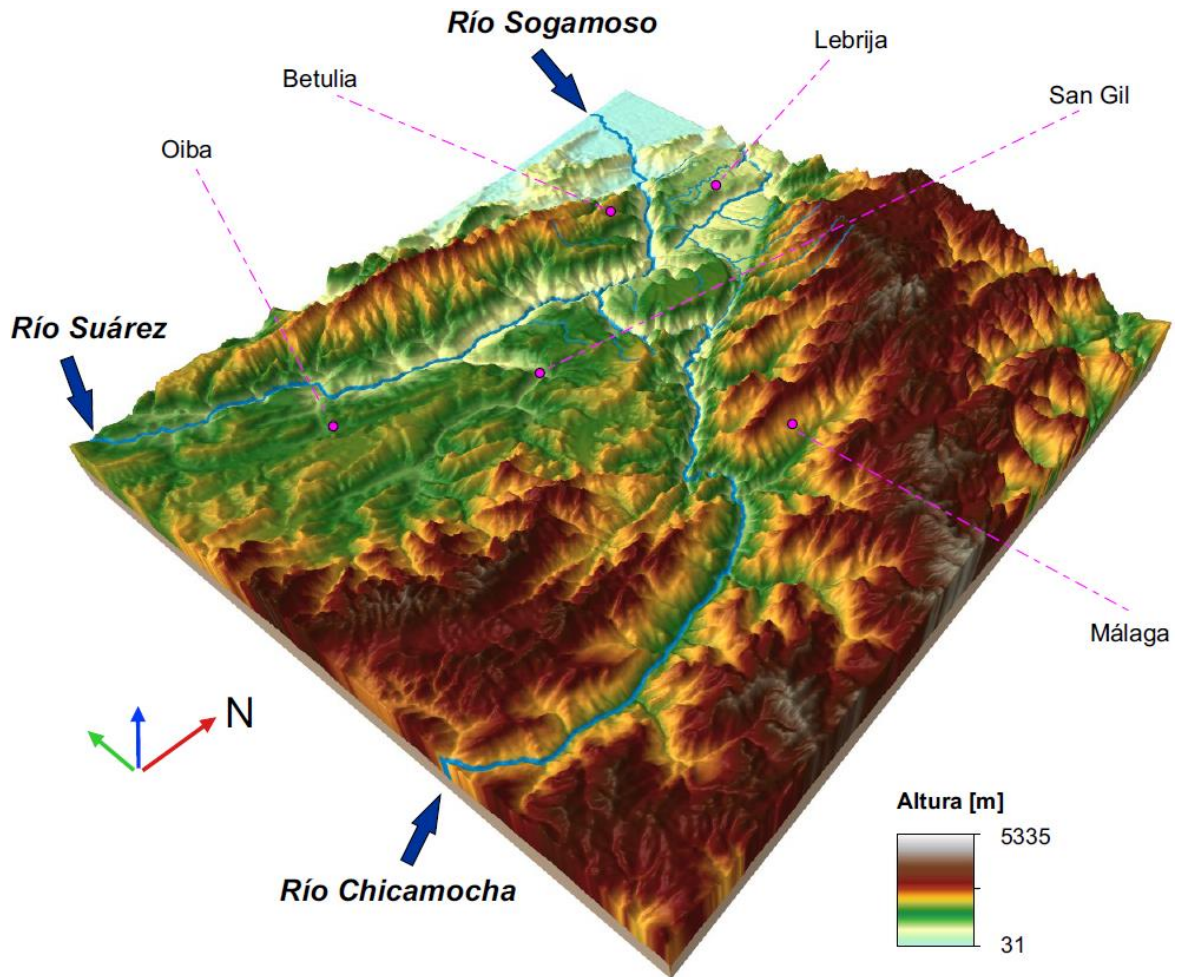
<sup>363</sup> STRUTH *et al.* Drainage reorganization during mountain building in the river system of the Eastern Cordillera of the Colombian Andes. Op. cit., p. 376-378.

<sup>364</sup> STRUTH. Op. cit., p. 33-34.

<sup>365</sup> BABAULT *et al.* Shortening, structural relief and drainage evolution in inverted rifts: insights from the Atlas Mountains, the Easter Cordillera of Colombia and the Pyrenees. Op. cit., p. 151.

longitudinales se asocian a litologías blandas, así como las estructuras incipientes son constituidas por litologías resistentes.

**Figura 39. Bloquediagrama del DEM con exageración vertical de cuatro veces**



Desde el Cenozoico hasta antes del final del Plioceno, el patrón de drenaje en la Cordillera Oriental generalmente se ha conservado axial y paralelo a las estructuras tectónicas emergentes (Silva *et al.*, 2013)<sup>366</sup>, esto es comparable con la dirección de paleocorrientes con tendencia NNW en las Formaciones Areniscas de Socha (Paleoceno), Arcillas de Socha (Paleoceno tardío) y Picacho (Eoceno), unidades

<sup>366</sup> SILVA *et al.* Op. cit., p. SP377. 15.

cercanas al valle del río Chicamocha situadas entre las inmediaciones del municipio de Sogamoso y el municipio Paz del Río (Pardo-Trujillo y Roche, 2009)<sup>367</sup>. De otro lado, Babault *et al.* (2013) aluden un dominio longitudinal del drenaje en un estadio temprano de inversión tectónica (Paleoceno a Oligoceno temprano) por lo menos al interior de la Cordillera Oriental, a partir de evidencias de paleocorrientes y estratos de crecimientos en unidades Paleógenas (Gómez *et al.*, 2005)<sup>368</sup>. En Struth *et al.* (2015) y Struth (2016) menciona características del patrón de drenaje en la Cordillera Oriental durante el Paleógeno en base a otros trabajos: una red de drenaje controlada por estructuras emergentes de pliegues y cabalgamientos siguiendo una pendiente regional hacia el NNE, esto a partir de datos de paleocorrientes y fuentes de proveniencia de sedimentos del Cenozoico temprano de la Cordillera Oriental (Laverde *et al.*, 1989<sup>369</sup>; Cooper *et al.*, 1995<sup>370</sup>; Diaz y Serrano, 2001<sup>371</sup>; Gómez *et al.*, 2005<sup>372</sup>; Bayona *et al.*, 2008<sup>373</sup>; Horton *et al.*, 2010<sup>374</sup>; Nie *et al.*, 2010<sup>375</sup>; Saylor *et al.*, 2011<sup>376</sup>; Nie *et al.*, 2012<sup>377</sup>; Bande *et al.*,

---

<sup>367</sup> PARDO-TRUJILLO, Andrés and ROCHE, Emile. Paleocene-Eocene palynology and palynofacies from northeastern Colombia and western Venezuela. Cuaderno de Investigación N° 41, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales [online]. Universidad de Caldas, Manizales, 2009. p. 1-333. ISBN 978-958-8319-95-7. Available from internet: <<http://iies.ucaldas.edu.co/sites/default/files/pdf-publicaciones/Paleocene-Eocene%20Palynology%20and%20Palynofacies%20from%20Northeastern%20Colombia%20and%20Western%20Venezuela.pdf>>.

<sup>368</sup> GÓMEZ, Elías *et al.* Development of the Colombian foreland-basin system as a consequence of diachronous exhumation of the northern Andes. Geological Society of America Bulletin, 2005, vol. 117, no 9-10, p. 1272-1292. Citado por BABAULT *et al.* Shortening, structural relief and drainage evolution in inverted rifts: insights from the Atlas Mountains, the Easter Cordillera of Colombia and the Pyrenees. *Op. cit.*, p. 151.

<sup>369</sup> LAVERDE, F. *et al.* Recognition of an ancient fluvial system in the Upper Magdalena Valley, Colombia, 2008. In Programme and Abstracts of the IV International Conference on Fluvial Sedimentology (Barcelona), p.165. Citado por STRUTH. *Op. cit.*, p. 20.

<sup>370</sup> COOPER *et al.* *Op. cit.* Citado por STRUTH. *Op. cit.*, p. 20.

<sup>371</sup> DIAZ, L y SERRANO, M. Observaciones sobre el Terciario del Piedemonte. Reporte presentado a Occidental de Colombia por Ariana Ltda, 2001. Citado por STRUTH. *Op. cit.*, p. 20.

<sup>372</sup> GÓMEZ, Elías *et al.* Development of the Colombian foreland-basin system as a consequence of diachronous exhumation of the northern Andes. *Op. cit.* Citado por STRUTH. *Op. cit.*, p. 20.

<sup>373</sup> BAYONA, Germán *et al.* An integrated analysis of an orogen–sedimentary basin pair: Latest Cretaceous–Cenozoic evolution of the linked Eastern Cordillera orogen and the Llanos foreland basin of Colombia. Geological Society of America Bulletin, 2010. vol. 120, no 9-10, p. 1171-1197. Citado por STRUTH. *Op. cit.*, p. 20.

<sup>374</sup> HORTON, Brian *et al.* Linking sedimentation in the northern Andes to basement configuration, Mesozoic extension, and Cenozoic shortening: Evidence from detrital zircon U-Pb ages, Eastern Cordillera, Colombia. Geological Society of America Bulletin, 2010. vol. 122, no 9-10, p. 1423-1442. Citado por STRUTH. *Op. cit.*, p. 20.

<sup>375</sup> NIE, Junsheng *et al.* Tracking exhumation of Andean ranges bounding the Middle Magdalena Valley basin, Colombia. Geology, 2010. vol. 38, no 5, p. 451-454. Citado por STRUTH. *Op. cit.*, p. 20.

<sup>376</sup> SAYLOR, Joel *et al.* Evaluating foreland basin partitioning in the northern Andes using Cenozoic fill of the Floresta basin, Eastern Cordillera, Colombia. Basin Research, 2011. vol. 23, no 4, p. 377-402. Citado por STRUTH. *Op. cit.*, p. 20.

<sup>377</sup> NIE, Junsheng *et al.* Integrated provenance analysis of a convergent retroarc foreland system: U–Pb ages, heavy minerals, Nd isotopes, and sandstone compositions of the Middle Magdalena Valley basin, northern Andes, Colombia. Earth-Science Reviews, 2012. vol. 110, no 1, p. 111-126. Citado por STRUTH. *Op. cit.*, p. 20.

2012<sup>378</sup>; Caballero *et al.*, 2013<sup>379</sup>; Silva *et al.*, 2013<sup>380</sup>), paleocorrientes en dirección NNE registrado por sedimentos fluviales del Paleoceno en la Sabana de Bogotá (Laverde *et al.*, 1989<sup>381</sup>; Bayona, 2008<sup>382</sup>; Bayona *et al.*, 2008<sup>383</sup>; Saylor *et al.*, 2011<sup>384</sup>), un patrón de drenaje longitudinal y paralelo a la estructuras ascendentes durante el Paleoceno al Eoceno temprano (Brown *et al.*, 1991<sup>385</sup>; Gómez *et al.*, 2005<sup>386</sup>; Gómez *et al.*, 2005<sup>387</sup>; Bayona, 2008<sup>388</sup>; Bayona *et al.*, 2008<sup>389</sup>; Saylor *et al.*, 2011<sup>390</sup>; Mora *et al.*, 2013<sup>391</sup>; Silva *et al.*, 2013<sup>392</sup>) y un drenaje promedio que fluía hacia el N en la Sabana de Bogotá y el Valle del Magdalena entre el Eoceno y Oligoceno (Diaz y Serrano, 2001<sup>393</sup>; Gómez *et al.*, 2005<sup>394</sup>; Silva *et al.*, 2013<sup>395</sup>). Se podría decir que esta serie de evidencias soportan la idea que en los estadios tempranos de la inversión donde el acortamiento de la corteza es menor, estuvo dominado por drenajes longitudinales, controlado por estructuras tectónicas, muy posiblemente con una baja pendiente regional y suave relieve estructural, características afines al Estadio 1 de evolución de la red de drenaje en orógenos de inversión, no obstante la escala de trabajo del presente estudio no permite realizar

<sup>378</sup> BANDE, Alejandro, et al. Clastic deposition, provenance, and sequence of Andean thrusting in the frontal Eastern Cordillera and Llanos foreland basin of Colombia. Geological Society of America Bulletin, 2012. vol. 124, no 1-2, p. 59-76. Citado por STRUTH. Op. cit., p. 20.

<sup>379</sup> CABALLERO, Víctor et al. Factors controlling selective abandonment and reactivation in thick-skin orogens: a case study in the Magdalena Valley, Colombia. Geological Society, London, Special Publications, 2013, vol. 377, no 1, p. 343-367. Citado por STRUTH. Op. cit., p. 20.

<sup>380</sup> SILVA et al. Op. cit. Citado por STRUTH. Op. cit., p. 20.

<sup>381</sup> LAVERDE et al. Op. cit., p.165. Citado por STRUTH. Op. cit., p. 20.

<sup>382</sup> BAYONA, Germán. Geocronología, termocronología, bioestratigrafía y procedencia de unidades paleógenas en la zona axial de la Cordillera Oriental; Aportes al modelamiento del sistema petrolífero en las cuencas adyacentes. 2008. ICP-Ecopetrol report. Citado por STRUTH. Op. cit., p. 20.

<sup>383</sup> BAYONA et al. Op. cit. Citado por STRUTH. Op. cit., p. 20.

<sup>384</sup> SAYLOR et al. Op. cit. Citado por STRUTH. Op. cit., p. 20.

<sup>385</sup> BROWN, Erik, et al. Examination of surface exposure ages of Antarctic moraines using in situ produced 10 Be and 26 Al. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1991. vol. 55, no 8, p. 2269-2283. Citado por STRUTH. Op. cit., p. 20.

<sup>386</sup> GÓMEZ, Elías et al. Development of the Colombian foreland-basin system as a consequence of diachronous exhumation of the northern Andes. Op. cit. Citado por STRUTH. Op. cit., p. 20.

<sup>387</sup> GÓMEZ, Elías et al. Syntectonic Cenozoic sedimentation in the northern middle Magdalena Valley Basin of Colombia and implications for exhumation of the Northern Andes. Geological Society of America Bulletin, 2005, vol. 117, no 5-6, p. 547-569. Citado por STRUTH. Op. cit., p. 20.

<sup>388</sup> BAYONA. Op. cit. Citado por STRUTH. Op. cit., p. 20.

<sup>389</sup> BAYONA et al. Op. cit. Citado por STRUTH. Op. cit., p. 20.

<sup>390</sup> SAYLOR et al. Op. cit. Citado por STRUTH. Op. cit., p. 20.

<sup>391</sup> MORA, Andrés et al. Inversion tectonics under increasing rates of shortening and sedimentation: Cenozoic example from the Eastern Cordillera of Colombia. Geological Society, London, Special Publications, 2013, vol. 377, no 1, p. 411-442. Citado por STRUTH. Op. cit., p. 20.

<sup>392</sup> SILVA et al. Op. cit. Citado por STRUTH. Op. cit., p. 20.

<sup>393</sup> DIAZ Y SERRANO. Op. cit. Citado por STRUTH. Op. cit., p. 20.

<sup>394</sup> GÓMEZ, Elías et al. Development of the Colombian foreland-basin system as a consequence of diachronous exhumation of the northern Andes. Op. cit. Citado por STRUTH. Op. cit., p. 20.

<sup>395</sup> SILVA et al. Op. cit. Citado por STRUTH. Op. cit., p. 20.

observaciones regionales, donde pueda apreciar el patrón de drenaje y la características estructurales en los flancos de la cordillera.

Tomando en cuenta el desarrollo de la pendiente regional en los flancos de la Cordillera oriental, la zona de estudio se encuentra en un periodo transición entre los dos estadios evolutivos (Tabla 2), probablemente iniciado el estadio 2 (Tabla 2; Figura 7, B). La red de drenaje de la Cordillera Oriental se está transformando de un dominio longitudinal a transversal (Babault *et al.*, 2013)<sup>396</sup>, la divisorias de aguas que separan los flancos de la Cordillera de su meseta axial están migrando hacia el interior a su vez que los drenajes transversales aumentan el área en los flancos del orógeno (Struth *et al.*, 2012)<sup>397</sup>; su deformación concentrada en los márgenes de la cuenca que coincide con los flancos asimétricos de la Cordillera Oriental (Babault *et al.*, 2013)<sup>398</sup>. La zona de las mesetas son plataformas levemente deformadas situadas al interior del orógeno, se conserva el dominio del patrón de drenaje longitudinal de los ríos principales como los afluentes de mayor extensión que fluye en dirección preferente S-N controlado por estructuras tectónicas emergentes y ríos transversales de corta longitud sujetos a la disposición espacial de los bloques tectónicos. La reorganización del drenajes en los flancos de la Cordillera Oriental se caracteriza por discretos eventos de captura a medida que la divisoria de aguas avanza hacia el interior (Struth *et al.*, 2015<sup>399</sup>; Struth, 2016<sup>400</sup>), mientras que al interior del orógeno los afluentes transversales que logran avanzar en la zona de mesetas da lugar a capturas potentes como las ocurridas en el Chicamocha y Suarez. El acortamiento de la corteza incrementará la pendiente regional y la Cordillera Oriental pasará a un dominio de patrón de drenaje transversal con

---

<sup>396</sup> BABAULT *et al.* Shortening, structural relief and drainage evolution in inverted rifts: insights from the Atlas Mountains, the Easter Cordillera of Colombia and the Pyrenees. *Op. cit.*, p. 141, 151.

<sup>397</sup> STRUTH *et al.* Tectónica y evolución de la red de drenaje en la Cordillera Oriental de Colombia. *Op. cit.* Citado por BABAULT *et al.* Shortening, structural relief and drainage evolution in inverted rifts: insights from the Atlas Mountains, the Easter Cordillera of Colombia and the Pyrenees. *Op. cit.*, p. 151.

<sup>398</sup> BABAULT *et al.* Shortening, structural relief and drainage evolution in inverted rifts: insights from the Atlas Mountains, the Easter Cordillera of Colombia and the Pyrenees. *Op. cit.*, p. 146, 153-154.

<sup>399</sup> STRUTH *et al.* Drainage reorganization during mountain building in the river system of the Eastern Cordillera of the Colombian Andes. *Op. cit.* Citado por STRUTH. *Op. cit.*, p. 69.

<sup>400</sup> STRUTH. *Op. cit.*, p. 9, 38, 41, 91.

remanentes de ríos longitudinales (Struth *et al.*, 2012<sup>401</sup>; Babault *et al.*, 2013<sup>402</sup>; Struth *et al.*, 2015<sup>403</sup>; Struth, 2016<sup>404</sup>).

---

<sup>401</sup> STRUTH *et al.* Tectónica y evolución de la red de drenaje en la Cordillera Oriental de Colombia. *Op. cit.*, p. 4.

<sup>402</sup> BABAULT *et al.* Shortening, structural relief and drainage evolution in inverted rifts: insights from the Atlas Mountains, the Eastern Cordillera of Colombia and the Pyrenees. *Op. cit.*, p. 141, 152-154.

<sup>403</sup> STRUTH *et al.* Drainage reorganization during mountain building in the river system of the Eastern Cordillera of the Colombian Andes. *Op. cit.*, p. 370, 379.

<sup>404</sup> STRUTH. *Op. cit.*, p. 41, 45.

## 8. DISCUSIONES

### 8.1 EVIDENCIAS GEOMORFOLÓGICAS

#### 8.1.1 Elbows y wind gaps

El curso del río Suárez se desvía de la Falla del Suárez tomando un rumbo NW para continuar por el actual río Sogamoso describiendo un *elbow* de captura poco acentuado, la existencia de este codo de captura se basa en los siguientes: la existencia de un depósito de grandes dimensiones cuyo origen no es justificable con la actual red de drenaje presente en la Mesa de Bucaramanga, el carácter amplio de valle de Chocóa que no puede ser derivado de la quebrada La Gacha ni atribuirlo a causas tectónicas como la prolongación de la Falla del Suárez, la presencia de aluviones en la quebrada La Gacha de gran proporción que no pudieron ser depositados por la quebrada actual, la visualización de un ciclo en los afluentes del río Sogamoso que se ajusta a la terraza de Bucaramanga y la continuación de la Falla del Suárez siendo la responsable de la creación y encauzamiento del antiguo cauce del río Suárez que confluía con el río de Oro (Julivert, 1958)<sup>405</sup>.

Al S del corregimiento de Pescadero se encuentra el codo de captura del Chicamocha, se caracteriza por tener un rumbo general N14W y cambia abruptamente a una dirección S34W (Ballesteros, 2002)<sup>406</sup>, las características morfométricas del valle aluvial en los alrededores de los municipios de Cepitá y Jordán muestra secciones transversales con mayores valores de pendiente en las vertientes, consta de taludes generalmente abruptos de inclinación variable en el tramo Pescadero-Jordán comparado con las secciones transversales del tramo Cepitá-Pescadero que registra menores valores de pendiente en sus vertientes y una amplitud notable en el fondo del valle debido a la erosión lateral del río,

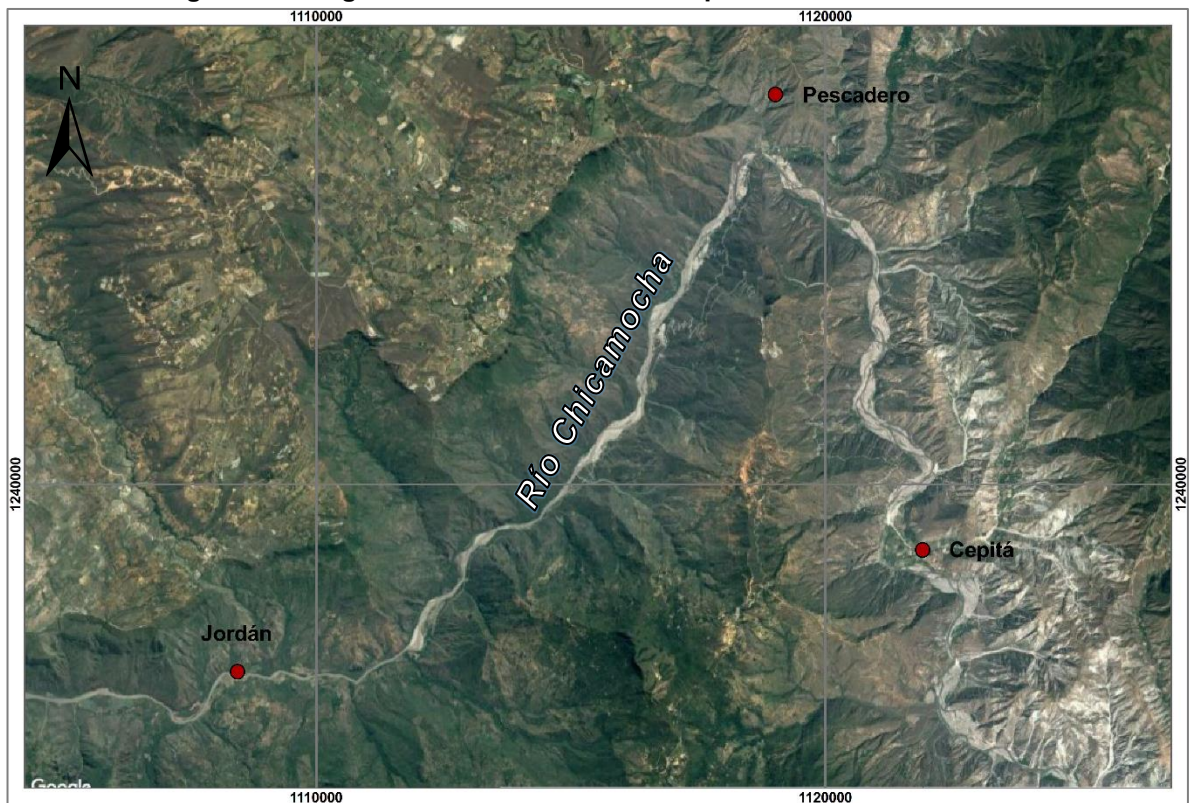
---

<sup>405</sup> JULIVERT. Op. cit., p. 34-35.

<sup>406</sup> BALLESTEROS. Op. cit., p. 29, 100.

indicando un encañonamiento del valle en las inmediaciones de Pescadero (Ballesteros, 2002)<sup>407</sup>; la Figura 40 corresponde una imagen satelital que representa las características descritas: el tramo Cepitá-Pescadero se conforma de meandros más pronunciados y amplios valles, de otra lado el tramo Pescadero-Jordán comprende meandros más suaves con un valle más angosto y encajonado.

**Figura 40. Imagen detallada del codo de captura del río Chicamocha**



Fuente: Tomado y modificado de Google Earth.

El antiguo trayecto del río Chicamocha posiblemente discurrió por los collados de Los Curos (1250 m de altura) y de la hacienda Campo Alegre (1050 m de altura) entre los municipios de Piedecuesta y Floridablanca orientado a la Falla Bucaramanga, teniendo en cuenta primero la línea Curos-Piedecuesta-Floridablanca que describe amplios valles, aguas arriba del municipio de Cepitá a una altura de 1200 m se destaca una amplia hombrera cuyos retazos son visibles

<sup>407</sup> *Ibíd.*, p. 95-101.

en gran parte de su curso por el Macizo de Santander (Julivert, 1958)<sup>408</sup>. El antiguo valle del Chicamocha sugerido en este estudio se prolonga por la Falla de Bucaramanga continuando por la quebrada Grande (1) en base a evidencias sedimentológicas que se ampliarán más adelante.

La quebrada Zapatoca cambia su antiguo curso que se prolongaba por la quebrada La Angula, derivada de la erosión remontante de un afluente del Magdalena que más tarde daría origen a la Mesas de Lebrija y Zapatoca, posteriormente ocurre la captura del antiguo cauce del Suarez desviándolo de la vereda Chocóa del municipio de Girón para seguir por el actual Sogamoso (Julivert, 1958)<sup>409</sup>. La depresión 1 (Figura 31) muestra la continuación de un antiguo valle del SE que sufrió el mismo mecanismo de captura fluvial como los ríos Suárez y Chicamocha (Struth, 2016)<sup>410</sup> y que para este trabajo se asocia con la captura de la quebrada Zapatoca que prologaba su antiguo cauce sobre la quebrada Grande (2), tomando una propuesta diferente a la mencionada por Julivert (1958).

Las evidencias citadas en conjunto con las encontradas en este estudio: las tres depresiones en la divisoria de aguas Lebrija y Chicamocha-Sogamoso (Figura 31) y los dos *knickpoints* que se relaciona con paleoperfiles de las dos primeras depresiones (Figura 30) el primero a los 1399 m de elevación sobre la quebrada Zapatoca y el segundo a los 1461 m de altitud sobre el río Suárez, se validarían los dos *elbows* de captura que se ubican al S de la primera y segunda depresión. Además, la altura del último *knickpoint* nombrado es similar a un *knickpoint* referenciado en otro estudio ubicado a una altitud de 1400 m sobre el cauce del Suárez y es relacionado con el ajuste del perfil fluvial a un nuevo nivel base que incrementó el potencial erosivo del río Suárez, generando la reciente captura del río Chicamocha para establecer su configuración actual (Struth, 2016)<sup>411</sup>. Igualmente,

---

<sup>408</sup> JULIVERT. Op. cit., p. 35.

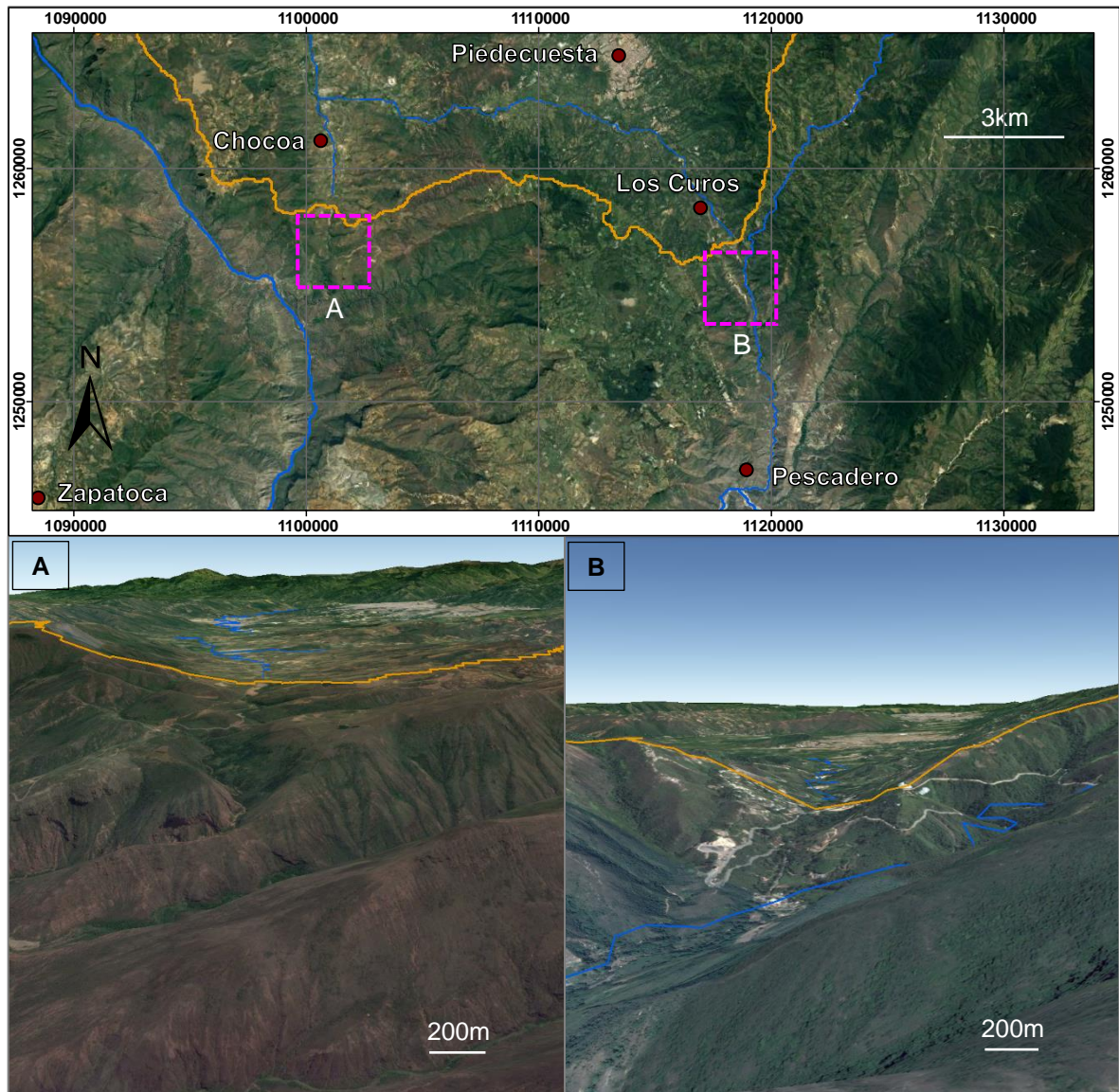
<sup>409</sup> *Ibíd.*, p. 38.

<sup>410</sup> STRUTH. Op. cit., p. 81.

<sup>411</sup> *Ibíd.*, p. 82.

las visuales N y NE las depresiones 2 (polígono A) y 3 (polígono B) respectivamente, ilustran una morfología de valles amplios tanto en la vereda Chocoa como en Los Curos (Figura 41).

**Figura 41. Morfología de las visuales de los polígonos A y B sobre la divisoria de aguas entre las cuencas Lebrija y Chicamochoa-Sogamoso**



Fuente: Tomado y modificado de Google Earth.

### 8.1.2 Otro tipo de evidencias geomorfológicas

Las hombreras de los valles del Sogamoso y del Chicamocha y un ciclo de los afluentes de la Mesa de los Santos se asemejan a la altura de la Mesa de Bucaramanga (Julivert, 1958)<sup>412</sup>, además la analogía de la elevación de la topografía en ciertos sectores, nacimientos y cauces de algunos afluentes de la zona de las Mesas de Bucaramanga, son fuertes indicios que la región de la Mesas constaba de una plataforma.

De otro lado, la identificación de los “*shoulders*” u hombreras en los perfiles transversales del valle de río Chicamocha alineado a la Falla Bucaramanga, señalan antiguas superficies de arrasamiento cuyas cotas asciende aguas arriba indicando una dirección de discurrimiento N-S durante el Mioceno tardío-Plioceno, atribuido al favorecimiento de la dinámica de exhumación de la Cordillera Oriental ocurrido en el mismo lapso temporal (Cooper *et al.*, 1995<sup>413</sup>; Hoorn *et al.*, 1995<sup>414</sup>) y la formación del Alto los Curos que obligó a establecer una dirección de flujo N-S de los drenajes correspondientes a esta etapa (Ballesteros, 2002)<sup>415</sup>. Aunque los resultados de este trabajo no pueden dar respuesta si existió un cambio en la dirección de flujo, más bien podría estar relacionado con el levantamiento del Macizo de Santander que se convirtió en una nueva área fuente y a su vez se impuso como barrera fluvial de los sedimentos transportados con rumbo NE durante el Eoceno tardío (Caballero, *et al.*, 2013)<sup>416</sup>; sumado a otras exhumaciones que fueron simultáneas como la Cordillera Central y la Cordillera Oriental, se dio inicio a la construcción de una cuenca endorreica en el Valle del Magdalena y en consecuencia un posible cambio de dirección del transporte de sedimentos, en busca de una salida donde estos

---

<sup>412</sup> JULIVERT. Op. cit., p. 34-36.

<sup>413</sup> COOPER *et al.* Op. cit. Citado por BALLESTEROS. Op. cit., p. 108.

<sup>414</sup> HOORN, Carina, *et al.* Andean tectonics as a cause for changing drainage patterns in Miocene northern South America. *Geology* [online]. 1995, vol. 23, no 3, p. 237-240. Available from internet: <<http://geology.gsapubs.org/content/23/3/237.short>>. Citado por BALLESTEROS. Op. cit., p. 108.

<sup>415</sup> BALLESTEROS. Op. cit., p. 29, 108-109.

<sup>416</sup> CABALLERO *et al.* Tectonic controls on sedimentation in an intermontane hinterland basin adjacent to inversion structures: The Nuevo Mundo syncline, Middle Magdalena Valley, Colombia. Op. cit. Citado por CABALLERO *et al.* Factors controlling selective abandonment and reactivation in thick-skin orogens: a case study in the Magdalena Valley, Colombia. Op. cit., p. 362.

podieron tomar rumbo hacia el E o hacia la cuenca cerrada en construcción (Caballero, *et al.*, 2013)<sup>417</sup>. Una serie de dataciones cronológicas y termocronológicas, distribución de facies (Caballero, *et al.*, 2013)<sup>418</sup>, patrones de estratigrafía sísmica y observaciones sedimentológicas (Caballero, *et al.*, 2013<sup>419</sup>), respaldan la configuración de una cuenca endorreica durante el Oligoceno al Mioceno temprano en el Valle Medio del Magdalena (Caballero *et al.*, 2013<sup>420</sup>; Silva *et al.*, 2013<sup>421</sup>).

## 8.2 EVIDENCIAS ESTRAFIFRÁFICAS

### 8.2.1 Depósitos fluviales

La identificación de un depósito fluvial en el valle del río Umpalá distanciado a 1500 m de la confluencia con el Chicamocha, se caracteriza por sus vastas dimensiones para haber sido depositado por el actual cauce, este depósito se derivado de la captura fluvial del antiguo Chicamocha por un afluente del Suárez (Ballesteros, 2002)<sup>422</sup>; otros dos depósitos ubicados al margen derecho del río Chicamocha, uno en el sector de Cepitá y el otro situado a 350 metros del puente de Pescadero aguas abajo son constituidos por bloques alóctonos de gran tamaño de rocas cristalinas de tpo tonalítico y granodiorítico, es decir que son litologías que no se encuentran sobre el dominio del actual valle fluvial y se atribuye a una proveniencia muy distante en dirección NE (zona central del Macizo de Santander) transportados por un caudal

---

<sup>417</sup> CABALLERO et al. Tectonic controls on sedimentation in an intermontane hinterland basin adjacent to inversion structures: The Nuevo Mundo syncline, Middle Magdalena Valley, Colombia. Op cit. Citado por CABALLERO et al. Factors controlling selective abandonment and reactivation in thick-skin orogens: a case study in the Magdalena Valley, Colombia. Op. cit., p. 360, 362.

<sup>418</sup> CABALLERO et al. Tectonic controls on sedimentation in an intermontane hinterland basin adjacent to inversion structures: The Nuevo Mundo syncline, Middle Magdalena Valley, Colombia. Op cit. Citado por CABALLERO et al. Factors controlling selective abandonment and reactivation in thick-skin orogens: a case study in the Magdalena Valley, Colombia. Op. cit., p. 360, 362.

<sup>419</sup> CABALLERO et al. Factors controlling selective abandonment and reactivation in thick-skin orogens: a case study in the Magdalena Valley, Colombia. Op. cit., p. 360, 362.

<sup>420</sup> *Ibid.*, p. 360, 362.

<sup>421</sup> SILVA et al. Op. cit., p. SP377. 15.

<sup>422</sup> BALLESTEROS. Op. cit., p. 76, 79-80, 112-113.

potente, respaldando la interpretación del que en algún tiempo el Chicamocha fluyó con rumbo N-S (Ballesteros, 2002)<sup>423</sup>.

Un estudio de procedencia registró que el área fuente principal de los depósitos de la Formación Bucaramanga (limitado al sector S del río Frío) se encuentra al S y al SE de la Mesa de Bucaramanga (Solano, 2016)<sup>424</sup>, los clastos indicadores correlacionados con las unidades reportadas por Ward *et al.* (1973)<sup>425</sup> y Royero y Clavijo (2001)<sup>426</sup> indican que el área de las cuencas actuales del Chicamocha y Sogamoso ostentan la totalidad de las litologías indicadoras de proveniencia identificadas (Solano, 2016)<sup>427</sup>. Cabe destacar dentro del grupo de los más abundantes se encuentra los clastos asociados al Granito de Pescadero, cuya unidad aflora únicamente en la cuenca del Chicamocha (Solano, 2016)<sup>428</sup>; de las columnas levantadas muestran que los diagramas de composición para dicha litología son los siguientes porcentajes:

**Tabla 12. Porcentaje composicional de clastos asociados al Granito de Pescadero**

	COLUMNAS ESTRATIGRÁFICAS					
	C1	C2	C3	C4	C5	C6
<b>% Clastos asociados al Granito de Pescadero</b>	3%	15%	0%	32%	7%	0%

Fuente: Elaborado a partir de información de Solano (2016)<sup>429</sup>.

Las columnas C1 y C2 localizadas al S del municipio de Girón, la columna C4 situada en la vereda Chocóa y la columna C5 ubicada en de la vereda Llanadas del municipio de Girón, expone una variación composicional de clastos asociados al Granito de Pescadero con una predominancia hacia el SW del sector S de la Mesa de Bucaramanga, mientras dichos clastos presenta una disminución composicional hacía en centro hasta lograr su ausencia en las columnas C3 y C6 (Solano, 2016)<sup>430</sup>. Esta distribución apoyaría la trayectoria propuesta del presente estudio, donde el

<sup>423</sup> *Ibíd.*, p. 76, 109, 111-112.

<sup>424</sup> SOLANO. *Op. cit.*, p. 163-164.

<sup>425</sup> WARD *et al.* *Op. cit.* Citado por SOLANO. *Op. cit.*, p. 123.

<sup>426</sup> ROYERO Y CLAVIJO. *Op. cit.* Citado por SOLANO. *Op. cit.*, p. 123.

<sup>427</sup> SOLANO. *Op. cit.*, p. 155.

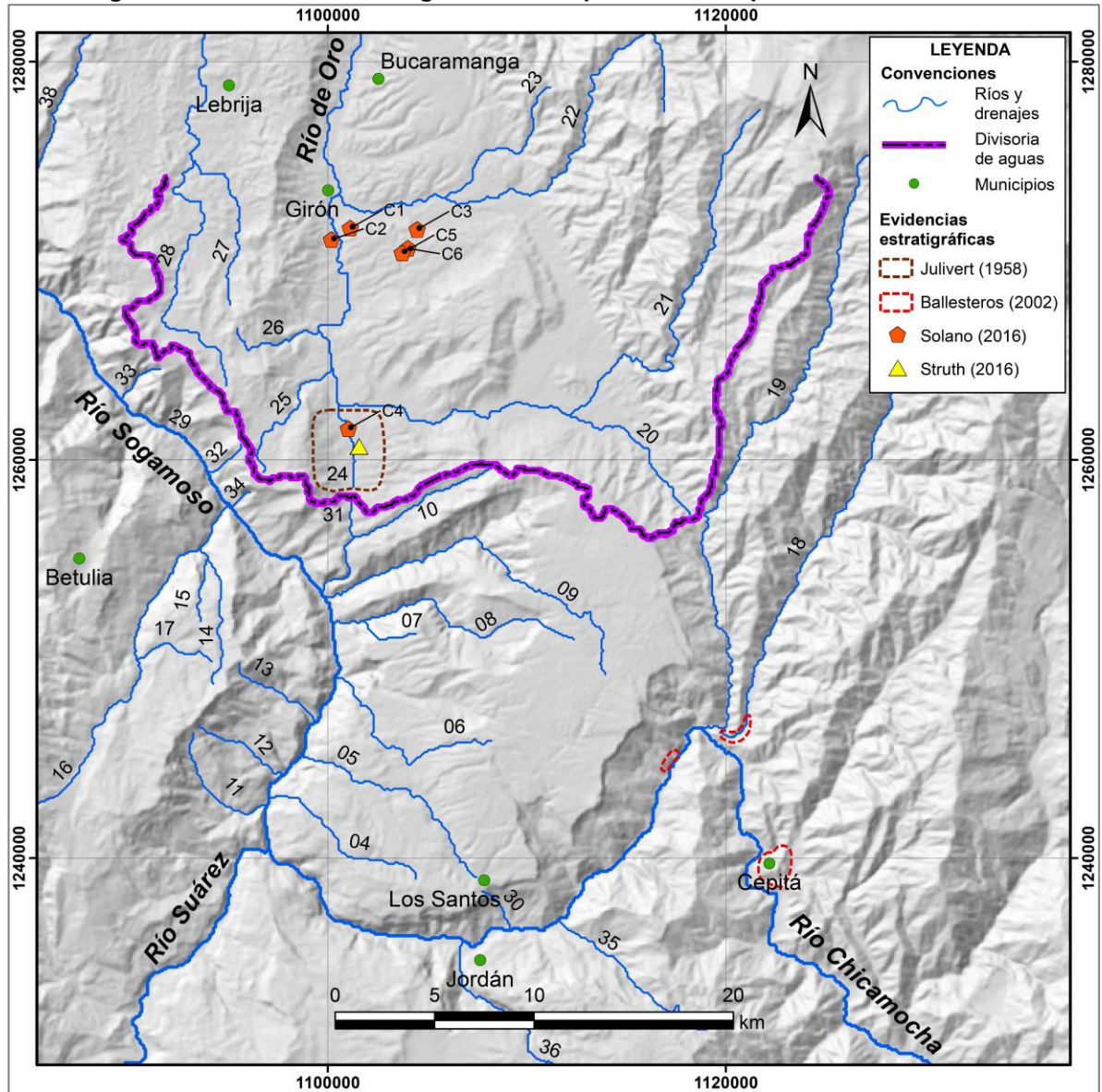
<sup>428</sup> *Ibíd.*, p. 147-155.

<sup>429</sup> *Ibíd.*, p. 127-131 ,134-137.

<sup>430</sup> *Ibíd.*, p. 129, 131, 135-136, 142, 163.

antiguo cauce del Chicamocha seguía su curso alineado a Falla Bucaramanga hasta la cabecera de la quebrada Grande (1), tomando un rumbo E hasta confluir en el río de Oro.

Figura 42. Evidencias estratigráficas de captura fluvial a partir de otros autores



Fuente: Elaborado a partir de información de Julivert (1958)<sup>431</sup>, Ballesteros (2002)<sup>432</sup>, Solano (2016)<sup>433</sup> y Struth (2016)<sup>434</sup>.

<sup>431</sup> JULIVERT. Op. cit., p. 34.

<sup>432</sup> BALLESTEROS. Op. cit., p. 76, 78, 111-112.

<sup>433</sup> SOLANO. Op. cit., p. 129, 131, 135-136, 142, 163.

<sup>434</sup> STRUTH. Op. cit., p. 71, 81.

Existen aluviones en la vereda de Chocóa que se extienden desde su cabecera de la quebrada La Gacha y que no pudieron ser depositados por la quebrada actual y que fue material depositado por el antiguo río Suárez (Julivert, 1958)<sup>435</sup>, la presencia de una terraza abandonada ubicada en el sector de la vereda Choca fue datada mediante nucleidos cosmogénicos terrestres <sup>10</sup>Be con una edad de 400 ka, tiempo que se estima la finalización del aporte sedimentario y captura fluvial del antiguo río Suárez (Struth, 2016)<sup>436</sup>.

Los depósitos sedimentarios de los autores referenciados (Figura 42) tienen en común que concuerdan con las descripciones de evidencia de captura fluvial. Estos depósitos se caracterizan por ser terrazas de ríos abandonados, compuestos por partículas sedimentarias con tamaños mayores que sobrepasan la capacidad de transporte del cauce actual o posee litologías vinculadas con áreas fuentes que se encuentran desconectadas de la cuenca actual (Struth, 2016)<sup>437</sup>; por ende hacen parte de la evidencia estratigráfica, que suele ser contundente en la demostración de una captura fluvial (Pastor, 2013)<sup>438</sup>.

## 8.2.2 Origen de los depósitos en la Mesa de Bucaramanga

El origen del depósito de la Formación Bucaramanga se basa en dos hipótesis: el primero los sedimentos fueron transportados y depositados por antiguos cauces del río Suárez y Chicamocha (Julivert, 1958<sup>439</sup>; García *et al.*, 2015<sup>440</sup>; Tesón *et al.*, 2015<sup>441</sup>; Solano, 2016<sup>442</sup>; Struth, 2016<sup>443</sup>); el segundo es un abanico aluvial cuya posible fuente principal de sedimentos es el río Suratá que discurre hacia el NE de

---

<sup>435</sup> JULIVERT. Op. cit., p. 34.

<sup>436</sup> STRUTH. Op. cit., p. 9, 67, 47-51, 71, 81-82, 87, 89, 92.

<sup>437</sup> *Ibíd.*, p. 29.

<sup>438</sup> PASTOR. Op. cit., p. 29.

<sup>439</sup> JULIVERT. Op. cit., p. 27, 35.

<sup>440</sup> GARCÍA, *et al.* Op. cit., p. 719-722.

<sup>441</sup> TESÓN, *et al.* Op. cit., p. 127-130.

<sup>442</sup> SOLANO. Op. cit., p. 41.

<sup>443</sup> STRUTH. Op. cit., p. 81-82.

Bucaramanga (Niño y Vargas, 1993<sup>444</sup>; INGEOMINAS, 2001<sup>445</sup>; INGEOMINAS, 2008<sup>446</sup>; Jiménez *et al.*, 2015<sup>447</sup>), donde el ápice del abanico aluvial de Bucaramanga se encuentra desplazados por la Falla Bucaramanga (INGEOMINAS, 2001<sup>448</sup>; INGEOMINAS, 2008<sup>449</sup>; Jiménez *et al.*, 2015<sup>450</sup>); este último de mayor aceptación obedece a un modelo de depositación de tres abanicos en el Pleistoceno: dos antiguos depositados uno por el río Suratá, el otro posiblemente por el río Frío y el aporte sedimentario del abanico más joven es del río Suratá (INGEOMINAS, 2001)<sup>451</sup>.

La Formación Bucaramanga de edad estimada entre 3 a 1 Ma (Jiménez *et al.*, 2015)<sup>452</sup> limitan al S con la Mesa de Ruitoque (INGEOMINAS, 2001<sup>453</sup>), sin embargo se ha encontrado evidencia que el material sedimentario situado al S del río Frío en su margen izquierdo aguas abajo no correspondería a abanico de Río Frío denominado por Niño y Vargas (1993)<sup>454</sup>, ni fue transportado por el río Frío como propone INGEOMINAS (2001)<sup>455</sup>; en base a características texturales y sedimentológicas permitieron reconocer que los depósitos ubicados al S del río Frío corresponde a la Formación Bucaramanga (Solano, 2016)<sup>456</sup>, descrita en trabajos previos (Niño y Vargas, 1994<sup>457</sup>; Bueno y Solarte, 1994<sup>458</sup>; INGEOMINAS, 2001<sup>459</sup>;

---

<sup>444</sup> NIÑO Y VARGAS. Op cit. Citado por SOLANO. Op. cit., p. 26.

<sup>445</sup> COLOMBIA. INGEOMINAS. Zonificación sísmogeotécnica indicativa del área metropolitana de Bucaramanga. Op cit. 19.

<sup>446</sup> COLOMBIA. INGEOMINAS. Modelo de evolución morfotectónica cuaternaria basado en evidencias estructurales, neotectónicas y paleosismológicas de los principales sistemas de falla en la región de Bucaramanga. Citado por JIMÉNEZ *et al.* Op cit. p. 16.

<sup>447</sup> JIMÉNEZ *et al.* Op cit. p. 16.

<sup>448</sup> COLOMBIA. INGEOMINAS. Zonificación sísmogeotécnica indicativa del área metropolitana de Bucaramanga. Op cit. 263.

<sup>449</sup> COLOMBIA. INGEOMINAS. Modelo de evolución morfotectónica cuaternaria basado en evidencias estructurales, neotectónicas y paleosismológicas de los principales sistemas de falla en la región de Bucaramanga. Op. cit. Citado por JIMÉNEZ *et al.* Op cit. p. 20.

<sup>450</sup> JIMÉNEZ *et al.* Op cit. p. 20.

<sup>451</sup> COLOMBIA. INGEOMINAS. Zonificación sísmogeotécnica indicativa del área metropolitana de Bucaramanga. Op cit. 41-42.

<sup>452</sup> JIMÉNEZ. *et al.* Op. cit., p. 19-21.

<sup>453</sup> COLOMBIA. INGEOMINAS. Zonificación sísmogeotécnica indicativa del área metropolitana de Bucaramanga. Op cit. 19.

<sup>454</sup> NIÑO Y VARGAS. Op. cit. Citado por SOLANO. Op. cit., p. 162

<sup>455</sup> COLOMBIA. INGEOMINAS. Zonificación sísmogeotécnica indicativa del área metropolitana de Bucaramanga. Op cit. Citado por SOLANO. Op. cit., p. 162.

<sup>456</sup> SOLANO. Op. cit., p. 64.

<sup>457</sup> NIÑO Y VARGAS. Op. cit. Citado por SOLANO. Op. cit., p. 162.

<sup>458</sup> BUENO, E. y SOLARTE, A. Geología, Geotecnia y Comportamiento Erosivo del Área de Reserva Forestal de Bucaramanga. 1994. Trabajo de grado para título de Geólogo. Universidad Industrial de Santander. 1994. Citado por SOLANO. Op. cit., p. 162.

<sup>459</sup> COLOMBIA. INGEOMINAS. Zonificación sísmogeotécnica indicativa del área metropolitana de Bucaramanga. Op cit. Citado por SOLANO. Op. cit., p. 162.

INGEOMINAS, 2005<sup>460</sup>). De otro lado, los depósitos de la Formación Bucaramanga se identifican por su vasta dimensión y considerable espesor (300-400m) para haber sido transportados y depositados por la actual red fluvial (Julivert, 1958)<sup>461</sup>, no conservan su morfología cónica debido a su prolongación hacia el S de la vereda Chocóa y del municipio de Piedecuesta, la exposición de estructuras primarias sedimentarias y la presencia de clastos muy redondeados y esféricos en capas gravosas hacen dudar que se trate de un abanico aluvial (Solano, 2016)<sup>462</sup>; además la proveniencia de estos clastos manifiesta que su principal área fuente se encuentra al S y al SE de la Mesa de Bucaramanga en las cuencas actuales de los ríos Sogamoso y Chicamocha que al presente se encuentra desconectadas (Solano, 2016)<sup>463</sup>.

El ambiente de la Formación Bucaramanga es de transporte fluvial con alternancia de material aluvial (INGEOMINAS, 2001)<sup>464</sup>, igualmente se observa estos dos ambientes que caracterizan al Miembro Órganos (Lima y Medina, 2015)<sup>465</sup>. Conforme a los argumentos expuesto se sugiere la fuente de Formación Bucaramanga: un gran aporte fluvial de los paleocauces del Suárez y del Chicamocha con una posible contribución de material de abanico aluvial como componente lateral (Tesón et al, 2015<sup>466</sup>; Solano 2016<sup>467</sup>), provenientes del río Frío, del Hato, río de Oro y Suratá (Solano, 2016)<sup>468</sup>.

---

<sup>460</sup> COLOMBIA. INGEOMINAS. Zonificación de amenaza por movimientos en masa de algunas laderas de los municipios de Bucaramanga, Floridablanca, Girón y Piedecuesta. Op. cit. Citado por SOLANO. Op. cit., p. 162.

<sup>461</sup> JULIVERT. Op. cit., p. 27, 34.

<sup>462</sup> SOLANO. Op. cit., p. 163.

<sup>463</sup> *Ibíd.*, p. 142, 156, 163-164.

<sup>464</sup> COLOMBIA. INGEOMINAS. Zonificación sismogeotécnica indicativa del área metropolitana de Bucaramanga. Op cit. 19.

<sup>465</sup> LIMA, C. y MEDINA, J. Evolución climática registrada y estratigrafía del Miembro Órganos de la Formación Bucaramanga. Trabajo de grado para optar al título de geólogo. Universidad Industrial de Santander. 2015, p. 100.

<sup>466</sup> TESÓN, Eliseo et al. Capturas fluviales recientes de los ríos Chicamocha y Suárez: El origen de la Terraza de Bucaramanga y causas de la reorganización de la red de drenaje. XV Congreso Colombiano de Geología (Agosto 31 – Septiembre 5, 2015: Bucaramanga, Colombia). Ponencia Oral. 02 de septiembre de 2015.

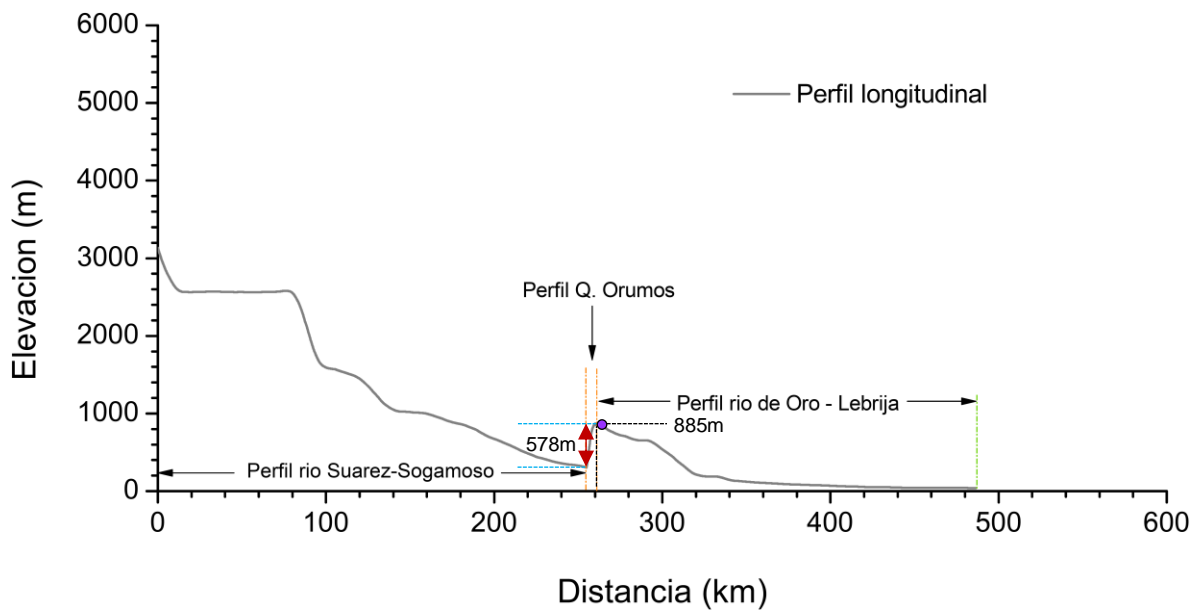
<sup>467</sup> SOLANO. Op. cit., p. 164.

<sup>468</sup> *Ibíd.*, p. 164.

### 8.3 ESTIMACIÓN DE LA TASA DE INCISIÓN

En este trabajo la tasa de incisión fluvial fue estimada de la diferencia en altura entre la terraza abandonada y el cauce actual del río Suárez como se ilustra en la Figura 43, dividido en la edad de una terraza abandonada cuyos los depósitos pertenecen a la Formación Bucaramanga. La edad de la terraza asociada al final del aporte sedimentario del paleocauce del Suárez y posterior captura son tomados de la publicación de Struth (2016)<sup>469</sup>; la unidades de la tasa de incisión se representa en milímetros por ka (kiloaños, unidad de tiempo equivalente a mil años) [mm/ka].

Figura 43. Incisión fluvial del paleocauce del río Suárez



Los datos mencionados se encuentran registrados en la Tabla 13 y la tasa de incisión se estima en 1445 mm/ka.

<sup>469</sup> STRUTH. Op. cit., p. 9, 67, 71. 81-82, 87, 89, 92.

Tabla 13. Estimación de la tasa de incisión del río Suárez

ALTURA DE LA TERRAZA [mm]	ALTURA CAUCE ACTUAL [mm]	INCISIÓN [mm]	EDAD DE LA TERRAZA ABANDONADA [ka]	AUTOR	TASA DE INCISIÓN [mm/ka]
885000	307000	578000	400	Struth (2016)	1445

Fuente: Elaborado a partir de información de Struth (2016)<sup>470</sup>.

#### 8.4 ORDEN SECUENCIAL DE LA CAPTURA DEL SUÁREZ Y CHICAMOCHA

La primera hipótesis describe que el Chicamocha es capturado por un afluente del río Suárez, posteriormente un afluente del Magdalena (actual río Sogamoso) por erosión remontante captura la quebrada Zapatoca y más tarde el antiguo cauce del Suárez (Julivert, 1958)<sup>471</sup>, aunque el autor no expone sus razones del establecimiento de este orden se interpretaría que la captura del Chicamocha se debió a un afluente del río Suarez cuando este era parte de la cuenca del río de Oro, un *knickpoint* migraría aguas arriba desde esa misma cuenca dejando el vestigio de su onda erosiva. No obstante, los afluentes del río de Oro tienen escasos *knickpoints* y una incisión poco significativa a comparación de los afluentes del Sogamoso (Figura 34, Figura 35, Figura 36), se aprecia el poco encajonamiento del primero respecto al segundo (Tabla 9). El río de Oro apenas escavó los materiales blandos de la terraza estableciendo un perfil distante de lograr su equilibrio (Julivert, 1958)<sup>472</sup>.

De otro lado, los análisis topográficos en la cordillera Oriental en base al parámetro chi ( $\chi$ ) indican que el antiguo Suárez fue capturado primero que el antiguo Chicamocha (Struth, 2016)<sup>473</sup>, en base a los cálculos del parámetro mencionado un gran número de *knickpoints* en los perfiles fluviales estarían asociados a un gran cantidad de eventos de capturas en el sector más antiguo del drenaje (Giachetta, 2015)<sup>474</sup>, como los tributarios del Sogamoso son los que tiene mayor cantidad de

<sup>470</sup> *Ibíd.*, p. 9, 67, 71. 81-82, 87, 89, 92.

<sup>471</sup> JULIVERT. *Op. cit.*, p. 38.

<sup>472</sup> *Ibíd.*, p. 38.

<sup>473</sup> STRUTH. *Op. cit.*, p. 82.

<sup>474</sup> GIACHETTA E., 2015. Personal communication. Citado por STRUTH. *Op. cit.*, p. 82.

*knickpoints* (Figura 31), respaldaría la hipótesis de Struth (2016). Según su modelo de evolución propuesto, un tributario del Magdalena capturó el río Suárez alrededor de los 400ka, tiempo estimado del abandono de la depositación de una terraza adyacente al *wind gap* asociado al antiguo cauce del Suárez, la erosión remontante se propagó aguas arriba después de la captura aportando un mayor potencial erosivo a los tributarios del Suárez comparado con las cuencas adyacentes, finalmente un afluente del Suárez en su ajuste a un nuevo nivel base logra capturar el Chicamocha estableciendo la configuración de la red de drenaje actual (Struth, 2016)<sup>475</sup>. Asimismo, los análisis topográficos y fluviales de este trabajo soportarían esta hipótesis.

## 8.5 EVOLUCIÓN DEL PAISAJE Y REORGANIZACIÓN A FUTURO DE LA ZONA DE ESTUDIO

Los cálculos del parámetro chi ( $\chi$ ) permite saber el estado dinámico de la red de drenaje, predecir la expansión y reducción de las cuencas y estimar áreas potenciales de captura (Perron y Royden, 2012<sup>476</sup>; Willett *et al.*, 2014<sup>477</sup>); la dinámica de la red fluvial tiende a establecer que valores más altos de chi ( $\chi$ ) en la divisoria tienen mayor potencial de ser capturado, mientras los valores más bajos de chi ( $\chi$ ) en la divisoria se le atribuye el carácter de cauce capturador o agresor (Willett *et al.*, 2014)<sup>478</sup>. La Figura 44 muestra el mapa de chi ( $\chi$ ) de la zona de estudio presenta los valores más altos en la cabecera de la cuenca Lebrija, sufriendo un patrón agresivo de los afluentes del Sogamoso y aludiendo un desplazamiento hacia el N

---

<sup>475</sup> STRUTH. Op. cit., p. 82.

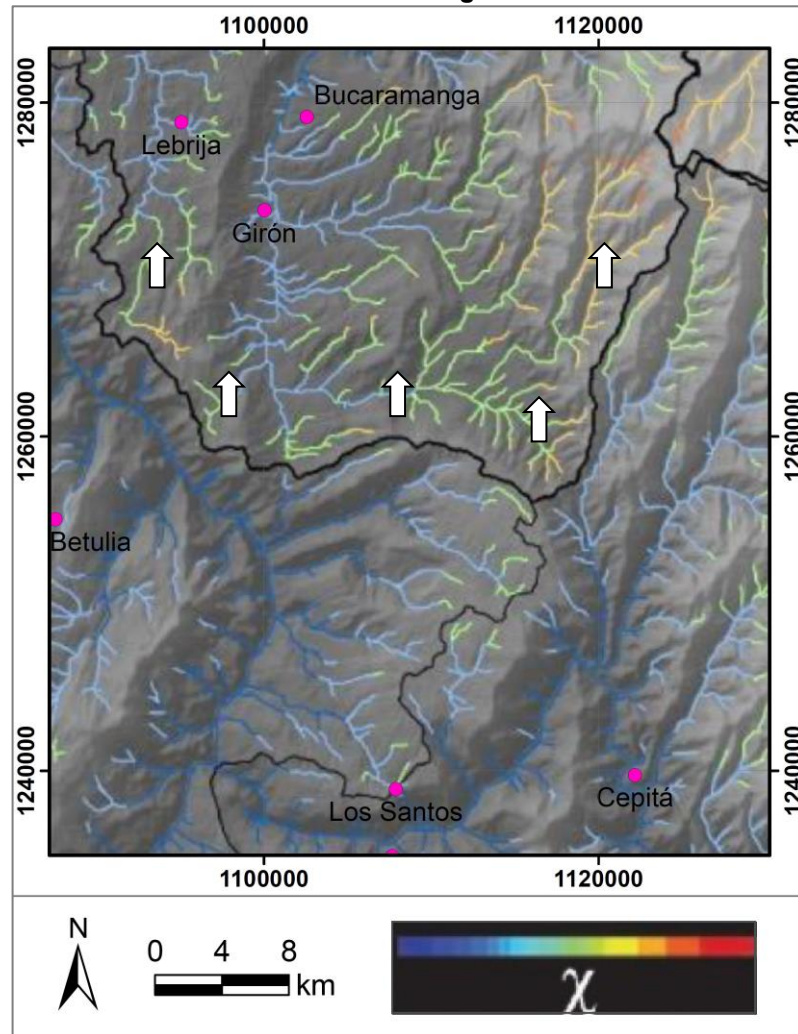
<sup>476</sup> PERRON, J and ROYDEN, Leigh. An integral approach to bedrock river profile analysis. *Earth Surface Processes and Landforms* [online]. 2013, vol. 38, no 6, p. 570-576. Available from internet: <<http://onlinelibrary.wiley.com/wo1/doi/10.1002/esp.3302/full>>. Citado por STRUTH, Lucía y TEIXELL, Antonio. Dinámica fluvial en rifts invertidos a partir del parámetro  $\chi$ : aplicación a la Cordillera Oriental de Colombia y a otras cordilleras de referencia. *Geogaceta* [online]. 2016, vol. 60, p. 55-58. Disponible en internet: <[http://www.sociedadgeologica.es/archivos/geogacetas/geo60/Geogaceta\\_60\\_completa.pdf](http://www.sociedadgeologica.es/archivos/geogacetas/geo60/Geogaceta_60_completa.pdf)>.

<sup>477</sup> WILLETT, Sean. et al. Dynamic reorganization of river basins. *Science* [online], 2014, vol. 343, no 6175, p. 1248765. Available from internet: <<http://science.sciencemag.org/content/343/6175/1248765>>. Citado por STRUTH Y TEIXELL. Op. cit., p. 56.

<sup>478</sup> WILLET *et al.* Op. cit. Citado por STRUTH Y TEIXELL. Op. cit., p. 56.

de la divisoria de aguas que separa las cuencas Lebrija y Chicamocha-Sogamoso (Struth, 2016)<sup>479</sup>.

**Figura 44. Mapa de valores chi ( $\chi$ ) enfocado a la divisoria de aguas de las cuencas Lebrija y Chicamocha-Sogamoso**



Fuente: Tomado y modificado de Struth (2016)<sup>480</sup>.

Teniendo el presente escenario, las cuencas Chicamocha y Sogamoso se están expandiendo mientras que el área de la cuenca Lebrija se está reduciendo, para que la red de drenaje se equilibre la divisoria se desplazará hacia el N (flechas color

<sup>479</sup> STRUTH. Op. cit., p. 79.

<sup>480</sup> *Ibíd.*, p. 78.

blanco) donde encontrará zonas potenciales de captura. Al examinar un grupo de tres afluentes que discurren por la ladera del Macizo de Santander (Figura 45) ilustran que uno de ellos sufriría una captura fluvial: el perfil del río Umpalá (Figura 45, C) es el más cercano al equilibrio con un *knickpoint* a los 2070 m de altitud; el perfil de río Manco (Figura 45, B) se encuentra más lejano del equilibrio respecto al perfil del río Umpalá, tiene dos *knickpoints* a una altura de 1995 m y 1500 m, se observa la proyección de un paleoperfil que alcanza una altura aproximada de 750 m a 50 km de longitud iniciando de su cabecera, a medida que logró el equilibrio su perfil será semejante al actual perfil del río Umpalá que comparten un mismo nivel base local en la cuenca Chicamocha; finalmente el perfil de la quebrada La Moza (Figura 45, A) correspondiente a la cuenca Lebrija se encuentra menos incidido respecto a los afluentes del Chicamocha (Figura 45, B y C), presenta dos *knickpoints* elevados a 1530 m y 2077 m, su cauce que continúa por el río de Oro alcanza una altura de 713 m a 50 km de longitud desde su cabecera, un valor similar a la altura alcanzada por el paleocauce del río Manco.

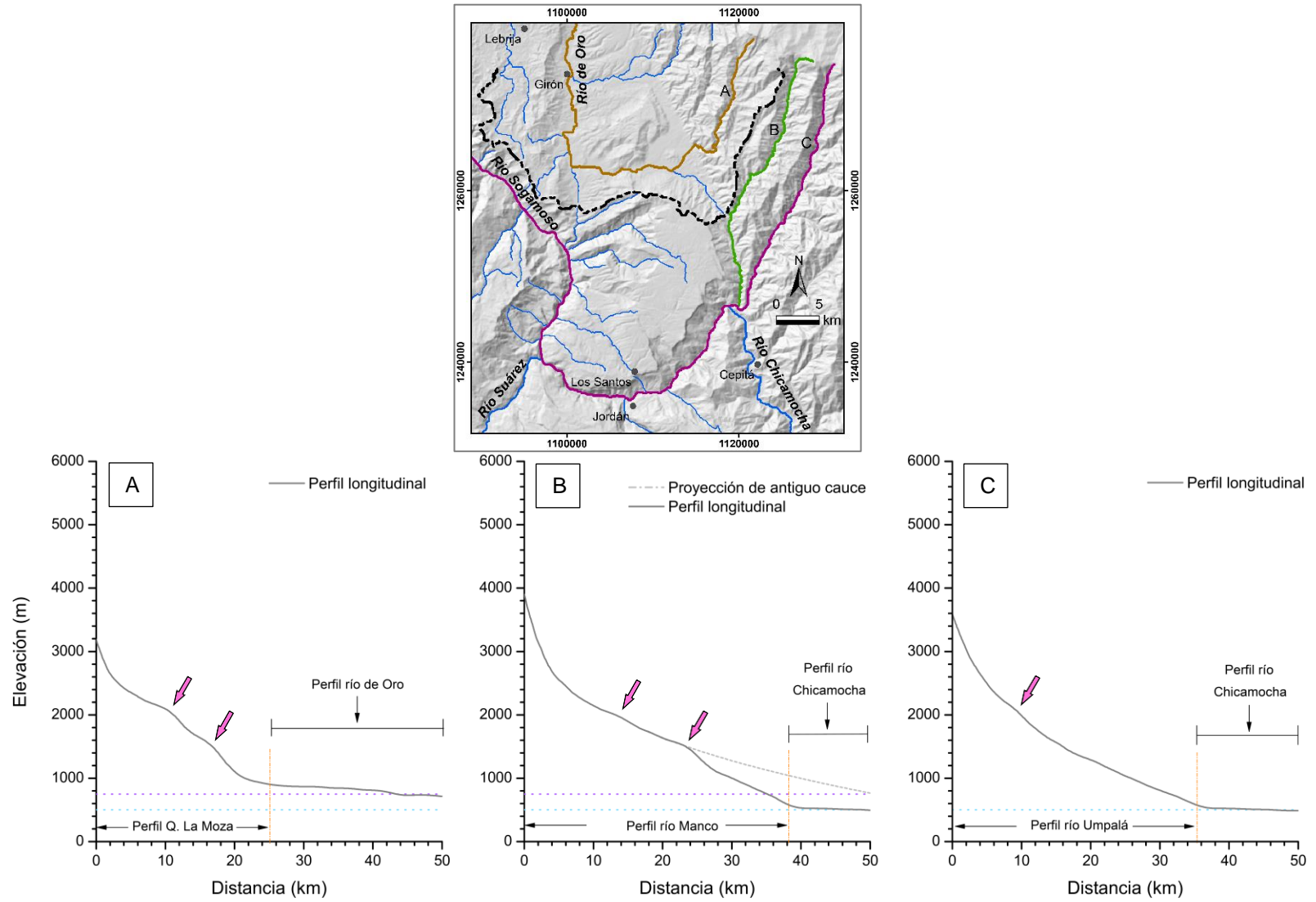
Para dar lugar a una captura fluvial se requiere la interacción de dos cuencas cercanas y separadas por una divisoria de aguas, que involucre dos cauces con una diferencia topográfica considerable y potenciales erosivos disímiles (Small, 1978<sup>481</sup>; Pastor, 2013<sup>482</sup>), la erosión remontante avanzará hacia el N y el cauce de nivel base mayor (Figura 45, A) posiblemente será capturado por un afluente del cauce de nivel base menor (Figura 45, B), reduciendo en un futuro el área de drenaje de la cuenca Lebrija. Conservando el trazado inicial del cauce de la quebrada La Moza cuyas aguas serían transferidas a la cuenca adyacente, su nivel base caería para igualarse al nivel base local de la cuenca Chicamocha que actualmente domina los ríos Manco y Umpalá; en caso de no preservar el trazado inicial del cauce capturado se trataría de un proceso de *beheading*.

---

<sup>481</sup> SMALL. Op. cit. Citado por BISHOP. Drainage rearrangement by river capture, beheading and diversion. Op. cit., p. 462.

<sup>482</sup> PASTOR. Op. cit., p. 30.

Figura 45. Representación de una posible captura fluvial



## 8.6 LOS PARÁMETROS QUE CONTROLAN LA INCISIÓN FLUVIAL

El perfil longitudinal evolutivo de cauces de lecho rocoso en condiciones *steady-state* fue modelado mediante la ley potencial de escorrentía o *stream power law* (ver sección 3.1.2), esta ley describe que la incisión fluvial vertical  $E$  se formula de la siguiente forma:

$$E = KA^m S^n \quad (9)$$

Para evaluar los parámetros de la ecuación (9) se estimará una relación de orden de los mismos en las cuencas Suárez y Chicamocha, para comprender el comportamiento de la incisión fluvial en ambas cuencas. Los valores de  $m$  y  $n$  son constantes positivas que relaciona los procesos erosivos, la cuenca hidrológica y geometría del canal.

La primera variable a evaluar será el área  $A$ , la cuenca del río Suárez posee una extensión de 1.026.655 ha y la cuenca Chicamocha comprende un área de 957.412 ha, siendo de mayor dimensión la primera (Tabla 4); la segunda variable  $S$  es la pendiente del lecho, como el gradiente de un río es empinado en la cabecera y está varía disminuyendo a lo largo del perfil longitudinal, se estimará la relación de orden de  $S$  calculando la pendiente promedio  $S_m$  (Tabla 14) con la siguiente expresión:

$$S_m = \frac{h_{m\acute{a}x} - h_{m\acute{i}n}}{L_c}$$

Donde se tomará el valor de la altitud de la cabecera del cauce principal de cada cuenca menos la altura del cauce en su confluencia con el río Sogamoso, dividiendo por la longitud total del cauce principal de la cuenca respectiva.

**Tabla 14. Estimación de la pendiente promedio del cauce por cuenca**

CUENCA	ALTURA CABECERA [m]	ALTURA CONFLUENCIA [m]	LONGITUD DEL CAUCE [km]	$S_m$ [m/km]
Suárez	3105	343	241	11,46
Chicamocha	3246	343	271	10,71

La pendiente promedio de la cuenca Suárez es de 11,46 m/km mientras la cuenca Chicamocha posee un valor de 10,71 m/km, estimando un valor mayor de la variable  $S$  a la cuenca del Suárez. Finalmente, el coeficiente de erosión o erodabilidad  $K$  es inversamente proporcional a la dureza de la roca del lecho; la constitución litológica del lecho principal de la cuenca Suárez se conforma principalmente de rocas sedimentarias, de otro lado el cauce principal de la cuenca Chicamocha comprende aproximadamente una cuarta parte de rocas ígneas y metamórficas, la longitud restante se conforma de rocas sedimentarias. Las litologías blandas son más erodibles que las litologías de mayor dureza (Pastor, 2013)<sup>483</sup>, por tal razón el lecho del Chicamocha debería ser más resistente.

**Tabla 15. Relación de orden de los parámetros de la ecuación de incisión fluvial por cuenca**

VARIABLES QUE CONTROLAN LA INCISIÓN FLUVIAL		RELACION DE ORDEN DE VARIABLES
$K$	Coeficiente dimensional de erosión	$K_{SUÁREZ} > K_{CHICAMOCHA}$
$A$	Área de drenaje	$A_{SUÁREZ} > A_{CHICAMOCHA}$
$S$	Pendiente del lecho	$S_{SUÁREZ} > S_{CHICAMOCHA}$

La Tabla 15 presenta la relación de orden de los parámetros para cada cuenca, siendo mayores para la cuenca del Suarez, por ende se cumpliría la relación  $E_{SUÁREZ} > E_{CHICAMOCHA}$ , sin embargo los análisis de los perfiles del Suárez y Chicamocha infieren lo contrario (ver sección 7.3.3, páginas 138-140): el río Chicamocha muestra un perfil más erosionado y cercano a su nivel base comparado con el Suárez, además la zona de estudio expone un encajonamiento mayor del cauce del Chicamocha en el sector de la Mesa de San Gil.

<sup>483</sup> PASTOR. Op. cit., p. 32-33.

La relación de orden de los parámetros de la ecuación (9) al parecer no refleja las observaciones de este trabajo,  $A$  y  $B$  se estimaron de mediciones que confieren una mayor precisión en la cuantificación de estas variables, el coeficiente  $K$  no contaba con datos cuantitativos por consiguiente se estimó si este era mayor o menor en base a la correlación previamente mencionada entre el tipo de litología que conforma el lecho y su erodabilidad (ver sección 7.3.3, página 138); conforme a la ley de escorrentía, la erodabilidad o coeficiente de erosión  $K$  depende de la litología, clima y carga sedimentaria (Whipple y Tucker, 1999)<sup>484</sup>, siendo  $K$  el parámetro estimado con menor precisión es necesario profundizar en los factores que pueden afectar su comportamiento.

Respecto a la litología, el Granito de Pescadero conforma parte del lecho del río Chicamocha, está siendo afectado por la actividad de la Falla Bucaramanga logrando variar sus características texturales y propiedades geomecánicas (González y Jiménez, 2015)<sup>485</sup>. Ensayos de comprensión uniaxial han demostrado que el Granito de Pescadero ubicado en los alrededores del corregimiento de Umpalá posee un módulo de Young o elasticidad [megapascal, Mpa] de 313 MPa, representando alrededor del 0,5% del valor estandarizado de un granito no alterado (González y Jiménez, 2015)<sup>486</sup> que es 68.948 MPa (Beer y Russel, 1994)<sup>487</sup>; incluso, confrontado con el módulo de Young de una arenisca no alterada que es de 41.369 MPa (Beer y Russel, 1994)<sup>488</sup> representa aproximadamente un 0,8% de su valor, presumiendo que el Granito de Pescadero por su estado de alteración, podría ser mucho más erodible que una roca sedimentaria y probablemente otro tipo de rocas cercanas a esta falla estaría en condiciones geomecánicas similares.

---

<sup>484</sup> WHIPPLE and TUCKER. Dynamics of the stream power river incision model: Implications for height limits of mountain ranges, landscape response timescales, and research needs. Op. cit. p. 17664.

<sup>485</sup> GONZÁLEZ, Jenifer y JIMÉNEZ, Gabriel. Análisis estructural y características microtectónicas de un segmento de la Falla Bucaramanga en los alrededores del corregimiento Umpalá, Santander, Trabajo de grado para optar al título de geólogo. Universidad Industrial de Santander. 2015, p. 1-184.

<sup>486</sup> GONZÁLEZ Y JIMÉNEZ. Op. cit., p. 126

<sup>487</sup> BEER, F., Russell, J. and Eisenberg, E. Mecánica vectorial para ingenieros, estática. 1994. McGrawhill. No. 8, p 1-631. Citado por GONZÁLEZ Y JIMÉNEZ. Op. cit., p. 126.

<sup>488</sup> BEER et al. Op. cit. Citado por GONZÁLEZ Y JIMÉNEZ. Op. cit., p. 126.

Otros estudios han demostrado que las tasas altas de denudación han sido relacionadas con la alta erodabilidad de las rocas (e.g. Salgado *et al.*, 2008<sup>489</sup>; Chadwick *et al.*, 2013<sup>490</sup>; Bierman *et al.*, 2014<sup>491</sup>; Pupim *et al.*, 2015<sup>492</sup>); las tasas de erosión calculadas mediante análisis de nucleidos cosmogénicos terrestres <sup>10</sup>Be exponen un rango de valores entre 18-64 mm/ka para la mayor parte extensión de la cuenca Suárez y entre 100-228 mm/ka para el área total de la cuenca Chicamocha (Struth, 2016)<sup>493</sup>. Adicionalmente, una muestra puntual sobre el cauce del río Suárez y otra sobre el cauce de río Chicamocha, ambas ubicadas aproximadamente a 20 km aguas arriba del punto de confluencia con el Sogamoso, exponen que la tasa de incisión de la primera muestra es de 64 mm/ka cuyo lecho se conforma del alternancias de areniscas y shales, en cambio la tasa de incisión para la segunda muestra es de 228 mm/ka conformado por rocas del basamento y baja cobertura vegetal (Struth, 2016)<sup>494</sup>.

En relación con el clima, el valle del Chicamocha se caracteriza por un microclima árido (Struth, 2016)<sup>495</sup>, la clasificación de Caldas-Lang en el área de estudio destaca dos regiones climáticas Cálido Árido sobre el valle entre los tramos Cepitá-Pescadero y Pescadero-Jordán (Figura 16) y la imagen satelital muestra escasa cobertura vegetal sobre el área que rodea el trazado fluvial paralelo a la Falla Bucaramanga (Figura 40). Las tasas de precipitación varían entre 501-2000 mm (Figura 15, Tabla 5) denotando sectores con menos precipitaciones en la cuenca alta del Chicamocha y áreas rodeadas por tramos fluviales limitados, entre ellos el

---

<sup>489</sup> SALGADO, André, et al. Relief evolution of the Quadrilátero Ferrífero (Minas Gerais, Brazil) by means of (<sup>10</sup>Be) cosmogenic nuclei. *Zeitschrift für Geomorphologie* [online], 2008. vol. 52, no 3, p. 317-323. Available from internet: <[http://www.schweizerbart.de/papers/zfg/detail/52/65731/Relief\\_evolution\\_of\\_the\\_Quadrilatero\\_Ferrifero\\_Minas\\_Gerais\\_Brazil\\_by\\_means\\_of\\_10Be\\_cosmogenic\\_nuclei](http://www.schweizerbart.de/papers/zfg/detail/52/65731/Relief_evolution_of_the_Quadrilatero_Ferrifero_Minas_Gerais_Brazil_by_means_of_10Be_cosmogenic_nuclei)>. Citado por STRUTH. Op. cit., p. 63.

<sup>490</sup> CHADWICK, Oliver, et al. Shaping post-orogenic landscapes by climate and chemical weathering. *Geology* [online]. 2013, vol. 41, no 11, p. 1171-1174. Available from internet: <<https://pubs.geoscienceworld.org/geology/article-abstract/41/11/1171/131059/shaping-post-orogenic-landscapes-by-climate-and?redirectedFrom=fulltext>>. Citado por STRUTH. Op. cit., p. 63.

<sup>491</sup> BIERMAN, Paul, et al. A cosmogenic view of erosion, relief generation, and the age of faulting in southern Africa. *GSA Today*, 2014, vol. 24, no 9, p. 4-11. Available from internet: <<https://www.geosociety.org/gsatoday/archive/24/9/article/11052-5173-24-9-4.htm>>. Citado por STRUTH. Op. cit., p. 63.

<sup>492</sup> PUPIM, Fabiano do Nascimento, et al. Erosion rates and landscape evolution of the lowlands of the Upper Paraguay River basin (Brazil) from cosmogenic <sup>10</sup>Be. *Geomorphology*, 2015, vol. 234, p. 151-160. Available from internet: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X15000355>>. Citado por STRUTH. Op. cit., p. 63.

<sup>493</sup> STRUTH. Op. cit., p. 55.

<sup>494</sup> *Ibid.*, p. 62.

<sup>495</sup> *Ibid.*, p. 63.

tramo entre el municipio de Paz del Río (Boyacá) y el sitio denominado La Rinconada (Boyacá), el tramo entre los municipios Capitanejo (Santander) y Ricaurte (Cundinamarca) y finalmente el tramo fluvial entre el municipio de Cepitá (Santander) hasta el punto de confluencia con el río Sogamoso; no obstante, la tasas de precipitación podrían ser no muy certeras debido a las pocas estaciones pluviométricas que limitan representar las condiciones reales, estimando que estas sean menores por la sombra orográfica generada por el Macizo la Floresta, Macizo de Santander y la Sierra Nevada del Cocuy (Struth, 2016)<sup>496</sup>.

En cuanto a la carga sedimentaria de los ríos Suárez y Chicamocha, no se encontró información bibliográfica de los datos requeridos, sin embargo se puede indagar sobre la información de caudales (Tabla 4) siendo mayor el río Suárez con 195 m<sup>3</sup>/s y menor para la Chicamocha con 135 m<sup>3</sup>/s, considerando que tampoco es un factor relevante en la capacidad de incisión del lecho. Es importante señalar que las mediciones en estaciones hidrométricas en Santander han demostrado que existe una relación directa del régimen del caudal con el de lluvias, es decir al aumentar la precipitación aumentan los valores registrados del caudal (Secretaria de planeación de Santander y UIS, 2011)<sup>497</sup>. De otro lado, se tienen evidencias consistentes que las dos fases del *ENSO* afectan vigorosamente la hidrología en Colombia (Poveda y Mesa, 1993<sup>498</sup>; Poveda, 1994<sup>499</sup>; Poveda y Mesa, 1995<sup>500</sup>; Poveda y Mesa,

---

<sup>496</sup> *Ibíd.*, p. 63.

<sup>497</sup> SANTANDER. SECRETARÍA DE PLANEACIÓN y UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER. *Op. cit.* p. 118.

<sup>498</sup> POVEDA, Germán y MESA, Oscar. Methodologies to predict the Colombian hydrology considering the ENSO event (in Spanish). *Revista Atmósfera*, 1993. vol. 16, p. 26-39. Citado por POVEDA, Germán. *¿Atractores extraños (CAOS) en la hidro-climatología de Colombia?* *Revista Académica Colombiana Ciencias de la Tierra* [en línea], noviembre 1997. vol. 21, no 81. Disponible en internet: <<http://www.docentes.unal.edu.co/gpoveda/docs/Poveda%20Caos%20Colombia%20ACCEFYN.pdf>>.

<sup>499</sup> POVEDA, G. Funciones Ortogonales Empíricas en el análisis de la relación entre los caudales medios en Colombia y las temperaturas de los océanos Pacífico y Atlántico. *Memorias del XVI Congreso Latinoamericano de Hidráulica e Hidrología*, IAHR, Santiago de Chile, 1994. vol. 4, p. 131-144. En: *Cuantificación del efecto de El Niño y La Niña sobre los caudales en Colombia*, *Memorias del XVI Congreso Latinoamericano de Hidráulica e Hidrología*, IAHR, Santiago de Chile. 1994. p. 1996. Citado por POVEDA. *¿Atractores extraños (CAOS) en la hidro-climatología de Colombia?* *Op. cit.*, p. 433.

<sup>500</sup> POVEDA, Germán y MESA, Oscar. The relationship between ENSO and the hydrology of tropical South America. The case of Colombia. *Proceedings of the Fifteenth Annual American Geophysical Union Hydrology Days*, Fort Collins, CO, 1995. *Hydrology Days Publications*. p. 227-236. Citado por POVEDA. *¿Atractores extraños (CAOS) en la hidro-climatología de Colombia?* *Op. cit.*, p. 433.

1996<sup>501</sup>; Poveda y Mesa, 1997<sup>502</sup>; Poveda, 1997<sup>503</sup>). El ciclo de ENSO o ENOS (El Niño, La Niña-Oscilación del Sur) presenta una variedad climática a escala inter-anual que afecta la temperatura del aire, la radiación solar y las precipitaciones (Montealegre, 2014)<sup>504</sup>. Respecto al caudal, el Niño trae bajas precipitaciones y descargas bajas en los ríos y La Niña provoca mayores precipitaciones y aumento en las corrientes de agua (Poveda y Mesa, 1997<sup>505</sup>; Poveda, 1997<sup>506</sup>; Restrepo y Kjerfve, 2000<sup>507</sup>); el estudio realizado por Restrepo y Kjerfve (2000)<sup>508</sup> sobre el río Magdalena encontró que el caudal y la carga sedimentaria están fuertemente ligadas al ciclo de El Niño y La Niña, mostrando que los valores de la carga sedimentaria promedio es menor durante El Niño y mayor durante La Niña, aunque la fase de La Niña tiene mayor impacto que la fase de El Niño.

La carga sedimentaria desempeña doble función: provee herramientas de abrasión y fractura del lecho, y puede proteger el lecho de la erosión si la carga sedimentaria es abundante (Sklar y Dietrich, 1997<sup>509</sup>; Slingerland *et al.*, 1997<sup>510</sup>; Howard, 1998<sup>511</sup>; Sklar y Dietrich, 1998<sup>512</sup>; Slingerland *et al.*, 1998<sup>513</sup>); el flujo sedimentario

<sup>501</sup> POVEDA, Germán y MESA, Oscar. The North Atlantic Oscillation and its influence on the hydro-climatology of Colombia (in Spanish). Memorias del XVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica e Hidrología, IAHR, Guayaquil, Ecuador, 1996. vol. II, p. 343-354. Citado por POVEDA. ¿Atractores extraños (CAOS) en la hidro-climatología de Colombia? Op. cit., p. 433.

<sup>502</sup> POVEDA, Germán y MESA, Oscar. Feedbacks between Hydrological Processes in Tropical South America and Large-Scale Ocean-Atmospheric Phenomena. Journal of climate [online], 1997, vol. 10, no 10, p. 2690-2702. Available from internet: <[http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442\(1997\)010<2690:FBHPIT>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442(1997)010<2690:FBHPIT>2.0.CO;2)>.

<sup>503</sup> POVEDA. ¿Atractores extraños (CAOS) en la hidro-climatología de Colombia? Op. cit., p. 431-433.

<sup>504</sup> MONTEALEGRE. Op. cit., p. 1-134.

<sup>505</sup> POVEDA y MESA. Oscar. Feedbacks between Hydrological Processes in Tropical South America and Large-Scale Ocean-Atmospheric Phenomena. Op. cit., p. 2693.

<sup>506</sup> POVEDA. ¿Atractores extraños (CAOS) en la hidro-climatología de Colombia? Op. cit., p. 433.

<sup>507</sup> RESTREPO, J.; KJERFVE, B. Magdalena river: interannual variability (1975-1995) and revised water discharge and sediment load estimates [online]. Journal of hydrology, 2000. vol. 235, no. 1, p. 137-149. Available from internet <[http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00269-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00269-9)>.

<sup>508</sup> RESTREPO Y KJERFVE. Op. cit., p. 137, 143-144, 146.

<sup>509</sup> SKLAR, L.; DIETRICH, W. E. The influence of downstream variations in sediment supply and transport capacity on bedrock channel longitudinal profiles. Eos Transactions American Geophysical Union, 1997, vol. 78, p. 46. Citado por WHIPPLE and TUCKER. Implications of sediment-flux-dependent river incision models for landscape evolution. Op. cit., p. ETG 3-5.

<sup>510</sup> SLINGERLAND, R.; WILLETT, S. D.; HENNESSEY, H. L. A new fluvial bedrock erosion model based on the work-energy principle. Eos Transactions American Geophysical Union, 1997, vol. 78, no 46, p. 299. Citado por WHIPPLE and TUCKER. Implications of sediment-flux-dependent river incision models for landscape evolution. Op. cit., p. ETG 3-5.

<sup>511</sup> HOWARD, Alan. Thresholds in river regimes, in Thresholds in geomorphology, edited by D. COATES and D. Viteck. 1980. p. 227-258. Citado por WHIPPLE and TUCKER. Implications of sediment-flux-dependent river incision models for landscape evolution. Op. cit., p. ETG 3-5.

<sup>512</sup> SKLAR and DIETRICH. River longitudinal profiles and bedrock incision models: Stream power and the influence of sediment supply. Op. cit. Citado por WHIPPLE and TUCKER. Implications of sediment-flux-dependent river incision models for landscape evolution. Op. cit., p. ETG 3-5.

<sup>513</sup> SLINGERLAND, R.; WILLETT, S. D.; HOVIUS, N. Slope-area scaling as a test of fluvial bedrock erosion laws. Eos Transactions American Geophysical Union, 1998, vol. 79, p. 45. Citado por WHIPPLE and TUCKER. Implications of sediment-flux-dependent river incision models for landscape evolution. Op. cit., p. ETG 3-5.

desempeña un papel importante en la incisión fluvial (Whipple y Tucker; 2002<sup>514</sup>), por ende, es difícil estimar si la incisión aumenta o disminuye por el doble rol que desempeña en el lecho fluvial. En base a lo anterior se considera que las tasas de erosión podrían variar estacionalmente influenciado por el ciclo del *ENSO*, donde las tasas de erosión podrían aumentar relativamente durante La Niña y posiblemente disminuir relativamente durante El Niño, este podría ser un patrón general de comportamiento para todos los ríos en Colombia.

Generalmente las altas precipitaciones conllevan a grandes tasas de erosión, pero no es el caso para el cauce del Suárez (Tabla 5) (Struth, 2016)<sup>515</sup>, de la misma manera se observó este comportamiento en el caudal medio multianual, donde el caudal del Suárez se vincula con bajas tasas de erosión; Struth (2016)<sup>516</sup> propone que las altas tasas de erosión en el valle del Chicamocha se relacionan con las condiciones climáticas semiáridas locales, la presencia de un lecho más erodible y una baja cobertura vegetal, que a su vez, estos podrían incrementar la capacidad de erosión. Los factores mencionados son los mismos presenciados en este trabajo y adicionalmente se propone una variación relativa en la tasa de erosión fluvial con una frecuencia estacional sometida por el ciclo de *ENSO*, donde la tasa de erosión aumentaría durante la Niña y disminuiría en la fase del Niño para ambos cauces. Respecto a la incisión fluvial, el parámetro  $K$  probablemente desempeña un rol principal en la incisión fluvial en el área de estudio, tomando en cuenta el estado de alteración de las rocas que afectan sus propiedades geomecánicas, por ende su respuesta a la erodabilidad.

---

<sup>514</sup> WHIPPLE and TUCKER. Implications of sediment-flux-dependent river incision models for landscape evolution. Op. cit., p. ETG 3-5.

<sup>515</sup> *Ibid.*, p. 55, 63.

<sup>516</sup> *Ibid.*, p. 63.

## 8.7 EVOLUCIÓN DE LOS RÍOS CHICAMOCHA Y SUÁREZ

### 8.7.1 Cretácico tardío – Paleoceno

En el Cretácico tardío se inicia la construcción de la cuenca *foreland* hacia el E (Cooper *et al.*, 1995<sup>517</sup>; Gómez *et al.*, 2005<sup>518</sup>) debido al levantamiento de la Cordillera Central (Gómez *et al.*, 2003<sup>519</sup>; Villagómez, 2010<sup>520</sup>) y comienza la depositación no marina (Gómez *et al.*, 2003)<sup>521</sup>. Probablemente, el Cretácico tardío es una etapa previa a la inversión antes de la primera denudación inducida por cabalgamiento en la Cordillera Oriental (Caballero *et al.*, 2013)<sup>522</sup>.

El Anticlinal de los Cobardes y la región de las Mesas comenzó su exhumación alrededor de los 60Ma (Caballero *et al.*, 2013)<sup>523</sup>. Basándose en datos de procedencia y de termocronología, durante el Paleoceno temprano el Anticlinal de Los Cobardes no tuvo casi exhumación (Caballero *et al.*, 2013)<sup>524</sup>, pero si desarrollo una topografía suficiente que aisló la Cuenca Valle Medio del Magdalena de la

---

<sup>517</sup> COOPER *et al.* Op. cit. Citado por CABALLERO *et al.* Factors controlling selective abandonment and reactivation in thick-skin orogens: a case study in the Magdalena Valley, Colombia. Op. cit., p. 345.

<sup>518</sup> GÓMEZ, Elías *et al.* Development of the Colombian foreland-basin system as a consequence of diachronous exhumation of the northern Andes. Op. cit. Citado por CABALLERO *et al.* Factors controlling selective abandonment and reactivation in thick-skin orogens: a case study in the Magdalena Valley, Colombia. Op. cit., p. 345.

<sup>519</sup> GÓMEZ, Elías *et al.* Controls on architecture of the late Cretaceous to Cenozoic southern middle Magdalena Valley basin, Colombia. Geological Society of America Bulletin, 2003, vol. 115, no 2, p. 131-147. Citado por CABALLERO *et al.* Factors controlling selective abandonment and reactivation in thick-skin orogens: a case study in the Magdalena Valley, Colombia. Op. cit., p. 345.

<sup>520</sup> VILLAGÓMEZ, Diego. Thermochronology, geochronology and geochemistry of the Western and Central cordilleras and Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia: The tectonic evolution of NW South America. 2010. Tesis Doctoral. University of Geneva. Citado por CABALLERO *et al.* Factors controlling selective abandonment and reactivation in thick-skin orogens: a case study in the Magdalena Valley, Colombia. Op. cit., p. 345.

<sup>521</sup> GÓMEZ *et al.* Controls on architecture of the late Cretaceous to Cenozoic southern middle Magdalena Valley basin, Colombia. Op. cit. Citado por CABALLERO *et al.* Factors controlling selective abandonment and reactivation in thick-skin orogens: a case study in the Magdalena Valley, Colombia. Op. cit., p. 345-346.

<sup>522</sup> CABALLERO, Víctor *et al.* The paradox of long-lasting inversion features that become inactive in the Neogene under increasing far field rates of shortening: the case of the Middle Magdalena Valley. In: Nemčok, M., Mora, A. & Cosgrove, J. W. Thick-Skin-Dominated Orogens: from Initial Inversion to Full Accretion. Geological Society, London, Special Publications, p. 377. Citado por SILVA *et al.* Op. cit., p. 397.

<sup>523</sup> CABALLERO *et al.* Tectonic controls on sedimentation in an intermontane hinterland basin adjacent to inversion structures: The Nuevo Mundo syncline, Middle Magdalena Valley, Colombia. Op. cit., p. 320.

<sup>524</sup> *Ibid.*, p. 335.

cuenca *foreland* hacia el E (Caballero *et al.*, 2013)<sup>525</sup> y se produjo una deformación suave en este anticlinal y en la región de las Mesas (Caballero *et al.*, 2013)<sup>526</sup>.

## 8.7.2 Eoceno

Desde el Paleoceno hasta el Eoceno tardío la sedimentación en la Cuenca del Valle Medio del Magdalena dio lugar a ambientes aluviales, fluviales y costeros (Caballero *et al.*, 2013)<sup>527</sup>. Para el Eoceno temprano y medio se asoció un esfuerzo  $\delta_1$  NW–SE a WNW–ESE al acortamiento prolongado en la corteza que tuvo sus inicios en el Cretácico Superior (Colmenares y Zoback, 2003<sup>528</sup>; Cortés *et al.*, 2005<sup>529</sup>); se incorporan varios *grabens* existente a un cinturón de cabalgamiento que avanza hacia el E, incluyendo las cuencas San Lucas y Tablazo-Magdalena (Morales, 1958<sup>530</sup>; Cooper *et al.*, 1995<sup>531</sup>; Sarmiento-Rojas, 2001<sup>532</sup>; Gómez *et al.*, 2003<sup>533</sup>;

---

<sup>525</sup> CABALLERO *et al.* Factors controlling selective abandonment and reactivation in thick-skin orogens: a case study in the Magdalena Valley, Colombia. Op. cit., p. 363.

<sup>526</sup> CABALLERO *et al.* Tectonic controls on sedimentation in an intermontane hinterland basin adjacent to inversion structures: The Nuevo Mundo syncline, Middle Magdalena Valley, Colombia. Op. cit., p. 335.

<sup>527</sup> CABALLERO *et al.* Factors controlling selective abandonment and reactivation in thick-skin orogens: a case study in the Magdalena Valley, Colombia. Op. cit., p. 346.

<sup>528</sup> COLMENARES, Lourdes y ZOBACK, Mark. Regional stress and seismotectonics in northern South America. En AGU Fall Meeting Abstracts. 2002. Citado por CABALLERO *et al.* Factors controlling selective abandonment and reactivation in thick-skin orogens: a case study in the Magdalena Valley, Colombia. Op. cit., p. 346.

<sup>529</sup> CORTÉS, Martín *et al.* Paleostress evolution of the northern Andes (Eastern Cordillera of Colombia): Implications on plate kinematics of the South Caribbean region. *Tectonics*, 2005, vol. 24, no 1. Citado por CABALLERO *et al.* Factors controlling selective abandonment and reactivation in thick-skin orogens: a case study in the Magdalena Valley, Colombia. Op. cit., p. 346.

<sup>530</sup> MORALES, Luis *et al.* General Geology and Oil Occurrences of Middle Magdalena Valley, Colombia: South America. 1958. In: American Association of Petroleum Geologists. *Habitat of Oil: A Symposium*. Ed. Lewis George Weeks. American Association of Petroleum Geologists, 1958. Citado por CABALLERO *et al.* Factors controlling selective abandonment and reactivation in thick-skin orogens: a case study in the Magdalena Valley, Colombia. Op. cit., p. 346.

<sup>531</sup> COOPER *et al.* Op. cit. Citado por CABALLERO *et al.* Factors controlling selective abandonment and reactivation in thick-skin orogens: a case study in the Magdalena Valley, Colombia. Op. cit., p. 346.

<sup>532</sup> SARMIENTO, L. Mesozoic rifting and Cenozoic basin inversion history of the Eastern Cordillera, Colombian Andes. PhD thesis, Vrije University, Amsterdam. Citado por CABALLERO *et al.* Factors controlling selective abandonment and reactivation in thick-skin orogens: a case study in the Magdalena Valley, Colombia. Op. cit., p. 346.

<sup>533</sup> GÓMEZ *et al.* Controls on architecture of the late Cretaceous to Cenozoic southern middle Magdalena Valley basin, Colombia. Op. cit. Citado por CABALLERO *et al.* Factors controlling selective abandonment and reactivation in thick-skin orogens: a case study in the Magdalena Valley, Colombia. Op. cit., p. 346.

Restrepo-Pace *et al.*, 2004<sup>534</sup>; Cortés *et al.*, 2005<sup>535</sup>; Gómez *et al.*, 2005a<sup>536</sup>; Mora *et al.*, 2006<sup>537</sup>; Clavijo *et al.*, 2008<sup>538</sup>, Mora *et al.*, 2009a<sup>539</sup>; Moretti *et al.* 2010<sup>540</sup>; Parra *et al.* 2012<sup>541</sup>). En el Eoceno tardío, hay registros de exhumación de las estructuras del Macizo de Santander, el Anticlinal de los Cobardes (Caballero *et al.*, 2013)<sup>542</sup> y la primera exhumación en algunos dominio de la Cordillera Oriental como el bloque colgante de la falla Soapaga en el Macizo de Floresta (Parra *et al.* 2009b<sup>543</sup>; Mora *et al.* 2010<sup>544</sup>; Saylor *et al.* 2011<sup>545</sup>; Silva *et al.*, 2013<sup>546</sup>).

La configuración del drenaje principal entre el Paleoceno a Eoceno Temprano se caracteriza por la presencia de dos cuencas abiertas de facies principalmente fluvial a marino marginal y un patrón de drenaje axial (Gómez *et al.*, 2005<sup>547</sup>; Bayona *et*

---

<sup>534</sup> RESTREPO-PACE, Pedro *et al.* A fold-and-thrust belt along the western flank of the Eastern Cordillera of Colombia-style, kinematics, and timing constraints derived from seismic data and detailed surface mapping. 2004. p. 598-613. In:McClay, K. R. Thrust Tectonics and Hydrocarbon Systems. AAPG, Memoirs, 82, 598-613. Citado por CABALLERO *et al.* Factors controlling selective abandonment and reactivation in thick-skin orogens: a case study in the Magdalena Valley, Colombia. Op. cit., p. 346.

<sup>535</sup> CORTÉS, Martín *et al.* Paleostress evolution of the northern Andes (Eastern Cordillera of Colombia): Implications on plate kinematics of the South Caribbean region. Tectonics, 2005, vol. 24, no 1. Citado por CABALLERO *et al.* Factors controlling selective abandonment and reactivation in thick-skin orogens: a case study in the Magdalena Valley, Colombia. Op. cit., p. 346.

<sup>536</sup> GÓMEZ, Elías *et al.* Development of the Colombian foreland-basin system as a consequence of diachronous exhumation of the northern Andes. Op. cit. Citado por CABALLERO *et al.* Factors controlling selective abandonment and reactivation in thick-skin orogens: a case study in the Magdalena Valley, Colombia. Op. cit., p. 346.

<sup>537</sup> MORA, Andrés, *et al.* Cenozoic contractional reactivation of Mesozoic extensional structures in the Eastern Cordillera of Colombia. Tectonics, 2006, vol. 25, no 2. Citado por CABALLERO *et al.* Factors controlling selective abandonment and reactivation in thick-skin orogens: a case study in the Magdalena Valley, Colombia. Op. cit., p. 346.

<sup>538</sup> CLAVIJO, Jairo *et al.* Evolución geológica de la Serranía de San Lucas, norte del Valle Medio del Magdalena y noroeste de la Cordillera Oriental. Boletín de Geología, 2008, vol. 30, no 1. Citado por CABALLERO *et al.* Factors controlling selective abandonment and reactivation in thick-skin orogens: a case study in the Magdalena Valley, Colombia. Op. cit., p. 346.

<sup>539</sup> MORA, Andrés *et al.* The role of inherited extensional fault segmentation and linkage in contractional orogenesis: A reconstruction of Lower Cretaceous inverted rift basins in the Eastern Cordillera of Colombia. Basin Research, 2009, vol. 21, no 1, p. 111-137. Citado por CABALLERO *et al.* Factors controlling selective abandonment and reactivation in thick-skin orogens: a case study in the Magdalena Valley, Colombia. Op. cit., p. 346.

<sup>540</sup> MORETTI, Isabelle *et al.* Integrated exploration workflow in the south Middle Magdalena Valley (Colombia). Journal of South American Earth Sciences, 2010, vol. 29, no 2, p. 187-197. Citado por CABALLERO *et al.* Factors controlling selective abandonment and reactivation in thick-skin orogens: a case study in the Magdalena Valley, Colombia. Op. cit., p. 346.

<sup>541</sup> PARRA, Mauricio *et al.* Detecting earliest shortening and deformation advance in thrust belt hinterlands: Example from the Colombian Andes. Geology, 2012, vol. 40, no 2, p. 175-178. Citado por CABALLERO *et al.* Factors controlling selective abandonment and reactivation in thick-skin orogens: a case study in the Magdalena Valley, Colombia. Op. cit., p. 346.

<sup>542</sup> CABALLERO *et al.* Tectonic controls on sedimentation in an intermontane hinterland basin adjacent to inversion structures: The Nuevo Mundo syncline, Middle Magdalena Valley, Colombia. Op. cit., p. 331.

<sup>543</sup> PARRA, Mauricio, *et al.* Episodic orogenic front migration in the northern Andes: Constraints from low-temperature thermochronology in the Eastern Cordillera, Colombia. Tectonics, 2009, vol. 28, no 4. Citado por SILVA *et al.* Op. cit., p. 401.

<sup>544</sup> MORA, Andrés, *et al.* Migration of Cenozoic deformation in the Eastern Cordillera of Colombia interpreted from fission track results and structural relationships: Implications for petroleum systems. AAPG bulletin, 2010, vol. 94, no 10, p. 1543-1580. Citado por SILVA *et al.* Op. cit., p. 401.

<sup>545</sup> SAYLOR, *et al.* Op. cit. Citado por SILVA *et al.* Op. cit., p. 401.

<sup>546</sup> SILVA *et al.* Op. cit., p. 393, 401.

<sup>547</sup> GÓMEZ, Elías *et al.* Development of the Colombian foreland-basin system as a consequence of diachronous exhumation of the northern Andes. Op. cit. Citado por SILVA *et al.* Op. cit., p. 405.

*al.*, 2008<sup>548</sup>; Saylor *et al.*, 2011<sup>549</sup>), donde los sedimentos fluían paralelos a las estructuras con dirección hacia el N (Gómez *et al.*, 2005<sup>550</sup>) y aislados por un dominio central levantado, denominado actualmente como Cordillera Oriental (Silva *et al.*, 2013)<sup>551</sup>.

### 8.7.3 Oligoceno

Entre el Oligoceno y el Mioceno tardío se dio inicio al levantamiento por cabalgamiento a lo largo del flanco E de la Cordillera Oriental (Mora *et al.*, 2010)<sup>552</sup>, se sugiere que los dos flancos de la misma cordillera fueron exhumados por la deformación activa en el Oligoceno Tardío (Silva *et al.*, 2013)<sup>553</sup>. Las formaciones aluviales de Mugrosa, Colorado y Real registra el plegamiento y levantamiento sobre la Falla la Salina en el Oligoceno-Mioceno (Gómez *et al.*, 2005<sup>554</sup>; Caballero *et al.*, 2010<sup>555</sup>; Moreno *et al.*, 2011<sup>556</sup>; Caballero *et al.*, 2013)<sup>557</sup>.

El patrón de drenaje durante el Oligoceno y el Mioceno temprano se relaciona con el mayor levantamiento extendido en la Cordillera Oriental y concuerda con la existencia de dos cuencas: La del Valle del Magdalena (Caballero *et al.*, 2013)<sup>558</sup>

---

<sup>548</sup> BAYONA. *et al.* Op. cit. Citado por SILVA *et al.* Op. cit., p. 405.

<sup>549</sup> SAYLOR. *et al.* Op. cit. Citado por SILVA *et al.* Op. cit., p. 405.

<sup>550</sup> GÓMEZ *et al.* Syntectonic Cenozoic sedimentation in the northern middle Magdalena Valley Basin of Colombia and implications for exhumation of the Northern Andes. Op. cit. Citado por SILVA *et al.* Op. cit., p. 405.

<sup>551</sup> SILVA *et al.* Op. cit., p. 405.

<sup>552</sup> MORA *et al.* Migration of Cenozoic deformation in the Eastern Cordillera of Colombia interpreted from fission track results and structural relationships: Implications for petroleum systems. Op. cit. Citado por SILVA *et al.* Op. cit., p. SP377. 15

<sup>553</sup> SILVA *et al.* Op. cit., p. 402.

<sup>554</sup> GÓMEZ *et al.* Syntectonic Cenozoic sedimentation in the northern middle Magdalena Valley Basin of Colombia and implications for exhumation of the Northern Andes. Op. cit. Citado por Factors controlling selective abandonment and reactivation in thick-skin orogens: a case study in the Magdalena Valley, Colombia. Op. cit., p. 346.

<sup>555</sup> CABALLERO, Víctor *et al.* Levantamiento de la Cordillera Oriental de Colombia durante el Eoceno Tardío-Oligoceno temprano: Proveniencia sedimentaria en el Sinclinal de Nuevo Mundo, Cuenca Valle Medio del Magdalena. Boletín de Geología, 2010, vol. 32, no 1, p. 45-77. Citado por Factors controlling selective abandonment and reactivation in thick-skin orogens: a case study in the Magdalena Valley, Colombia. Op. cit., p. 346.

<sup>556</sup> MORENO, Christopher *et al.* Depositional and provenance record of the Paleogene transition from foreland to hinterland basin evolution during Andean orogenesis, northern Middle Magdalena Valley Basin, Colombia. Journal of South American Earth Sciences, 2011, vol. 32, no 3, p. 246-263. Citado por Factors controlling selective abandonment and reactivation in thick-skin orogens: a case study in the Magdalena Valley, Colombia. Op. cit., p. 346.

<sup>557</sup> CABALLERO *et al.* Factors controlling selective abandonment and reactivation in thick-skin orogens: a case study in the Magdalena Valley, Colombia. Op. cit., p. 346-347.

<sup>558</sup> CABALLERO, Víctor *et al.* The paradox of long-lasting inversion features that become inactive in the Neogene under increasing far field rates of shortening: the case of the Middle Magdalena Valley. In: Nemčok, M., Mora, A. & Cosgrove, J. W. Thick-Skin-Dominated Orogens: from Initial Inversion to Full Accretion. Op. cit. Citado por SILVA *et al.* Op. cit., p. SP377. 15.

indicando que fue una cuenca endorreica durante el Oligoceno hasta el Mioceno temprano (Caballero *et al.*, 2013<sup>559</sup>; Silva *et al.*, 2013<sup>560</sup>) y la de la zona axial de la Cordillera Oriental, que al parecer permaneció como cuenca cerrada durante el Oligoceno (Silva *et al.*, 2013<sup>561</sup>); el desarrollo orogénico extendido permite el cierre de dichas cuencas y el avance de las zonas de depositación (*foreland depozones*) hacia el E (Silva *et al.*, 2013)<sup>562</sup>.

La Petrografía de la parte superior del Oligoceno de la Formación Mugrosa en el Valle Medio del Magdalena, registra un incremento en la proveniencia de litologías del Cretácico, dichos sedimentos se interpretan como provenientes del Anticlinal de los Cobardes y la región de las Mesas o del Macizo de Santander (Caballero *et al.*, 2013)<sup>563</sup>; en el sector donde ocurre el levantamiento de la Cordillera Oriental y el Macizo de Santander, al parecer, experimenta un cambio del rumbo del transporte de sedimentos que anteriormente se dirigían hacia el N, por una nueva dirección que se dirige a la cuenca cerrada del Valle del Magdalena (Caballero *et al.*, 2013)<sup>564</sup>.

#### 8.7.4 Mioceno

Durante el Mioceno temprano y medio la Cordillera Oriental se exhumó, incluyendo los *depozones* que estuvieron activos a lo largo de su zona axial; el levantamiento de la Cordillera Oriental continúa durante el Mioceno medio, induciendo a una profunda incisión y exposición del basamento en los Macizos de Quetame y de Santander (Silva *et al.*, 2013)<sup>565</sup>; igualmente, el contenido lítico ígneo y metamórfico en areniscas y conglomerados en la parte inferior de la Formación Colorado, indica

---

<sup>559</sup> CABALLERO *et al.* Factors controlling selective abandonment and reactivation in thick-skin orogens: a case study in the Magdalena Valley, Colombia. Op. cit. p. 360, 362.

<sup>560</sup> SILVA *et al.* Op. cit., p. 402-403, 405.

<sup>561</sup> *Ibid.*, p. 402-403, 405

<sup>562</sup> *Ibid.*, p. 402, 405.

<sup>563</sup> CABALLERO *et al.* Tectonic controls on sedimentation in an intermontane hinterland basin adjacent to inversion structures: The Nuevo Mundo syncline, Middle Magdalena Valley, Colombia. Op cit., p. 339.

<sup>564</sup> *Ibid.*, p. 332.

<sup>565</sup> *Ibid.*, p. 15. p. 404.

una innegable exhumación y erosión profunda del Macizo de Santander (Caballero, 2010)<sup>566</sup>.

Hay una tendencia de rápida denudación y crecimiento topográfico en el *hinterland*, añadiendo nuevas áreas y exponiendo a la erosión los depósitos del Neógeno a lo largo de las estribaciones de la Cordillera Oriental (Silva *et al.*, 2013)<sup>567</sup>. Anterior al Pleistoceno, prevalece un patrón de drenaje axial inclusive en las cuencas cerradas (Silva *et al.*, 2013)<sup>568</sup>, como se caracteriza en los estados iniciales de inversión tectónica (Babault *et al.*, 2005<sup>569</sup>, Babault, 2013<sup>570</sup>, Struth, 2016<sup>571</sup>).

## 8.7.5 Evolución reciente

### 8.7.5.1 Plioceno – Pleistoceno

A partir de este tiempo, los orógenos tienden al desarrollo de drenajes transversales, como se expone en las estribaciones orientales de la Cordillera Oriental (Mora *et al.*, 2008)<sup>572</sup>. Desde el Plioceno hasta el presente se expone las tasas de deformación más rápidas acompañadas de una etapa de construcción de la Cordillera Oriental (Van der Hammen *et al.* 1973<sup>573</sup>; Wijninga, 1996<sup>574</sup>; Mora *et al.*, 2008<sup>575</sup>; Mora *et al.*,

---

<sup>566</sup> CABALLERO, V. Evolución tectono-sedimentaria del Sinclinal de Nuevo Mundo, Cuenca Valle Medio del Magdalena Colombia, durante el Oligoceno–Mioceno. 2010. Tesis Doctoral. MSc thesis, Universidad Industrial de Santander. p. 1-100.

<sup>567</sup> SILVA *et al.* Op. cit., p. 404.

<sup>568</sup> *Ibid.*, p. 406.

<sup>569</sup> BABAULT, Julien, *et al.* Influence of piedmont sedimentation on erosion dynamics of an uplifting landscape: an experimental approach. *Geology* [online], 2005, vol. 33, no 4, p. 301-304. Available from internet: <<https://pubs.geoscienceworld.org/geology/article-abstract/33/4/301/29583/influence-of-piedmont-sedimentation-on-erosion?redirectedFrom=fulltext>>. Citado por SILVA *et al.* Op. cit., p. 406.

<sup>570</sup> BABAULT *et al.* Shortening, structural relief and drainage evolution in inverted rifts: insights from the Atlas Mountains, the Eastern Cordillera of Colombia and the Pyrenees. Op. cit., p. 152-153.

<sup>571</sup> STRUTH. Op. cit., p. 82.

<sup>572</sup> MORA, *et al.* Climatic forcing of asymmetric orogenic evolution in the Eastern Cordillera of Colombia. Citado por SILVA *et al.* Op. cit., p. 405.

<sup>573</sup> VAN DER HAMMEN, Thomas, *et al.* Palynological record of the upheaval of the Northern Andes: a study of the Pliocene and Lower Quaternary of the Colombian Eastern Cordillera and the early evolution of its High-Andean biota. *Review of Palaeobotany and Palynology* [online]. 1973, vol. 16, no 1-2, p. 1-122. Available from internet: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0034666773900316>>. Citado por SILVA *et al.* Op. cit., p. 405.

<sup>574</sup> WIJNINGA, V. M. Palynology and paleobotany of Neogene sediments from the high plain of Bogotá (Colombia): evolution of the Andean flora from an ecological perspective. 1996. University of Amsterdam, Amsterdam, p. 370. Citado por SILVA *et al.* Op. cit., p. 405

<sup>575</sup> MORA, Andrés, *et al.* Climatic forcing of asymmetric orogenic evolution in the Eastern Cordillera of Colombia. *Geological Society of America Bulletin* [online]. 2008, vol. 120, no 7-8, p. 930-949. Available from internet: <<https://pubs.geoscienceworld>.

2012<sup>576</sup>), durante la exhumación de un orógeno de inversión tectónica se desarrolla zonas axiales muy elevadas de bajo relieve estructural y mesetas poco deformadas, sumado a un acortamiento que se concentra sobre las antiguas márgenes de *rift*, tal como ocurre en la Cordillera Oriental (Babault *et al.*, 2013)<sup>577</sup>. Dentro de estas zonas axiales se encuentra la actual región de la Mesas que durante el Plioceno sufre un proceso de peniplanización y desarrolla una superficie de arrasamiento denominada la plataforma inicial (Julivert. 1958<sup>578</sup>; INGEOMINAS, 2008<sup>579</sup>). Además, existen indicios para considerar la actividad de las Fallas del Suárez y Bucaramanga desde finales del Plioceno al Holoceno como responsable de la fragmentación y diferenciación topográfica de la plataforma inicial (Julivert, 1958<sup>580</sup>, INGEOMINAS, 2008)<sup>581</sup>; las dos fallas forman una depresión tectónica angular (Niño y Vargas, 1993<sup>582</sup>; INGEOMINAS, 2001<sup>583</sup>) que tiene a hundirse conforme se va depositando material (sedimentos de la Formación Bucaramanga) y se denominada como dovela a de Bucaramanga (Julivert, 1958)<sup>584</sup>.

Durante el Plioceno se inició de la depositación de la Formación Bucaramanga (Jiménez *et al.*, 2015)<sup>585</sup> dentro de un ambiente fluvial con alternancia aluvial (INGEOMINAS, 2001)<sup>586</sup>; los paleocauces de los río Suárez y Chicamocha estaban alineados a la Fallas del Suárez y Bucaramanga respectivamente, depositaban su material en la Mesa de Bucaramanga (Julivert, 1958<sup>587</sup>; Tesón *et al.*, 2015<sup>588</sup>; García

---

org/gsabulletin/article-abstract/120/7-8/930/2303/climatic-forcing-of-asymmetric-orogenic-evolution?redirectedFrom=fulltext>. Citado por SILVA *et al.* Op. cit., p. 405.

<sup>576</sup> MORA, Andrés *et al.* Inversion tectonics under increasing rates of shortening and sedimentation: Cenozoic example from the Eastern Cordillera of Colombia. In: Nemčok, M., Mora, A. & Cosgrove, J. W. Thick-Skin-Dominated Orogens: from Initial Inversion to Full Accretion. Geological Society, London, Special Publications, p. 377. Citado por SILVA *et al.* Op. cit., p. 405

<sup>577</sup> BABAULT *et al.* Shortening, structural relief and drainage evolution in inverted rifts: insights from the Atlas Mountains, the Easter Cordillera of Colombia and the Pyrenees. Op. cit., p. 149, 154.

<sup>578</sup> JULIVERT. Op. cit., p. 28-30, 37-38.

<sup>579</sup> COLOMBIA. INGEOMINAS. Modelo de evolución morfotectónica cuaternaria basado en evidencias estructurales, neotectónicas y paleosismológicas de los principales sistemas de falla en la región de Bucaramanga. Op. cit., p. 81.

<sup>580</sup> JULIVERT. Op. cit., p. 37-38.

<sup>581</sup> COLOMBIA. INGEOMINAS. Modelo de evolución morfotectónica cuaternaria basado en evidencias estructurales, neotectónicas y paleosismológicas de los principales sistemas de falla en la región de Bucaramanga. Op. cit., p. 81.

<sup>582</sup> NIÑO Y VARGAS. Op. cit. Citado por SOLANO. Op. cit., p. 39.

<sup>583</sup> COLOMBIA. INGEOMINAS. Zonificación sismogeotécnica indicativa del área metropolitana de Bucaramanga. Op. cit. 19.

<sup>584</sup> JULIVERT. Op. cit., 37-38.

<sup>585</sup> JIMÉNEZ. *et al.* Op. cit., p. 23.

<sup>586</sup> COLOMBIA. INGEOMINAS. Zonificación sismogeotécnica indicativa del área metropolitana de Bucaramanga. Op. cit. 19.

<sup>587</sup> JULIVERT. Op. cit., p. 27, 35, 37.

<sup>588</sup> TESÓN, *et al.* Op. cit., p. 127-140.

*et al.*, 2015<sup>589</sup>; Struth, 2016<sup>590</sup>; Solano, 2016<sup>591</sup>); el antiguo cauce del Suárez fluía en dirección preferente N-S, mientras el antiguo Chicamocha discurría también en dirección preferente N-S hasta un sitio llamado Los Curos, cambiando su rumbo hacia el E hasta confluir con el antiguo Suárez en la vereda Chocoa (Figura 46, A). Igualmente, la Formación Bucaramanga tiene un posible aporte sedimentario lateral de abanico aluvial (Tesón *et al.*, 2015<sup>592</sup>; Solano 2016<sup>593</sup>) por parte de los ríos del Hato, río Frío, río de Oro y Suratá (Solano, 2016)<sup>594</sup>.

La reapertura de la cuenca del Magdalena hacia el N en el Mioceno medio (Silva *et al.*, 2013<sup>595</sup>) provoca un descenso en el nivel base que trajo consigo la propagación de una onda erosiva hacia el S del Valle del Magdalena (Struth, 2016)<sup>596</sup>, un afluyente de este río avanza mediante erosión remontante en dirección SE hasta capturar la quebrada Zapatoca que anteriormente continuaba su curso por la quebrada Grande (2), dejando como evidencias un *elbow*, una depresión relacionada a un valle antiguo (Figura 19 y Figura 31, depresión 1) y el *knickpoint* asociado a la captura fluvial (Figura 30, A). Seguidamente, el tributario del Magdalena siguió avanzando hasta lograr la captura fluvial del antiguo Suárez hace 400ka (Figura 46, B), finalizando así el aporte sedimentario de este río en la Mesa de Bucaramanga (Struth, 2016)<sup>597</sup>, desviando su trayectoria en dirección NW y continuando su recorrido por el tributario del Magdalena (actual río Sogamoso). A esta captura se relacionan evidencias: un *wind gap* (Figura 19 y Figura 31, depresión 2) con un vasto depósito fluvial desconectado de su área fuente (Julivert, 1956), un *elbow* (Figura 31) y un *knickpoint* relacionado a la captura (Figura 30, B). Posterior a la captura del río Suárez, la erosión remontante que se propaga aguas arriba hace que su

---

<sup>589</sup> GARCÍA, et al. Op. cit., p. 719-722.

<sup>590</sup> STRUTH. Op. cit., p. 82.

<sup>591</sup> SOLANO. Op. cit., p. 155, 158, 164.

<sup>592</sup> TESÓN, et al. Eliseo et al. Capturas fluviales recientes de los ríos Chicamocha y Suárez: El origen de la Terraza de Bucaramanga y causas de la reorganización de la red de drenaje. XV Congreso Colombiano de Geología (Agosto 31 – Septiembre 5, 2015: Bucaramanga, Colombia). Ponencia Oral. 02 de septiembre de 2015.

<sup>593</sup> SOLANO. Op. cit., p. 164.

<sup>594</sup> *Ibid.*, p. 156, 164.

<sup>595</sup> SILVA et al. Op. cit., p. 404-405.

<sup>596</sup> STRUTH. Op. cit., p. 9, 88.

<sup>597</sup> *Ibid.*, p. 9, 67, 47-51, 71, 81-82, 87, 89, 92.

potencial erosivo se incrementa respecto a las cuencas vecinas; en un ajuste de su nivel base, un afluente del Suárez consigue capturar al antiguo Chicamocha (Struth, 2016)<sup>598</sup>, culminando con su contribución sedimentaria en la Mesa de Bucaramanga; dicha captura deja un valle abandonado (Figura 19 y Figura 31, depresión 3) y un *elbow* de captura de ángulo agudo (Figura 31).

Alrededor del Pleistoceno finaliza la depositación de la Formación Bucaramanga (Jiménez *et al.*, 2015)<sup>599</sup> y su principal área fuente (actuales cuencas Sogamoso y Chicamocha) se encuentra desconectada (Solano, 2016)<sup>600</sup>. Además, en el Pleistoceno tardío probablemente ocurrió procesos de activación tectónica (INGEOMINAS, 2008<sup>601</sup>) que trajo como consecuencia la incisión de los ríos Lebrija y río de Oro, y en mayor magnitud los ríos Suárez (Tabla 9) (Julivert, 1958)<sup>602</sup>, estableciendo la configuración actual de la red de drenaje y la región de las mesas (Figura 46, C).

#### 8.7.5.2 Holoceno (Presente)

La distribución de los drenajes longitudinales, ya sean principales o tributarios están sometidos a un control de la distribución de las estructuras tectónicas (fallas principales, anticlinales, sinclinales, rumbos de capas) derivadas de la formación del orógeno en inversión; mientras los drenajes transversales obedecen a la disposición y distribución espacial de los bloques y sus escalonamientos que conforman el área de estudio (Figura 38) (Julivert, 1958)<sup>603</sup>. Además se presentan dos características en los *knickpoints* o quiebre de pendiente en los afluentes de la red de drenaje: un control litológico local en el sector W y SW del área de estudio especialmente sobre los contactos de las Formaciones Rosa Blanca y Tambor, el segundo un control

---

<sup>598</sup> *Ibíd.*, p. 82.

<sup>599</sup> JIMÉNEZ. *et al.* Op. cit., p. 19-21.

<sup>600</sup> SOLANO. Op. cit., p. 156, 163-164.

<sup>601</sup> COLOMBIA. INGEOMINAS. Modelo de evolución morfotectónica cuaternaria basado en evidencias estructurales, neotectónicas y paleosismológicas de los principales sistemas de falla en la región de Bucaramanga. Op. cit., p. 81, 84.

<sup>602</sup> JULIVERT. Op. cit., 38.

<sup>603</sup> *Ibíd.*, p. 37-38.

estructural local hacia el sector SW de la zona de estudio por estructuras tectónicas de rumbo preferente NE-SW como la Falla del Suárez y el Anticlinal de los Cobardes. La reorganización de drenaje que se da al interior del orógeno puede ser de capturas potentes como las ocurridas en el Chicamocha y Suarez, siempre y cuando los afluentes transversales de un cauce captor logre avanzar mediante erosión remontante hasta el interior de la zona de mesetas; de lo contrario se dará lugar a eventos discretos de captura cuando ocurre en los flancos del orógeno (Cordillera Oriental) (Struth *et al.*, 2015<sup>604</sup>; Struth, 2016<sup>605</sup>).

La divisoria de aguas de las cuencas Lebrija y Chicamocha-Sogamoso separa dos dominios del drenaje: el primero posee un patrón de incisión que se profundiza al W el escarpe de la Terraza de Bucaramanga y con un nivel base mayor a la cuenca vecina; la segunda tiene un patrón de incisión de mayor magnitud, describiendo profundos encajonamiento donde coinciden los cañones del Suárez, Chicamocha y Sogamoso, cuyo nivel base es menor a la cuenca anterior. Para establecer el equilibrio geométrico de la red de drenaje, la divisoria debe migrar hacia el N donde la cuenca Chicamocha-Sogamoso está ganando terreno a cuesta de la cuenca adyacente (Struth, 2016<sup>606</sup>); en su proceso de reorganización puede darse por captura fluvial y/o por corrientes decapitadas (*beheading*).

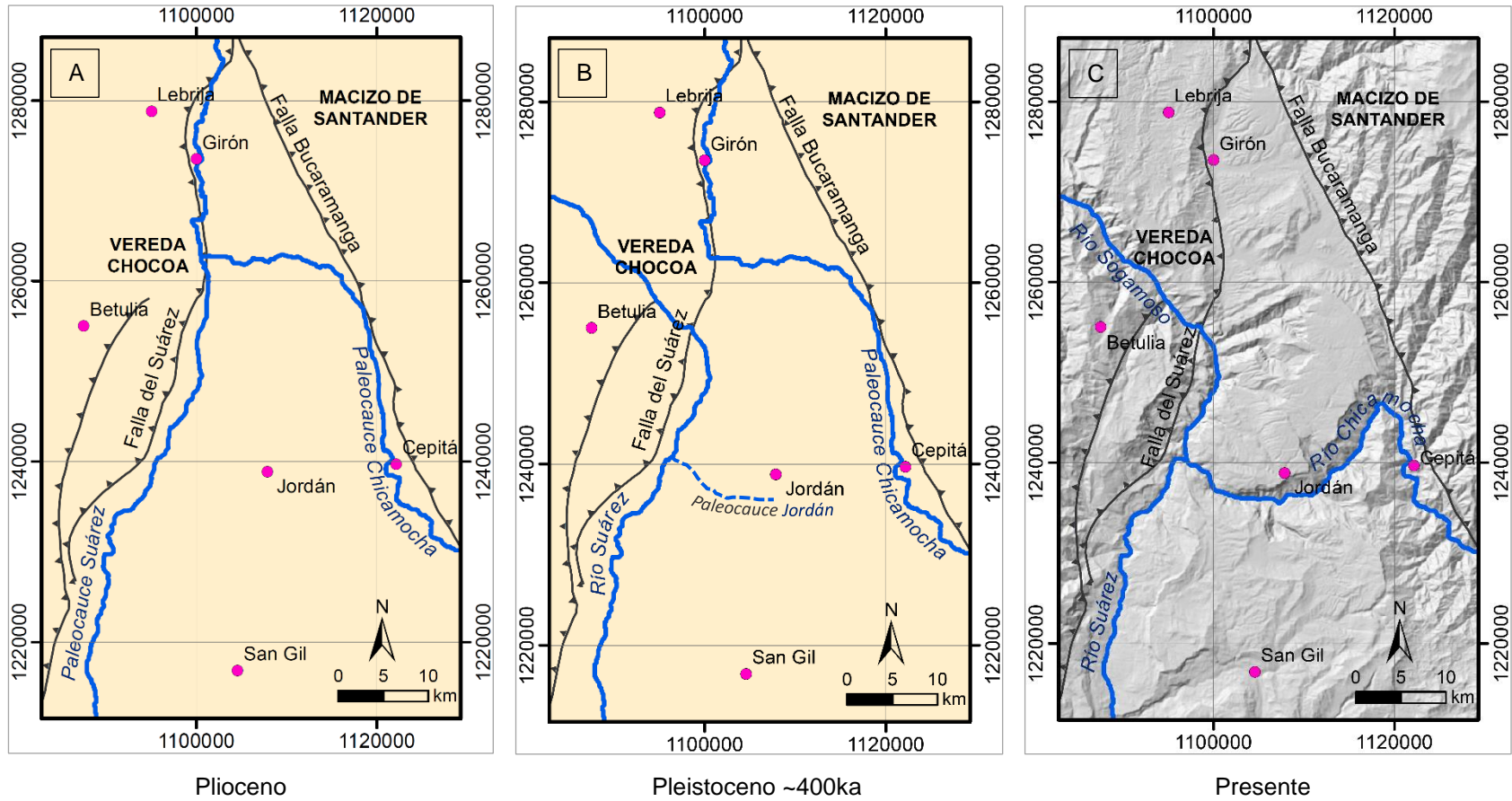
---

<sup>604</sup> STRUTH *et al.* Drainage reorganization during mountain building in the river system of the Eastern Cordillera of the Colombian Andes. *Op. cit.* Citado por STRUTH. *Op. cit.*, p. 69.

<sup>605</sup> STRUTH. *Op. cit.*, p. 9, 38, 41, 91.

<sup>606</sup> STRUTH. *Op. cit.*, p. 78-79.

Figura 46. Evolución reciente de los ríos Chicamocha y Suárez



## 9. CONCLUSIONES

De acuerdo a la información bibliográfica consultada de estudios cuya escala de trabajo engloban mejor el contexto de la Cordillera Oriental, se observa que el patrón de drenaje y su conexión con las estructuras tectónicas emergentes se ajusta en gran parte al modelo de evolución del drenaje en orógenos de inversión propuesto por Babault *et al.* (2013). Sin embargo, la zona objeto de estudio situada casi en su totalidad en la zona de meseta elevada y poco deformadas, muestra otras condiciones de reorganización fluvial: los drenajes longitudinales son controlados por diversas estructuras tectónicas en dirección preferente N-S y el drenaje transversal obedece principalmente a la disposición espacial de los bloques que conforma la zona de mesetas y algunos flancos de estructuras tectónicas ascendentes; la reorganización podría tener un control litológico y estructural local aproximadamente al SE de la zona de estudio. La pendiente regional no juega un papel importante en la disposición de la red de drenaje transversal por tratarse de una zona de meseta, por tal razón se propone estos como posibles factores de control de la red de drenaje al interior de la zona de mesetas en un orógeno de inversión.

Se establece que existieron tres capturas: La Quebrada Zapatoca, el antiguo Suárez y el antiguo Chicamocha, los cuales a su mayoría se asociaron evidencias geomorfológicas como los valles abandonados, *knickpoints* y *elbows* de captura. Además, se pudieron comparar los niveles base de los cauces capturados con los niveles base asociado con la región de las Mesas, donde se concluye que la región de las Mesas estaban conectada, constituyendo al parecer una plataforma antes de ser fraccionadas por la actividad de las fallas y la incisión fluvial.

El evento de captura que no se pudo relacionar la totalidad de las evidencias geomorfológicas fue el del Chicamocha, la ausencia del *knickpoint* de captura y del paleoperfil que ajustara a la Mesa de Bucaramanga no da a entender la inexistencia

de la captura fluvial, ya que estos pudieron ser borrados por la erosión como es el caso del Chicamocha. Una alta probabilidad de la ocurrencia de una captura la provee una evidencia estratigráfica: unos depósitos sedimentarios en la vereda Chocóa que poseen clastos de Granito de Pescadero, cuya área fuente que es la cuenca Chicamocha se sitúa al SE y actualmente se encuentra desconectada; el tipo de evidencia estratigráfica suele ser concluyente para identificar una captura fluvial.

El modelamiento realizado mediante software y herramientas SIG permitieron identificar las características topográficas del terreno y la elaboración de perfiles fluviales, aportando evidencias geomorfológicas que pudieron ser comparadas con algunas gráficas y resultados del trabajo de Julivert (1958), que durante su época estaba privada de herramientas tecnológicas. Algo importante por mencionar, es que se determinó en base a los resultados de este estudio junto con otras referencias bibliográficas, el orden correcto secuencial de los ríos capturados que se nombran a continuación: La Quebrada Zapatoca, el antiguo Suárez y el antiguo Chicamocha; a su vez, este pudo ser confrontado con el orden secuencial de capturas propuesto por Julivert (1958): el antiguo Chicamocha, la Quebrada Zapatoca y el antiguo Sogamoso. La ventaja del uso de estas herramientas tecnológicas permitió establecer medidas más precisas de elevación y trazado de los cauces, necesarios para cotejar los paleoperfiles de los cauces capturados con los niveles base de algunos afluentes sobre la región de las Mesas; también facilitó la superposición de los *knickpoints* en vista de planta para indagar sobre algún tipo de control como estructural, litológico, climático, entre otros.

Con base en los resultados de este estudio y sumando la información consultada, se encontraron varios tipos de evidencias e indicios que apuntan a una proveniencia S y SE de los sedimentos de la Formación Bucaramanga, donde los antiguos cauces de los ríos Suárez y Chicamocha aportaban material a la dovela de Bucaramanga. Siendo así, este es el origen principal de los sedimentos de la

Formación Bucaramanga, junto con un posible aporte lateral de los ríos Frío, del Hato, río de Oro y Suratá.

Las altas tasas de erosión de los cauces del Suárez y Chicamocha no se relaciona con las zonas de mayor precipitación, ni con el mayor caudal promedio, sin embargo, las precipitaciones del ciclo *ENSO* podría variar relativamente las tasas de erosión para ambos cauces en periodos estacionales; en el valle del Chicamocha las altas tasas de erosión se relacionan con rocas erodibles y microclimas áridos que posiblemente conlleva a la ausencia de la cobertura vegetal, necesaria para otorgar resistencia a los procesos erosivos. El comportamiento geomecánico de las rocas afecta la erodabilidad del lecho, siendo  $K$  un parámetro muy influyente en la incisión fluvial.

El presente paisaje de la zona de las Mesas y sus cañones se deriva de eventos geológicos recientes: un fraccionamiento de la plataforma primitiva por las fallas principales, los procesos de levantamiento y una propagación inicial de la onda erosiva a través de un tributario del río Magdalena (río Sogamoso) que llega hasta el interior del orógeno (Cordillera Oriental), conlleva a una reorganización en la red de drenaje y eventos de captura fluviales potentes como los antiguos ríos Suárez y Chicamocha, profundizando en la incisión fluvial de los ríos principales para establecer la configuración actual del relieve.

El Cañón del Chicamocha se encuentra en proceso de declaratoria como Patrimonio Mundial ante la UNESCO, actualmente se ubica en la lista tentativa bajo la denominación *Cultural Landscape of the Lower Basin of the Chicamocha River*, en la categoría mixta y evaluado bajo los criterios (ii), (iv), (vii) y (viii), donde el aporte científico del presente trabajo podría contribuir significativamente a ser catalogarlo con un Valor Universal Excepcional por el cumplimiento del criterio (viii).

## 10.RECOMENDACIONES

La reorganización de la red de drenaje en orógenos de inversión se basa en las observaciones de las cadenas montañosas de Alto Atlas, la Cordillera Oriental y los Pirineos (Babault *et al.*, 2013), las dos primeras se caracterizan por su acortamiento a lo largo de las márgenes antiguas de *rift* y al interior poseen un área de mesetas poco deformadas con un relieve estructural homogéneo; por consiguiente se recomienda adelantar un estudio sobre la reorganización de la red de drenaje al interior del área de mesetas del Alto Alta de Marruecos, para ser cotejados con los resultados de este estudio e identificar si existe un patrón de control en común que pueda enriquecer el modelo de reorganización fluvial en orógenos de inversión propuesta por Babault *et al.* (2013).

El depósito fluvial ubicado en el valle del río Umpalá se caracteriza por su gran dimensión para haber sido depositado por el cauce actual, este depósito se deriva de la captura fluvial del río Chicamocha (Ballesteros, 2002). Otros depósitos situados en Cepitá y en Pescadero cuya composición es de tipo tonalítico y granodiorítico sugieren una lejana procedencia NE (zona central del Macizo de Santander); los últimos dos depósitos soportarían la evidencia de un cambio de la dirección del flujo S-N del río Chicamocha (Ballesteros, 2002), por lo tanto se sugiere realizar estudios de procedencia de los depósitos mencionados, que permita reconocer la distribución espacio-temporal de los clastos e identificar con mayor precisión posibles áreas fuente y litologías asociadas a la fuente del sedimento, para esclarecer en lo posible si existió cambios en la dirección del flujo del Chicamocha.

El análisis de relación de orden efectuado a los parámetros de la ecuación (9) (incisión fluvial) no correspondió al comportamiento que se esperaba, se aconseja evaluar los parámetros del modelo empleado y tomar en cuenta otros posibles factores que puedan influir en el resultado, esto con el fin de comprender mejor el

comportamiento de la incisión fluvial en la zona de estudio para obtener modelos más representativos de la realidad.

## BIBLIOGRAFÍA

ALBERT, James and CRAMPTON, William. The geography and ecology of diversification in Neotropical freshwaters. *Nature Education Knowledge* [online]. 2010, vol. 1, p. 13-19. Available from Internet: <<http://www.nature.com/scitable/knowledge/library/the-geography-and-ecology-of-diversification-in-5667887>>.

ANTÓN, Loreto, *et al.* Quantification of fluvial incision in the Duero Basin (NW Iberia) from longitudinal profile analysis and terrestrial cosmogenic nuclide concentrations. *Geomorphology* [online]. 2012, vol. 165, p. 50. Available from internet: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X11006519>>.

BABAULT, Julien *et al.* High Atlas morphology: insight from the drainage pattern. III workshop of the ILP Task force on Sedimentary Basins [online]. Marrakech. 2007. Available from internet: <[http://www.searchanddiscovery.com/pdfz/abstracts/pdf/2008/mapg\\_morocco/abstracts/ndx\\_babault.pdf.html](http://www.searchanddiscovery.com/pdfz/abstracts/pdf/2008/mapg_morocco/abstracts/ndx_babault.pdf.html)>.

BABAULT, Julien *et al.* Longitudinal to transverse drainage network evolution in the High Atlas (Morocco): The role of tectonics. *Tectonics* [online]. 2012, vol. 31, no 4, p. 1-15. Available from internet: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2011TC003015/epdf>>.

BABAULT, Julien *et al.* Shortening, structural relief and drainage evolution in inverted rifts: insights from the Atlas Mountains, the Easter Cordillera of Colombia and the Pyrenees. *The Geological Society of London* [online]. 18 June 2013, vol. 377, p. 141-158. Available from internet: <<http://sp.lyellcollection.org/content/early/2013/06/14/SP377.14>>.

BALLESTEROS, Juan. Estudio geomorfológico-paisajístico del cañón del río Chicamocha en el tramo Cepita-Pescadero-Jordán: Aporte al conocimiento del

patrimonio geológico del departamento de Santander. Trabajo de grado de geólogo. Bucaramanga Santander. Universidad Industrial de Santander. Facultad Fisicoquímica. Escuela de Geología. 2002. p. 1-172.

BISHOP, Paul. Drainage rearrangement by river capture, beheading and diversion. *Progress in Physical Geography* [online]. 1995, vol. 19, no. 4, p. 449-473. Available from Internet: <<http://ppg.sagepub.com/content/19/4/449.full.pdf+html>>.

BOINET, T., Burgois, J., Mendoza, H. y Vargas, R. 1989. La Falla de Bucaramanga (Colombia): su función durante la Orogenia Andina. *Geol. Norandina*, 1989, vol. 11, p. 3-10.

BROWN, Erik, *et al.* Examination of surface exposure ages of Antarctic moraines using in situ produced  $^{10}\text{Be}$  and  $^{26}\text{Al}$ . *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1991. vol. 55, no 8, p. 2269-2283.

BUENO, E. y SOLARTE, A. Geología, Geotecnia y Comportamiento Erosivo del Área de Reserva Forestal de Bucaramanga. 1994. Trabajo de grado para título de Geólogo. Universidad Industrial de Santander. 1994. Citado por SOLANO. *Op. cit.*, p. 162.

BURBANK, Douglas and ANDERSON, Robert. *Tectonic geomorphology*. 2011. Second edition. Wiley-Blackwell, p. 285. ISBN 978-1-4443-3886-7.

CABALLERO, Víctor *et al.* Factors controlling selective abandonment and reactivation in thick-skin orogens: a case study in the Magdalena Valley, Colombia. *Geological Society, London, Special Publications*, 2013, vol. 377, no 1, p. 343-367.

CABALLERO, Víctor *et al.* Tectonic controls on sedimentation in an intermontane hinterland basin adjacent to inversion structures: The Nuevo Mundo syncline, Middle

Magdalena Valley, Colombia. Geological Society, London, Special Publications, May 16, 2013, vol. 377, no 1, p. 315-342. Available from internet: <<http://sp.lyellcollection.org/content/377/1/315.short>>.

CASTILLO, Miguel y LUGO-HUBP, José. Estado actual del conocimiento, clasificación y propuesta de inclusión del término knickpoint en el léxico geológico-geomorfológico del español. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana [online]. 2011, vol. 63, no 2, p. 353-364. Disponible en internet: <<http://www.scielo.org.mx/pdf/bsgm/v63n2/v63n2a>>

CHRISTIANSEN, Eric and KENNETH, William. Dynamic Earth. Jones & Bartlett Publishers, 2014. ISBN 1449659020. p. 333.

COLOMBIA, INGEOMINAS. Geología de la Plancha 121 Cerrito. Escala 1:100.000. WARD, Dwight *et al.* con colaboración del: U.S.GEOLOGICAL SURVEY (Convenio 514-L-030 de la A.I.D.). 1997. Versión digital 2010.

COLOMBIA. AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS-ANH. Cuenca Valle Medio del Magdalena. Integración geológica de la digitalización y análisis de núcleos Pozo: infantas-1613. Evaluación Petrofísica ShaleXpert. Pozos: Catalina-1 y Cocuyo-1. 2012. p. 1-82.

COLOMBIA. INGEOMINAS. Geología de la Plancha 120 Bucaramanga. Escala 1:100.000. WARD, Dwight *et al.* con colaboración del: U.S.GEOLOGICAL SURVEY (Convenio 514-L-030 de la A.I. D.). 1997. Versión digital 2010.

COLOMBIA. INGEOMINAS. Geología del Departamento de Santander. Escala 1:300.000. ROYERO, José y VARGAS, Rodrigo. 1999.

COLOMBIA. INGEOMINAS. Geological map of Colombia. Scale 1:1.000.000. First edition. GÓMEZ, Jorge. *et al.* 2007.

COLOMBIA. INGEOMINAS. Mapa Geológico de Colombia. Escala 1:2.800.000. Primera edición. GÓMEZ, Jorge. *et al.* 2006.

COLOMBIA. INGEOMINAS. Mapa Geológico del Cuadrángulo H-12, Bucaramanga. Escala 1:100.000. WARD, Dwight *et al.* con colaboración del: U.S.GEOLOGICAL SURVEY (Convenio 514-L-030 de la A.I.D.). 1997. Versión digital 2000.

COLOMBIA. INGEOMINAS. Modelo de evolución morfotectónica cuaternaria basado en evidencias estructurales, neotectónicas y paleosismológicas de los principales sistemas de falla en la región de Bucaramanga. DIEDERIX, Hans *et al.* 2008, p. 1-145.

COLOMBIA. INGEOMINAS. Zonificación sismogeotécnica indicativa del área metropolitana de Bucaramanga. Subdirección de Amenazas Geoambientales, 2001. p. 1-270.

COLOMBIA. INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES – IDEAM. Zonificación y codificación de unidades hidrográficas e hidrogeológicas de Colombia, 2013. Colombia. p. 1-46.

COLOMBIA. INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES – IDEAM. Sistema de Información Ambiental de Colombia - SIAC [online]. Catálogo de mapas. Escenario Precipitación para Colombia (mm) periodo 1976-2005. 2015. Escala 1:9.000.000. Disponible en internet: <[http://www.siac.gov.co/Catalogo\\_mapas.html](http://www.siac.gov.co/Catalogo_mapas.html)>.

COLOMBIA. INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES – IDEAM. Sistema de Información Ambiental de Colombia - SIAC [online]. Catálogo de mapas. Mapa de Clasificación Climática de Caldas Lang. 2012. Escala 1:3.448.396. Disponible en internet: <[http://www.siac.gov.co/Catalogo\\_mapas.html](http://www.siac.gov.co/Catalogo_mapas.html)>.

COLOMBIA. INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI. Geoportal del IGAC. Visor de cartografía gráfica con relieve. Escala 1:500.000 y 1:100.000. Disponible en internet: <<http://geoportal.igac.gov.co/ssigl2.0/visor/galeria.req?mapald=22>>.

COOPER, Mark *et al.* Basin development tectonic history of the Llanos basin, Eastern Cordillera, and Middle Magdalena Valley, Colombia. AAPG Bulletin [online]. 1995, vol. 79, no. 10, p. 1421-1427. Available from internet: <<http://archives.datapages.com/data/bulletns/1994-96/data/pg/0079/0010/1400/1421.htm?doi=10.1306%2F7834d9f4-1721-11d7-8645000102c1865d#purchaseoptions>>.

CORTES, Martin y ANGELIER, Jacques. Paleostress evolution of the northern Andes (Eastern Cordillera of Colombia): Implications on plate kinematics of the South Caribbean revista Tectonics [online], 2005. vol. 24 p. 1-27. Available from internet: <[http://www.cgares.org/Directorio/Archivos/1447\\_Cortes%20Tectonics.pdf](http://www.cgares.org/Directorio/Archivos/1447_Cortes%20Tectonics.pdf)>.

DE PORTA, J., *et al.*, 1974. Lexique Stratigraphique International. Centre National Recherche Scientifique. Volume V. Amerique Latine, fascicule 4b, Colombie, p. 692.

DUDDY, Ian, *et al.* AFTA apatite fission track analysis constraints on the Mesozoic to Quaternary thermal and tectonic evolution of the Middle Magdalena Basin and Santander Massif, Eastern Cordillera, Bucaramanga area, Colombia. Asociación Colombiana de Geólogos y Geofísicos del Petróleo [online]. In X Simposio Bolivariano: Exploración Petrolera en Cuencas Subandinas, Memoir, Cartagena,

Colombia. 2009. Available from internet: <[http://archives.datapages.com/data/colombia\\_acgpp/simp10/62.htm](http://archives.datapages.com/data/colombia_acgpp/simp10/62.htm)>.

ETAYO, Fernando *et al.*, 1983. Mapa de Terrenos Geológicos de Colombia. Publicaciones Geológicas Especiales INGEOMINAS, (14-I). p 1- 235. Bogotá. Citado por WARD *et al.* Op. cit., p. 13.

FERRANTI, Jonathan de. Viewfinder panoramas digital elevation data [online]. 2012. Last revision 26 May 2014. Available from internet: <<http://www.viewfinderpanoramas.org/dem3.html>>.

GARCÍA, Yenny, *et al.* Ríos Chicamocha y Suárez: Un ejemplo de la evolución de la red de drenaje en orógenos de inversión. XV Congreso Colombiano de Geología (Agosto 31 – Septiembre 5, 2015: Bucaramanga, Colombia). Memorias. Bucaramanga. Sociedad Colombiana de Geología, 2015. p. 719-722. ISBN 978-958-57950-1-3.

GONZÁLEZ, Jenifer y JIMÉNEZ, Gabriel. Análisis estructural y características microtectónicas de un segmento de la Falla Bucaramanga en los alrededores del corregimiento Umpalá, Santander, Trabajo de grado para optar al título de geólogo. Universidad Industrial de Santander. 2015, p. 1-184.

GROHMANN, Carlos Henrique, *et al.* Regional scale analysis of landform configuration with base-level (isobase) maps. Hydrology and Earth System Sciences [online]. 2011, vol. 15, no 5, p. 1493-1504. . Available from Internet: <<http://www.hydrol-earth-syst-sci.net/15/1493/2011/hess-15-1493-2011.pdf>>.

HOKE, Gregory, *et al.* Geomorphic evidence for post-10 Ma uplift of the western flank of the central Andes 18°30'–22°S. Tectonics [online]. 2007, vol. 26, no. 5, p. 1-

17. Available from Internet: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2006TC002082/pdf>>.

HOVIUS, Niels. Regular spacing of drainage outlets from linear mountain belts. Basin Research [online]. 1996, vol. 8, no. 1, p. 29-44. Available from internet: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-2117.1996.tb00113.x/full>>.

IBISATE, Askoa. Análisis morfométrico de la cuenca y de la red de drenaje del río Zadorra y sus afluentes aplicado a la peligrosidad de crecidas. Boletín de la AGE [online]. 2004, vol. 38, p. 311-329. Disponible en internet: <<http://boletin.age-geografia.es/articulos/38/17%20IBISATE%20311-329.pdf>>.

JIMÉNEZ *et al.*, 2015. Magnetic stratigraphy of the Bucaramanga alluvial fan: evidence for a  $\leq 3$  mm/yr slip rate for the Bucaramanga-Santa Marta Fault, Colombia. Journal of South American Earth Sciences [online], 2015. vol. 57, p. 12-22. Available from internet: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0895981114001540>>.

JULIVERT, Manuel, *et al.* Léxico estratigráfico, vol. 5 fascículo 4a [en línea]. Bucaramanga Universidad Industrial De Santander, 1968. Disponible en internet: <[http://www.academia.edu/6744193/Julivert\\_1968\\_Lexico\\_estratigrafico](http://www.academia.edu/6744193/Julivert_1968_Lexico_estratigrafico)>.

JULIVERT, Manuel. La Morfoestructuras de la zona de las Mesas SW de Bucaramanga (Colombia S.A.). Boletín geológico. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 1958. no. 1, p. 7-43.

LAGUE, Dimitri. The stream power river incision model: evidence, theory and beyond. Earth Surface Processes and Landforms [online]. 2014, vol. 39, no 1, p. 38-61. Available from internet: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/esp.3462/pdf>>.

LAVERDE, F. y CLAVIJO, J., 1985. Análisis facial de la Formación Los Santos, según el corte de «Tú y Yo» (Zapatoca). Proyecto Cretácico. Publicaciones Geológicas Especiales INGEOMINAS.

LIMA, C. y MEDINA, J. Evolución climática registrada y estratigrafía del Miembro Órganos de la Formación Bucaramanga. Trabajo de grado para optar al título de geólogo. Universidad Industrial de Santander. 2015, p. 100.

MARDONES, María, *et al.* El patrón hidrográfico de la cuenca del río Blanco: control tectónico y geomorfológico. Revista de Geografía Norte Grande [online]. 2007, no. 38, p. 79-98. Available from Internet: <[http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-34022007000200005](http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-34022007000200005)>.

MONROE, James *et al.* Geología. Dinámica y evolución de la Tierra. Cuarta edición. 2008. Paraninfo, Madrid. p. 346. ISBN 978-84-9732-459-5.

MONTEALEGRE, José. COLOMBIA. Actualización del componente Meteorológico del modelo institucional del IDEAM sobre el efecto climático de los fenómenos El Niño y La Niña en Colombia, como insumo para el Atlas Climatológico. Informe Final, Bogotá, D.C., Agosto 20 de 2014. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. p. 1-134.

MORA, Andrés *et al.* Inversion tectonics under increasing rates of shortening and sedimentation: Cenozoic example from the Eastern Cordillera of Colombia. Geological Society, London, Special Publications, 2013, vol. 377, no 1, p. 411-442.

PARDO-TRUJILLO, Andrés and ROCHE, Emile. Paleocene-Eocene palynology and palynofacies from northeastern Colombia and western Venezuela. Cuaderno de Investigación N° 41, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales [online]. Universidad de Caldas, Manizales, 2009. p. 1-333. ISBN 978-958-8319-95-7. Available from

internet: <<http://iies.ucaldas.edu.co/sites/default/files/pdf-publicaciones/Paleocene-Eocene%20Palynology%20and%20Palynofacies%20from%20Northeastern%20Colombia%20and%20Western%20Venezuela.pdf>>.

PARIS *et al.*, 2000. Map and Database of Quaternary Faults and Folds in Colombia and its Offshore Regions. U.S. Geological Survey-USGS, Report 00-0284, Denver, Colorado, USA. 2000. p. 1-61.

PASTOR, Alvar. Las capturas fluviales: contextos, causas y consecuencias. Una explicación de los procesos de captura fluvial en distintos contextos geológicos. Revista de Geografía Espacios [online]. 2013, vol. 3, no. 5, p. 27-41. Available from Internet: <[http://www.revistaespacios.cl/pdf/n5/03\\_pastor\\_espacios\\_05.pdf](http://www.revistaespacios.cl/pdf/n5/03_pastor_espacios_05.pdf)>.

POVEDA, Germán y MESA, Oscar. Feedbacks between Hydrological Processes in Tropical South America and Large-Scale Ocean–Atmospheric Phenomena. Journal of climate [online], 1997, vol. 10, no 10, p. 2690-2702. Available from internet: <[http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442\(1997\)010<2690:FBHPIT>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442(1997)010<2690:FBHPIT>2.0.CO;2)>.

POVEDA, Germán. ¿Atractores extraños (CAOS) en la hidro-climatología de Colombia? Revista Académica Colombiana Ciencias de la Tierra [en línea], noviembre 1997. vol. 21, no 81. Disponible en internet: <<http://www.docentes.unal.edu.co/gpoveda/docs/Poveda%20Caos%20Colombia%20ACCEFYN.pdf>>.

PRINCE, Philip *et al.* New physical evidence of the role of stream capture in active retreat of the Blue Ridge escarpment, southern Appalachians. Geomorphology [online]. 2010, vol. 123, no 3, p. 305-319. Available from internet: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X10003363>>.

RESTREPO, J.; KJERFVE, B. Magdalena river: interannual variability (1975–1995) and revised water discharge and sediment load estimates [online]. Journal of

hydrology, 2000. vol. 235, no. 1, p. 137-149. Available from internet <[http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00269-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00269-9)>.

RODRIGUEZ-VARGAS, A. *et al.* Mantle diversity beneath the Colombian Andes, northern volcanic zone: constraints from Sr and Nd Isotopes. *Lithos* [online]. 2005, vol. 82, no 3, p. 471-484. Available from internet: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0024493705000277>>.

ROYERO, José y CLAVIJO, Jairo. Mapa geológico generalizado departamento de Santander. Memoria Expliactiva. Instituto de Investigación e Información Geocientífica, Minero-Ambiental y Nuclear -INGEOMINAS. Escala 1: 400.000. 2001. p. 1-92.

SANTANDER. SECRETARÍA DE PLANEACIÓN y UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER. Santander 2030. Tomo I. Diagnóstico dimensión biofísico ambiental territorial de Santander [en línea]. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. 2011. p. 1-250. Disponible en Internet: <<https://www.uis.edu.co/webUIS/es/investigacionExtension/documentos/docInteres/Tomo%20I%20Dimension%20Biofisica%20Ambiental.pdf>>.

SILVA, A. *et al.* Basin compartmentalization and drainage evolution during rift inversion: Evidence from the Eastern Cordillera of Colombia. *Geological Society, London, Special Publications*, June 19 2013, vol. 377, p. 369-409.

SNYDER, Noah *et al.* Landscape response to tectonic forcing: Digital elevation model analysis of stream profiles in the Mendocino triple junction region, northern California. *Geological Society of America Bulletin*. 2000, vol. 112, no 8, p. 1250-1263.

SOLANO, Leonardo. Estudio de proveniencia de los sedimentos de la Formación Bucaramanga, al sur del río Frío; en los municipios de Floridablanca y Girón, Santander. Trabajo de grado para optar al título de geólogo. Universidad Industrial de Santander. 2016, p. 1-171.

STRUTH, Lucía *et al.* Tectónica y evolución de la red de drenaje en la Cordillera Oriental de Colombia. Geotemas [online]. 2012, vol. 13, p.1-4. Available from internet: <[http://gent.uab.cat/ateixell/sites/gent.uab.cat/ateixell/files/Struth%20et%20al%20Geotemas%202012\\_0.pdf](http://gent.uab.cat/ateixell/sites/gent.uab.cat/ateixell/files/Struth%20et%20al%20Geotemas%202012_0.pdf)>.

STRUTH, Lucía *et al.* Drainage reorganization during mountain building in the river system of the Eastern Cordillera of the Colombian Andes. Geomorphology [online]. 12 November 2015, vol. 250, p. 370-383. Available from internet: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.09.012>>.

STRUTH, Lucía y TEIXELL, Antonio. Dinámica fluvial en rifts invertidos a partir del parámetro  $\chi$ : aplicación a la Cordillera Oriental de Colombia y a otras cordilleras de referencia. Geogaceta [online]. 2016, vol. 60, p. 55-58. Disponible en internet: <[http://www.sociedadgeologica.es/archivos/geogacetas/geo60/Geogaceta\\_60\\_completa.pdf](http://www.sociedadgeologica.es/archivos/geogacetas/geo60/Geogaceta_60_completa.pdf)>.

STRUTH, Lucía. Evolution of fluvial drainage during mountain building in the Eastern Cordillera of the Colombian Andes. Ph. D. Thesis. Universitat Autònoma Barcelona. June 2016, p. 1-114.

TABOADA, Alfredo *et al.* Geodynamics of the northern Andes: Subductions and intracontinental deformation (Colombia). Tectonics [online]. October 2000, vol. 19, no. 5, p. 787-813. Available from internet: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2000TC900004/epdf>>.

TABORDA, Bernardo. Guidebook to the geology of the De Mares Concession: field trip of February 26-28, 1965 Colombian Society of Petroleum Geologists and Geophysicists. 1965. p. 1-50. Citado por WARD *et al.* Op. cit., p. 88.

TAYLOR, T. G. A discussion of the salient features in the physiography of eastern Australia: Commonwealth Bur. Meteorology Bull, 1911, vol. 8, no 18, p. 77-95.

TERRAZA, Manuel. Estratigrafía y ambientes de depósito de la Arenisca de Chiquinquirá en los alrededores de la localidad tipo. Boletín de geología, julio-diciembre de 2012. vol. 34, no. 2, p. 2-18.

TESÓN, Eliseo *et al.* Capturas fluviales recientes de los ríos Chicamocha y Suárez: El origen de la Terraza de Bucaramanga y causas de la reorganización de la red de drenaje. XV Congreso Colombiano de Geología (Agosto 31 – Septiembre 5, 2015: Bucaramanga, Colombia). Memorias. Bucaramanga. Sociedad Colombiana de Geología, 2015. p. 127-130. ISBN 978-958-57950-1-3.

TESÓN, Eliseo *et al.* Capturas fluviales recientes de los ríos Chicamocha y Suárez: El origen de la Terraza de Bucaramanga y causas de la reorganización de la red de drenaje. XV Congreso Colombiano de Geología (Agosto 31 – Septiembre 5, 2015: Bucaramanga, Colombia). Ponencia Oral. 02 de septiembre de 2015.

TORO, Jaime. The termination of the Bucaramanga fault in the Cordillera Oriental, Colombia. 1990. Thesis the Master of Science. University of Arizona. P. 1-60.

TOUSSAINT, Jean-François. Evolución geológica de Colombia. Universidad Nacional de Colombia, 1993.

UJUETA, Guillermo. La falla de Santa Marta-Bucaramanga no es una sola falla; son dos fallas diferentes: la falla Santa Marta y la Falla de Bucaramanga. *Geología Colombiana*, 2003. vol. 28, p. 133-153.

UNIÓN TEMPORAL AUDICON AMBIOTEC. Elaboración de los estudio de diagnóstico prospectiva y formulación para la cuenca hidrográfica de los ríos Ubaté y Suárez (Departamento de Cundinamarca). Informe de la fase de diagnóstico. Contrato de Consultoría No. 800 de 2005. Bogotá D.C. 2006, p. 1-160. Disponible en internet: <<https://www.car.gov.co/index.php?idcategoria=43494&download=Y>>.

WARD, D. *et al.* Geología de los cuadrángulos H-12, Bucaramanga y H-13, Pamplona, Departamento de Santander. US Geological Survey e Instituto nacional de investigaciones geológico-mineras-INGEOMINAS. *Boletín Geológico*, 1973, vol. 21, no 1-3, p. 1-132.

WHIPPLE, Kelin and TUCKER, Gregory. Dynamics of the stream power river incision model: Implications for height limits of mountain ranges, landscape response timescales, and research needs. *Journal of Geophysical Research* [online]. 1999, vol. 104, no B8, p. 17661-17674. Available from internet: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/1999JB900120/epdf>>.

WHIPPLE, Kelin and TUCKER, Gregory. Implications of sediment-flux-dependent river incision models for landscape evolution. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* [online]. 2002, vol. 107, no B2, p. ETG 3-1-ETG 3-20. Available from internet: <10.1029/2000JB000044>.

WHIPPLE, Kelin *et al.* Geomorphic limits to climate-induced increases in topographic relief. *Nature* [online]. 1999, vol. 401, no 6748, p. 39-43. Available from internet: <<http://www.nature.com/nature/journal/v401/n6748/pdf/401039a0.pdf>>.

WHIPPLE, Kelin. Fluvial landscape response time: How plausible is steady-state denudation? *American Journal of Science* [online]. 2001, vol. 301, no 4-5, p. 313-325. Available from internet: <<http://www.ajsonline.org/content/301/4-5/313.full.pdf+html>>.

WIPPLE, Kelin. Bedrock rivers and the geomorphology of active orogens. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* [online]. 2004, vol. 32, p. 151-185. Available from Internet: <<http://www.annualreviews.org/doi/abs/10.1146/annurev.earth.32.101802.120356>>.

WOBUS, Cameron *et al.* Tectonics from topography: Procedures, promise, and pitfalls. *Geological Society of America Special Papers* [online]. 2006, vol. 398, p. 55-74. Available from internet: <<http://specialpapers.gsapubs.org/content/398/55.full.pdf+html>>.

## **ANEXOS**

Anexo A. Mapa Geológico. Vertiente Magdalena Medio sobre la Cordillera Oriental.  
Escala 1:1.000.000.

Anexo B. Mapa Geológico. Sector nororiental departamento de Santander. Región  
de las Mesas. Escala 1:300.000.

Anexo C. Red de Drenaje. Sector Nororiental departamento de Santander. Región  
de las Mesas. Escala 1:250.000.