

## Cinemática, dinámica y evolución geológica en el Río Apulo, Cundinamarca, Cordillera Oriental de los Andes Colombianos

Danna ROBAYO-PINZÓN<sup>1</sup>, Alejandra MEJÍA-MOLINA<sup>1</sup>, Ilich VILLAMIZAR-SOLANO<sup>1</sup>

**Abstract:** *KINEMATICS, DYNAMICS, AND GEOLOGICAL EVOLUTION OF THE APULO RIVER, CUNDINAMARCA, EASTERN CORDILLERA OF THE COLOMBIAN ANDES.* The Apulo River flows through the western part of the Eastern Cordillera in the northern Andes and is strategic for understanding the deformation and geological evolution of Colombia. In the Apulo sector, the Villeta Group outcrops in the riverbed as a record of marine events during the Lower Cretaceous. This study focuses on analyzing the kinematics, dynamics and geological evolution of the Hiló Formation - Villeta Group - from its deposition in the Middle Albian to the present. A structural section at a 1:1000 scale was surveyed, where 83 outcrops were analyzed and a total of 108 bedding planes, 572 joint planes, and 24 fault planes were measured. In addition, local stratigraphic columns were surveyed to record the lithological changes and fossil content. Two stages of deformation were determined, an older compressional stage, whose main stress has an E-W direction, characterized by reverse faults and folds; the second stage, neotectonic, corresponds to a NE-SW transpressional stress, with strike-slip faults with a compressive vertical component. The results of the dynamic analysis indicate that these stresses are associated with the Quinié systems and the Salcedo fault, which have caused the exhumation of part of the Apulo River anticline. In the same context, the neotectonic stress (NE-SW) is associated with the reactivation of the faults, which in this study are associated with the exhumation of the Apulo River anticline. Therefore, the neotectonic stress (NE-SW) is associated with the reactivation of faults, which are proposed to be referred to as the Apulo River Fault System.

**Resúmen:** El río Apulo discurre por el occidente de la Cordillera Oriental en el norte de los Andes, y es estratégico para la comprensión de la deformación y la evolución geológica de Colombia. En el sector de Apulo, aflora en el lecho del río, el Grupo Villeta como un registro de los eventos marinos acontecidos en el Cretácico inferior. Este estudio se centra en analizar la cinemática, dinámica y evolución geológica de la Formación Hiló - Grupo Villeta- desde su depositación en Albiano medio hasta la actualidad. Se realizó el levantamiento de una sección estructural a escala 1:1000 donde se analizaron 83 afloramientos y se midieron en total 108 planos de estratificación, 572 planos de diaclasas y 24 planos de falla. Además, del levantamiento de columnas estratigráficas locales para registrar los cambios litológicos y el contenido fósil. Se determinaron dos etapas de deformación, una primera más antigua y compresiva, cuyo esfuerzo principal tiene una dirección E-W, caracterizada por fallas inversas y pliegues; la segunda etapa, neotectónica, que corresponde a un esfuerzo transpresivo en sentido NE-SW, con fallas de rumbo con componente vertical compresivo. Los resultados del análisis dinámico indican que estos esfuerzos están asociados a los sistemas de Quinié y la falla de Salcedo, que han causado la exhumación de parte del anticlinal del río Apulo. Bajo el mismo contexto, el esfuerzo neotectónico (NE-SW) se asocia a la reactivación de las fallas, que en este estudio se proponen denominar Sistema de Fallas del río Apulo.

**Key words:** Kinematics. Dynamics. Neotectonics. Eastern Cordillera. Apulo. Colombia.

**Palabras clave:** Cinemática. Dinámica. Neotectónica. Cordillera Oriental. Apulo. Colombia.

<sup>1</sup> Facultad de Ciencias Básicas, Universidad de Pamplona. Autopista Internacional Vía Los Álamos Villa Antigua, 541030 Villa del Rosario-Norte de Santander, Colombia. Autor para correspondencia: (Danna Robayo-Pinzón)\* E-MAIL: danna.robayo@unipamplona.edu.com

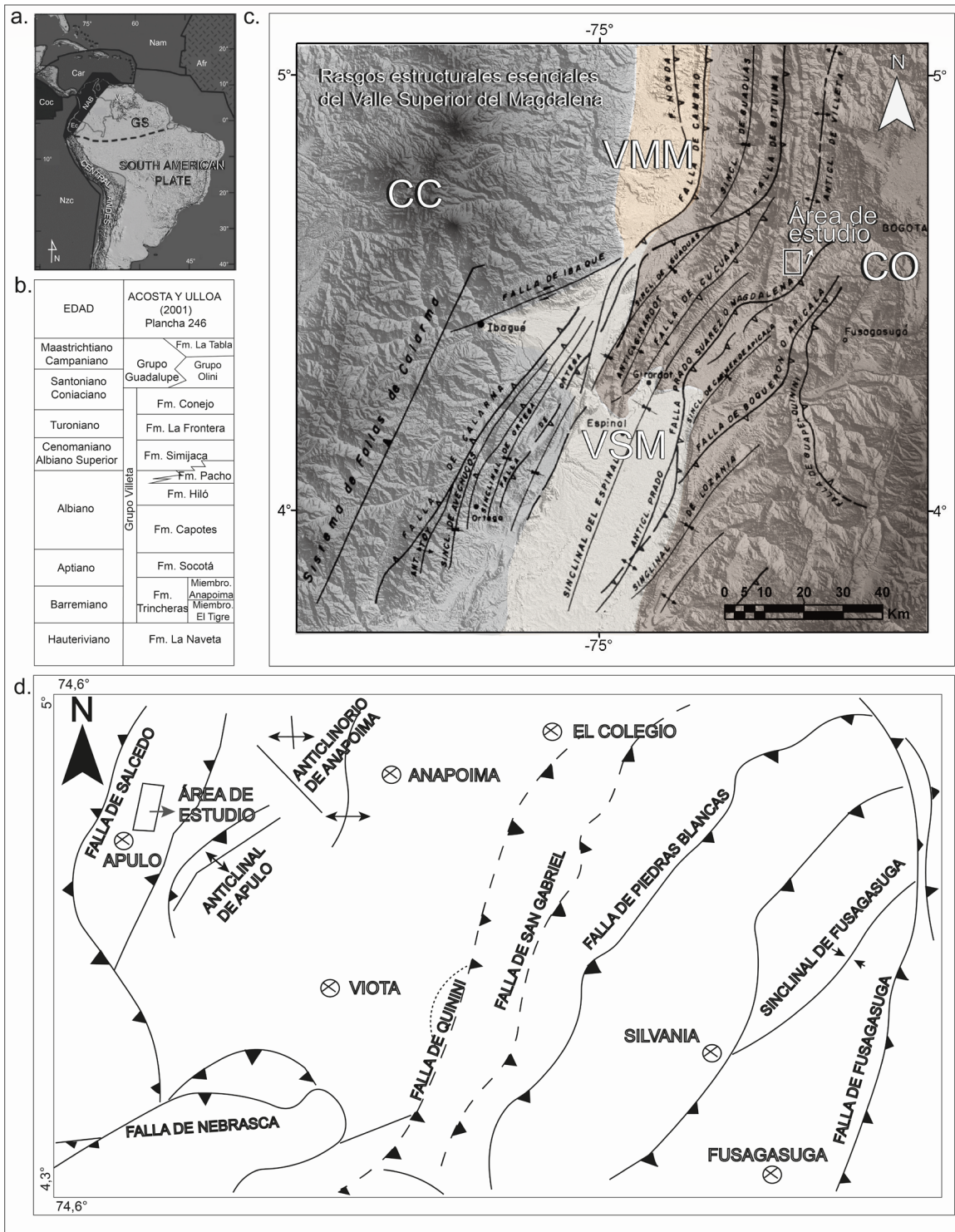
## Introducción

Esta investigación se circunscribe en lo que se denomina bloque norte de los Andes (NAB, Figura 1a), región sometida a una intensa deformación debido a la interacción de las placas de Nazca, Caribe, Suramericana y el Bloque Panamá al Noroccidente de Colombia (Cediel *et al.*, 2003). El río Apulo se encuentra al occidente de la Cordillera Oriental (CO) de los Andes colombianos, donde afloran rocas sedimentarias cretácicas marinas del Grupo Villeta que corresponde a una espesa secuencia de carácter pelítico en la que se presentan intercalaciones calcáreo-silíceas (Cáceres *et al.*, 1969). Las unidades constituyentes del Grupo Villeta, de base a techo, son: las formaciones Trincheras (dividido en los miembros El Tigre y Anapoima), Socotá, Capotes, Hiló, Simijaca, La Frontera y Conejo (Figura 1b). En el área de estudio aflora la Formación Hiló (Figura 1b) constituida por una sucesión de capas de lodolitas calcáreas, lentes de micrita e intercalaciones de areniscas de cuarzo (Acosta *et al.*, 2002). Cáceres *et al.*, (1969) le asignan a la Formación Hiló, una edad de Albiano medio, con base en las amonitas Venezoliceras, Oxytropidoceras y Loricula, que son indicativas de ambientes pelágicos y hemipelágicos. La posición geográfica del área de estudio en la CO, cercana al Valle del Magdalena (VM) en sus límites entre el Valle del Magdalena Medio (VMM) y superior (VSM) (Mojica *et al.*, 2002) (Figura 1c), se relacionan a cinturones plegados de sedimentos continentales del Jurásico y marinos del Cretácico. Superpuestos por sedimentos de cuenca tipo foreland en sinclinales del Paleoceno al Oligoceno (Kerr *et al.*, 2005; Bayona *et al.*, 2013). En la CO se evidencian distintos procesos de acumulación y levantamiento: la sedimentación marina y no marina durante la extensión mesozoica (Kammer *et al.*, 2006; Sarmiento *et al.*, 2006) y el acortamiento cenozoico producto de la convergencia oblicua de las placas Suramericana, Nazca y Caribe; evidenciado en múltiples fases de deformación compresional. Dicho acortamiento tiene una fase neotectónica que corresponde a

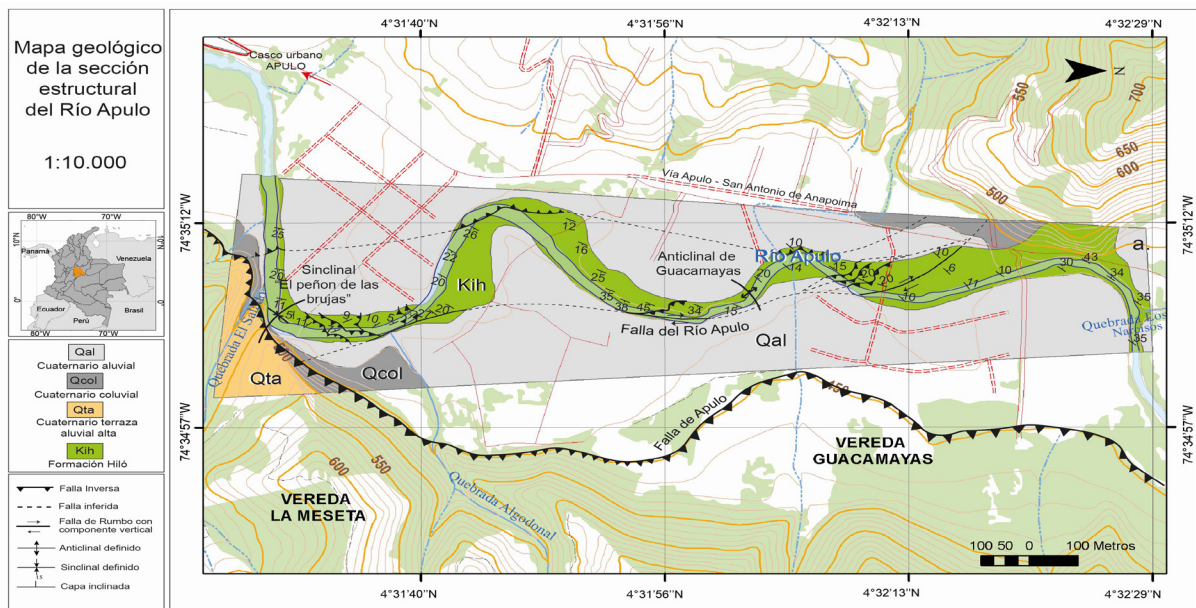
su mayor actividad en el Plioceno - Pleistoceno (Villar *et al.*, 2017). Las estructuras principales en el área del río Apulo, son el sistema de fallas de Quinín al NE, la falla de Nebraska al S y la falla de Salcedo al W, delimitando el bloque tectónico del área (Figura 1d). Este bloque está conformado por pliegues angostos, afectados por fallas de cabalgamiento (fallas de Salcedo y Fusagasugá), con dirección NE y vergencia al E. En el sector de Apulo aflora el anticlinal de Apulo, afectado en sus flancos por cabalgamientos que convergen hacia el núcleo (Acosta *et al.*, 2002). Este sistema de fallas genera un control estructural sobre el anticlinal de Apulo (Figura 1d). El río Apulo disecta este anticlinal, que se enmascara por los depósitos de terrazas aluviales cuaternarios (Alvarado *et al.*, 1988). La sección estudiada se encuentra al nororiente de la desembocadura del río Apulo con el río Bogotá, al W de la CO (Figuras 1 y 2). El lecho del río Apulo es un afloramiento continuo de rocas de la Formación Hiló. El presente trabajo de investigación realiza aportes detallados a la comprensión de la geología estructural del flanco occidental de la CO en Colombia, a través de la interpretación de la cinemática y dinámica para proponer un modelo evolutivo de la deformación regional en el bloque norte de Suramérica.

## Metodología

Para la cartografía geológica se utilizaron las fotografías aéreas 31, 32 y 33 del vuelo R-929 del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC- Colombia), obteniendo información cartográfica, geomorfológica y estructural preliminar. El levantamiento cartográfico a escala 1:1000 en la sección del río Apulo se llevó a cabo mediante una poligonal abierta (Inicio: 74° 35' 9,731" W 4° 31' 31,694" N, Final: 74° 35' 2,915" W 4° 32' 29,181" N). En cada segmento levantado se midieron datos en afloramientos (discontinuidades en un metro cuadrado), estratificación, diaclasas, planos de falla y ejes de pliegues. Lo que permitió la definición de bloques tectónicos o estructurales, en los cuales se realizó el levanta-



**Figura 1. a.** Marco tectónico del noroeste de América del Sur. NAB = Bloque Andino Septentrional; Car = Placa Caribe; Nzc=Placa de Nazca; Coc = Placa de Cocos; Nam = Placa Norteamericana; Afr = Placa Africana; GS = Escudo Guayanés; Ec, Col, Ve = límites geográficos de Ecuador, Colombia y Venezuela, respectivamente. **b.** Columna generalizada del Grupo Villeta en la Cordillera Oriental de los Andes Colombianos (Acosta & Ulloa, 2002). **c.** Marco tectónico regional. VMM= Valle medio del Magdalena, VSM= Valle superior del Magdalena, CC= Cordillera Central, CO= Cordillera Oriental. Modificado de Mojica & Franco (1990). **d.** Marco tectónico Local (Acosta & Ulloa, 2002). **Figure 1. a.** Tectonic framework of northwestern South America. NAB = Northern Andean Block; Car = Caribbean Plate; Nzc = Nazca Plate; Coc = Cocos Plate; Nam = North American Plate; Afr = African Plate; GS = Guiana Shield; Ec, Col, Ve = geographical boundaries of Ecuador, Colombia, and Venezuela, respectively. **b.** Generalized column of the Villeta Group in the Eastern Cordillera of the Colombian Andes (Acosta & Ulloa, 2002). **c.** Regional tectonic framework. VMM = Middle Magdalena Valley, VSM = Upper Magdalena Valley, CC = Central Cordillera, CO = Eastern Cordillera. Modified from Mojica & Franco (1990). **d.** Local tectonic framework (Acosta & Ulloa, 2002).



**Figura 2.** Localización y mapa geológico escala 1:10,000 de la sección del río Apulo, Colombia. / **Figure 2.** Location and geological map scale 1:10,000 of the Apulo River section, Colombia.

tamiento de columnas estratigráficas a escala 1:1 y un análisis de los datos mediante el uso del software libre *WinTensor* 5.9.2. El análisis de los datos permite determinar la cinemática dinámica de cada bloque y de la región. Con los resultados del análisis se asociaron y compararon los diferentes procesos de deformación documentados para el entorno del río Apulo, y así proponer y robustecer el conocimiento actual de la evolución geológica de la CO de los Andes colombianos.

## Resultados

En la sección estructural del río Apulo se determinaron veintidós (22) bloques tectónicos o estructurales que fueron definidos por el control estructural evidenciado a través de la medición ochenta y tres (83) afloramientos (Figura 3). A continuación, se presenta la descripción de los bloques tectónicos partiendo desde el inicio de la poligonal abierta (Bloque A) hasta el final de esta (Bloque U), organizados en conjuntos de tres bloques cada uno.

### Bloques tectónicos A, B, C

En el bloque A se midieron tres (3) familias de diaclasas; el bloque B se asocia al flanco S del Sinclinal Peñón de Las Brujas (Figura 2) y en el Bloque C se encontraron amonitas con deforma-

ción dúctil (*Oxytropidoceras* sp. y *Brancoeras* aff.). La elongación de los ejemplares permite el análisis del esfuerzo principal ( $\sigma_1$ ) el cual resulta en dirección E- W que al realizar compresión permite que el ejemplar se elongue en dirección al esfuerzo secundario ( $\sigma_2$ ) NE-SW (Tabla 1 y Figura 4).

### Bloques tectónicos D, E, F

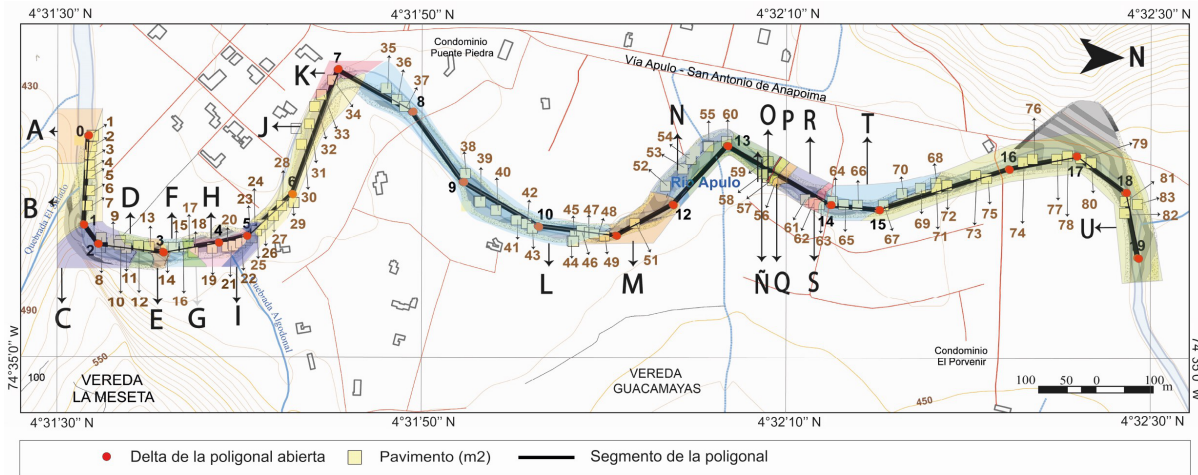
El bloque D y F tienen sistemas de diaclasas con una dirección de rumbo preferencial NE-SW; las diaclasas son tectónicas ya que son paralelas al rumbo de la falla inversa 3 (Tabla 2 y Figura 5).

### Bloques tectónicos G, H, I

Dentro del bloque G se identifican dos (2) familias de diaclasas (Tabla 3 y Figura 6). El bloque tectónico H tiene venillas en echelon - estructuras sigmoidales que están rellenas de calcita - resultado de la actividad de la falla de cabalgamiento 9 en dirección SW (Figura 6 IV). El Bloque I tiene dos (2) familias de diaclasas correspondientes a un esfuerzo NE-SW y a un esfuerzo E-W.

### Bloques tectónicos J, K, L

El Bloque J presenta en sus afloramientos hasta tres (3) familias de diaclasas (Tabla 4 y Figura 7II). En el Bloque K los sistemas de diaclasas muestran una tendencia hacia el NW-SE en tanto



**Figura 3.** Bloques tectónicos y afloramientos sobre la sección estructural río Apulo. Coordenadas de la poligonal abierta. Inicio: 74° 35' 9,731" W 4° 31' 31,694" N, Final: 74° 35' 2,915" W 4° 32' 29,181" N). / **Figure 3.** Tectonic blocks and outcrops over the Apulo River structural section. Coordinates of the open traverse. Start: 74° 35' 9.731" W 4° 31' 31.694" N, End: 74° 35' 2.915" W 4° 32' 29.181" N).

que en el Bloque L la tendencia es NE-SW.

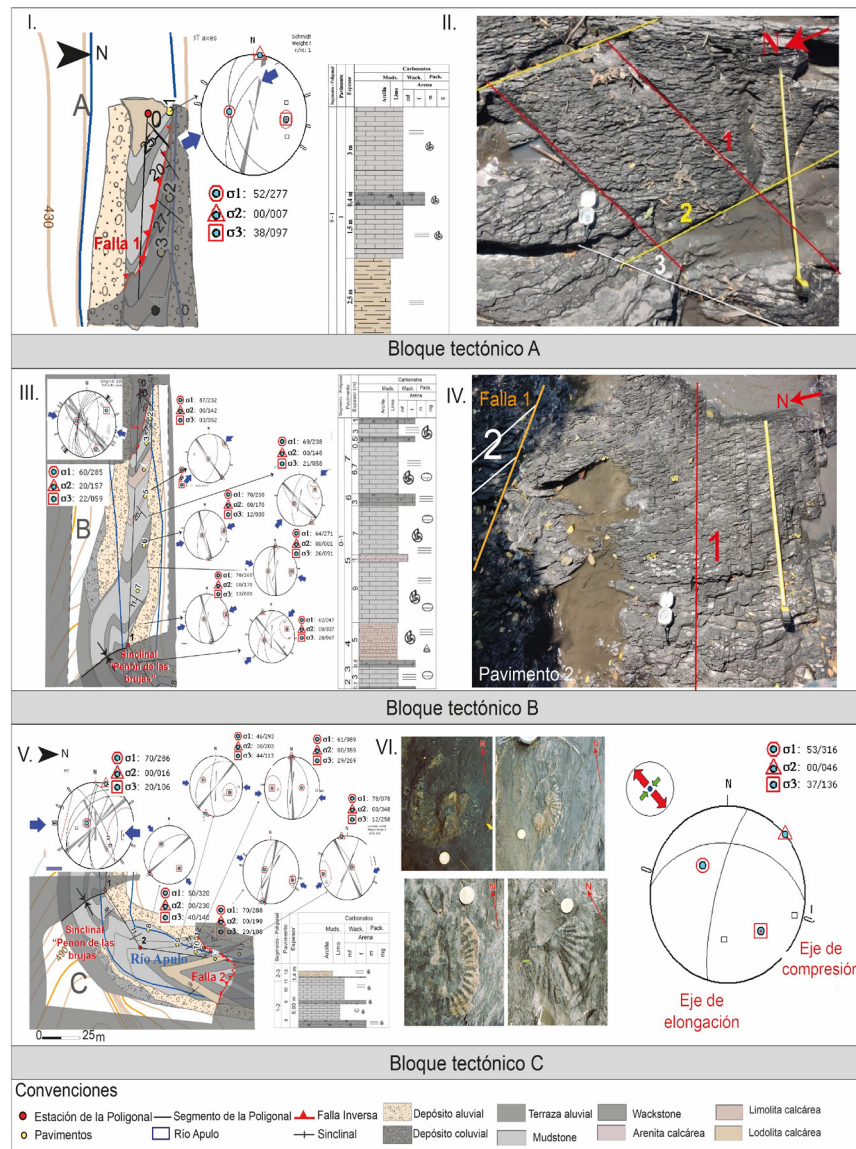
**Bloques tectónicos M, N, Ñ**

El bloque M tiene dos (2) familias de diaclasas casi perpendiculares entre sí (NE-

SW, Figura 8I y 8II). El bloque N tiene dos (2) familias de diaclasas (NE- SW, Figura 8III y 8IV). y en el Ñ se reconocen dos (2) sistema de diaclasas (NE-SW) (Tabla 5 y Figura 8V y 8VI).

Bloque tectónico	Límites	Afloramiento	Discontinuidades (Acimut de rumbo)			Análisis estructural (Acimut de rumbo)
			Diaclasa	Tendencia	Intensidad	
A	Inicio del segmento 0-1 a la Falla inversa 1	1	1	190/51	7	σ1 dirección E-W 277/52
			2	162/55	4	
			3	210/62	2	
B	Desde la Falla inversa 1, abarca el flanco W del Sinclinal "El Peñón de las brujas" al eje del pliegue.	2	1	190/65	3	σ1 dirección E-W 285/60
			2	132/85	7	
		3	1	140/85	20	
			2	014/60	1	
		4	3	153/68	1	
			1	130/68	10	
		5	2	200/67	2	
			3	210/72	1	
		6	1	175/65	7	
			2	195/62	3	
7	1	164/82	8			
	2	195/65	2			
	1	135/67	9			
C	Del eje del pliegue sinclinal "El Peñón de las brujas" abarcando su flanco E hasta la Falla inversa 2	8	1	230/50	6	σ1 dirección E-W 286/70, que se confirma con la evidencia de fósiles deformados de σ1 NW-SE y σ2 NE-SW
			1	182/74	2	
		9	2	220/35	4	
			1	210/80	3	
		10	1	191/65	5	
			2	191/65	5	
11	1	330/75	4			
	2	025/88	2			
12	1	185/78	1			
	2	355/42	2			

**Tabla 1.** Identificación, mediciones estructurales y análisis de los afloramientos 1 a 12 correspondientes a los bloques tectónicos A, B y C. / **Table 1.** Identification, structural measurements and analysis of outcrops 1 to 12 corresponding to tectonic blocks A, B and C.



**Figura 4.** I. Sección estructural y columna estratigráfica Bloque A. II. Sistema de diaclasas del afloramiento 1 Bloque A. III. Sección estructural y columna estratigráfica Bloque B. IV. Sistema de diaclasas Bloque B. V. Sección estructural y columna estratigráfica Bloque C. VI. Amonitas deformadas y análisis dinámico en el Bloque C./**Figure 4.** I. Structural section and stratigraphic column Block A. II. Joint system of outcrop 1 Block A. III. Structural section and stratigraphic column Block B. IV. Joint system Block B. V. Structural section and stratigraphic column Block C. VI. Deformed ammonites and dynamic analysis in Block C.

### Bloques tectónicos O, P, Q

Los bloques O, P y Q presentan una familia de diaclasas en dirección NW con fallas inversas que los limitan (Tabla 6 y Figura 9).

### Bloques R-S, T, U

El bloque tectónico R se encontraba cubierto por el depósito aluvial, lo que impide realizar un análisis individual, por lo que se analizó en conjunto el bloque S donde los dos sistemas de diaclasas tienen direcciones SE y NE (Figura 10 I y II). En el bloque T se presentan dos (2) sistemas de dia-

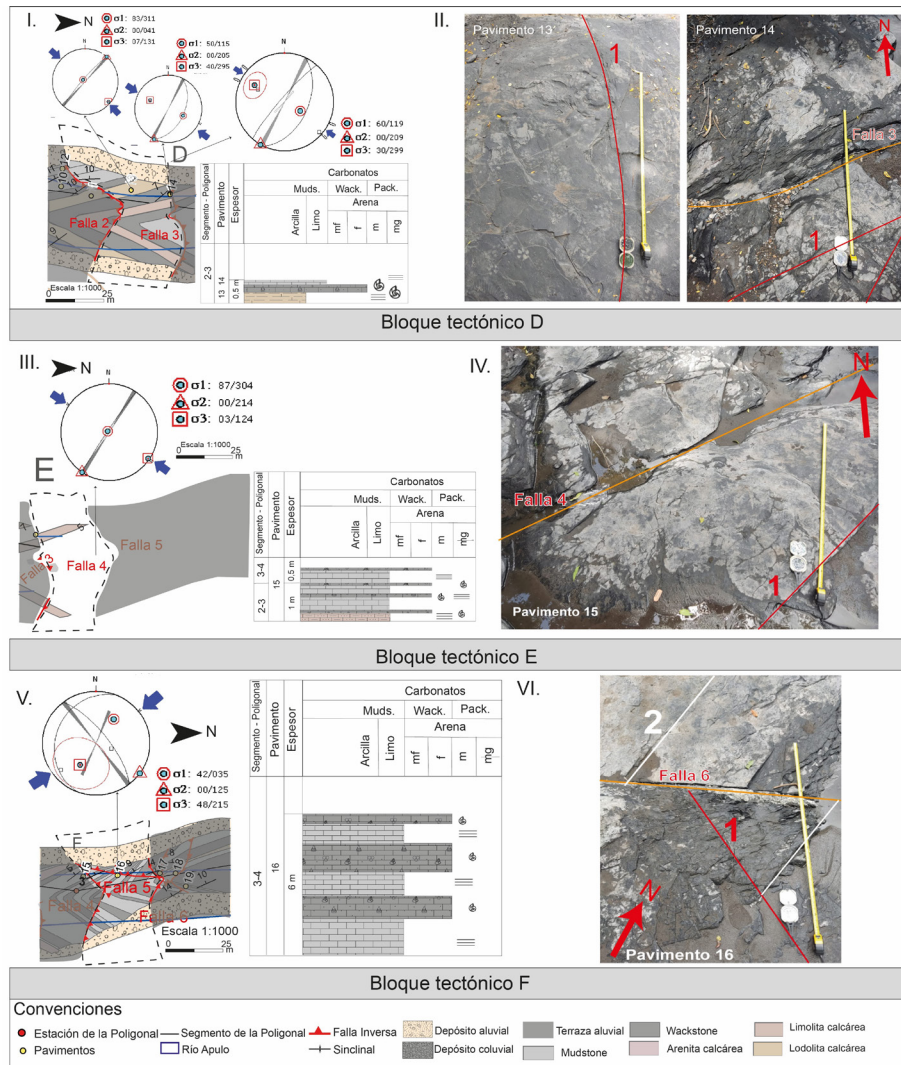
clasas (NW y SE, Figura 10 III y IV) y el Bloque U corresponde al último de la sección estructural, destaca la falla de rumbo dextral denominada en este trabajo como el sistema de fallas del río Apulo, falla transformante con componente vertical ( $\sigma_1$  74/82), la falla y el sistema de diaclasas de mayor intensidad tienen dirección de rumbo hacia el NE-SW (Tabla 7 y Figura 10 VI).

### Evolución geológica para el sector del río Apulo

La acumulación de sedimentos en el Al-

Bloque tectónico	Límites	Afloramiento	Discontinuidades (Acimut de rumbo)			Análisis estructural (Acimut de rumbo)
			Diaclasa	Tendencia	Intensidad	
D	Desde la Falla inversa 2 abarcando el bloque yacente de la misma y finaliza con el trazo de la Falla 3	13	1	221/83	2	$\sigma_1$ dirección NW-SE 119/60
		14	1	025/50	7	
E	Desde la Falla inversa 3 a la Falla inversa 4	15	1	214/87	3	$\sigma_1$ dirección NW-SE 304/87
F	Desde la Falla inversa 4 al trazo de la Falla inversa 6	16	1	322/72	3	$\sigma_1$ dirección NE-SW 035/42
			2	200/25	2	

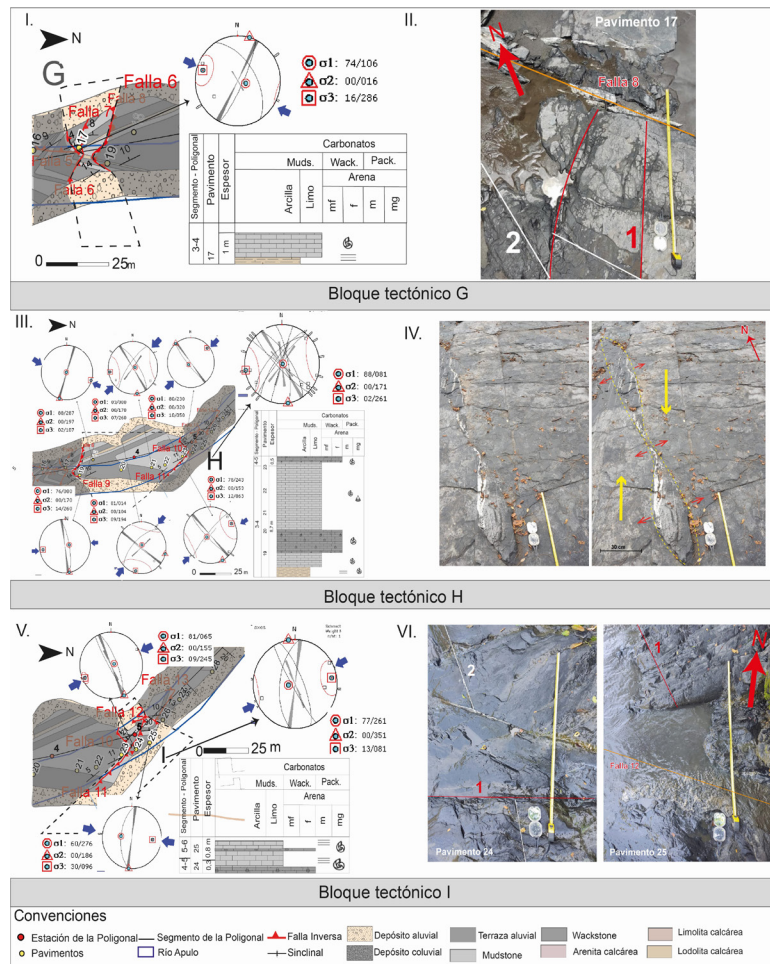
**Tabla 2.** Identificación, mediciones estructurales y análisis de los afloramientos 13 al 16 correspondientes a los bloques tectónicos D, E y F/**Table 2.** Identification, structural measurements and analysis of outcrops 13 to 16 corresponding to tectonic blocks D, E and F.



**Figura 5. I.** Sección estructural y columna estratigráfica Bloque D. **II.** Sistema de diaclasas afloramiento 13 y 14 Bloque D. **III.** Sección estructural y columna estratigráfica Bloque E. **IV.** Sistema de diaclasas Bloque E afloramiento 15. **V.** Sección estructural y columna estratigráfica Bloque F. **VI.** Sistema de diaclasas Bloque F afloramiento 16./**Figure 5. I.** Structural section and stratigraphic column Block D. **II.** Joint system outcrop 13 and 14 Block D. **III.** Structural section and stratigraphic column Block E. **IV.** Joint system Block E outcrop 15. **V.** Structural section and stratigraphic column Block F. **VI.** Joint system Block F outcrop 16.

Bloque tectónico	Límites	Afloramiento	Discontinuidades (Acimut de rumbo)			Análisis estructural (Acimut de rumbo)	
			Diaclasa	Tendencia	Intensidad		
G	Desde la Falla inversa 6 a la Falla inversa 8	17	1	025/80	4	$\sigma_1$ dirección NW-SE 107/74 $\sigma_1$ neotectónico dirección NE-SW	
			2	328/55	1		
			18	1	197/88		4
			19	1	350/76		4
			20	1	127/87		2
H	Desde la Falla inversa 9 a la Falla inversa 10.	21	2	225/63	1	$\sigma_1$ dirección NE-SW 285/60	
			1	135/80	7		
			2	220/81	4		
			1	135/80	3		
			2	220/81	1		
I	Desde la Falla inversa 10 a la Falla inversa 12	24	1	338/74	4	$\sigma_1$ dirección NE-SW 261/77	
			2	140/80	4		

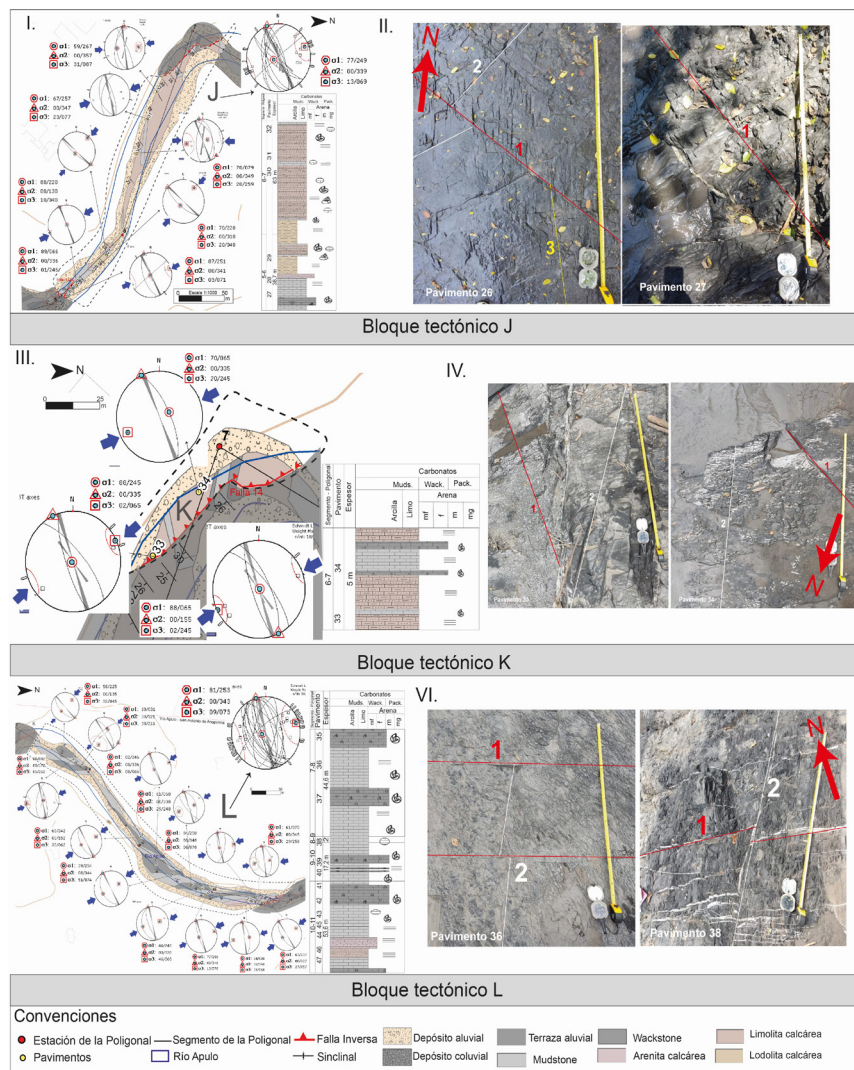
**Tabla 3.** Identificación, mediciones estructurales y análisis de los afloramientos 17 a 24 correspondientes a los bloques tectónicos G, H e I. / **Table 3.** Identification, structural measurements and analysis of outcrops 17 to 24 corresponding to tectonic blocks G, H and I.



**Figura 6.** I. Sección estructural y columna estratigráfica Bloque G. II. Sistema de diaclasas afloramiento 17 Bloque G. III. Sección estructural y columna estratigráfica Bloque H. IV. Diaclasas plumosas por cizallamiento o en echelon. V. Sección estructural y columna estratigráfica Bloque I. VI. Sistema de diaclasas Bloque I afloramientos 24 y 25. / **Figure 6.** I. Structural section and stratigraphic column of Block G. II. Joint system, outcrop 17, Block G. III. Structural section and stratigraphic column of Block H. IV. Plumose joints due to shear or in echelon. V. Structural section and stratigraphic column of Block I. VI. Joint system, Block I, outcrops 24 and 25.

Bloque tectónico	Límites	Afloramiento	Discontinuidades (Acimut de rumbo)			Análisis estructural (Acimut de rumbo)
			Diaclasa	Tendencia	Intensidad	
J	Desde la Falla inversa 11 a la Falla inversa 14	26	1	160/32	4	$\sigma_1$ dirección NE-SW 249/77
			2	230/88	2	
			3	334/86	15	
		27	1	336/89	6	
			1	130/70	5	
		28	1	130/80	4	
		30	1	355/50	4	
			2	185/65	2	
			1	165/48	5	
		31	2	342/76	3	
			3	193/58	1	
			1	174/57	6	
		32	2	335/80	1	
			3	194/51	3	
			1	320/72	5	
K	Desde la Falla inversa 14 abarcando el bloque colgante.	33	2	162/78	10	$\sigma_1$ dirección NE-SW 065/88
			1	335/70	3	
		34	1	335/70	3	
L	Fin de la zona de falla de la Falla inversa 14 hasta el trazo de la Falla inversa 15	35	1	135/58	2	$\sigma_1$ dirección NE-SW 253/81
			1	345/73	5	
		36	2	190/62	2	
			1	326/65	7	
		37	2	230/73	3	
			1	152/60	3	
		38	1	152/60	3	
		39	1	156/82	2	
		40	1	150/44	2	
			1	140/75	2	
		41	2	343/51	8	
			1	165/35	15	
		42	2	158/70	2	
			1	160/77	10	
		43	1	160/77	10	
44	1	350/64	2			
45	1	165/80	7			
	2	13/67	1			
46	1	147/63	5			
	2	150/50	1			
47	1	147/63	5			

**Tabla 4.** Identificación, mediciones estructurales y análisis de los afloramientos 26 a 47 correspondientes a los bloques tectónicos J, K y L./**Table 4.** Identification, structural measurements and analysis of outcrops 26 to 47 corresponding to tectonic blocks J, K and L.



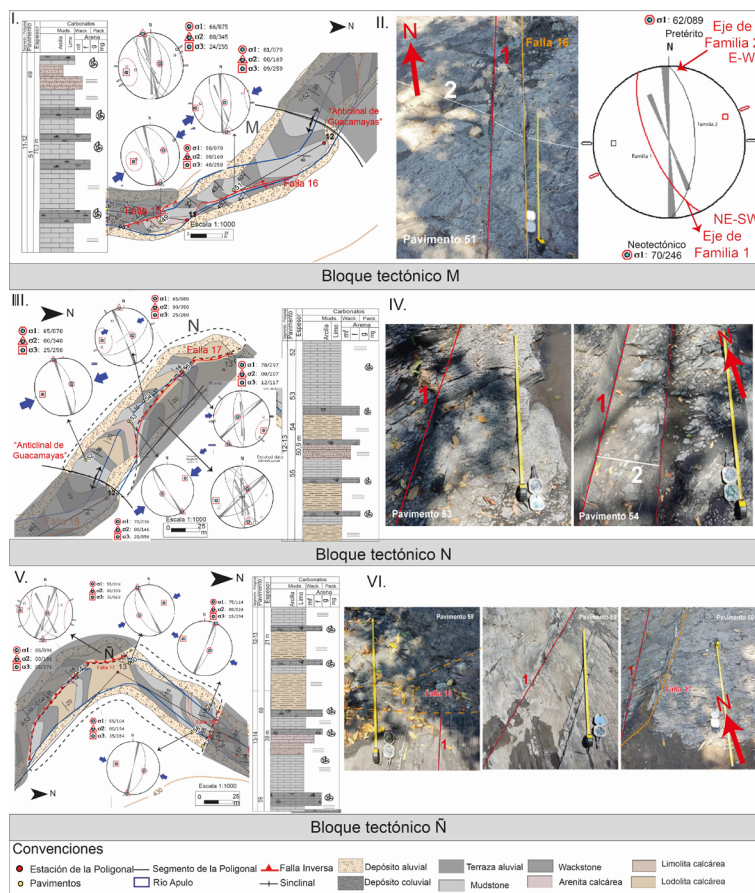
**Figura 7. I.** Sección estructural y columna estratigráfica Bloque J. **II.** Sistema de diaclasas afloramiento 26 y 27 Bloque J. **III.** Sección estructural y columna estratigráfica Bloque K. **IV.** Sistema de diaclasas afloramiento 32 y 33 Bloque K. **V.** Sección estructural y columna estratigráfica Bloque L. **VI.** Sistema de diaclasas afloramientos 36 y 38 Bloque L./**Figure 7. I.** Structural section and stratigraphic column Block J. **II.** Joint system outcrop 26 and 27 Block J. **III.** Structural section and stratigraphic column Block K. **IV.** Joint system outcrop 32 and 33 Block K. **V.** Structural section and stratigraphic column Block L. **VI.** Joint system outcrops 36 and 38 Block L.

biano medio en un ambiente pelágico y hemipelágico de la Formación Hiló (Buttler, 1983) fue afectada por esfuerzos compresivos del acortamiento Cenozoico producto de la convergencia oblicua de las placas Suramericana, Nazca y Caribe. Lo que se evidencia en múltiples fases de deformación compresional asociadas a tectónica de piel gruesa y delgada que tuvo inicio en el Cretácico tardío (Acosta *et al.*, 2004; Saylor *et al.*, 2012; Bayona *et al.*, 2013). Esto se ve representado por fallas inversas y cadenas plegadas cabalgantes desde el VSM hasta el piedemonte occidental de la CO. Esta cadena plegada cabal-

gante tiene vergencia al W donde la edad de deformación sería Mioceno temprano a Plioceno (Mojica *et al.*, 1990). En el área de estudio la cadena plegada está representada por el sistema de fallas de Quiníní, la falla de Salcedo y el sinclinal de Tocaima, además del anticlinal de Apulo que resultan del esfuerzo principal, que en este estudio corresponde a una dirección E-W. Durante el Plioceno- Pleistoceno la deformación tiene su mayor actividad como posible reactivación en los sistemas de fallas (Villar *et al.*, 2017). El análisis de los afloramientos permite la determinación de dos cinemáticas características alrede-

Bloque tectónico	Límites	Afloramiento	Discontinuidades (Acimut de rumbo)			Análisis estructural (Acimut de rumbo)
			Diaclasa	Tendencia	Intensidad	
M	Desde la Falla inversa 15 hasta el núcleo del "Anticlinal de Guacamayas" bordeado al costado E por la Falla inversa 16	51	1	156/70	4	$\sigma_1$ dirección E-W 079/81 $\sigma_1$ neotectónico dirección NE-SW
			2	359/62	6	
N	Desde el núcleo del "Anticlinal de Guacamayas", abarcando el flanco w de la estructura hasta el trazo de la Falla inversa 17	52	1	340/65	3	$\sigma_1$ dirección NE-SW 080/65
		53	1	146/70	4	
		54	1	335/48	6	
			2	054/57	2	
		55	1	225/80	10	
Ñ	Desde la Falla inversa 17 a la Falla inversa 18	58	1	014/55	4	$\sigma_1$ dirección NE-SW 096/85
		59	1	024/75	6	
		60	1	153/55	5	

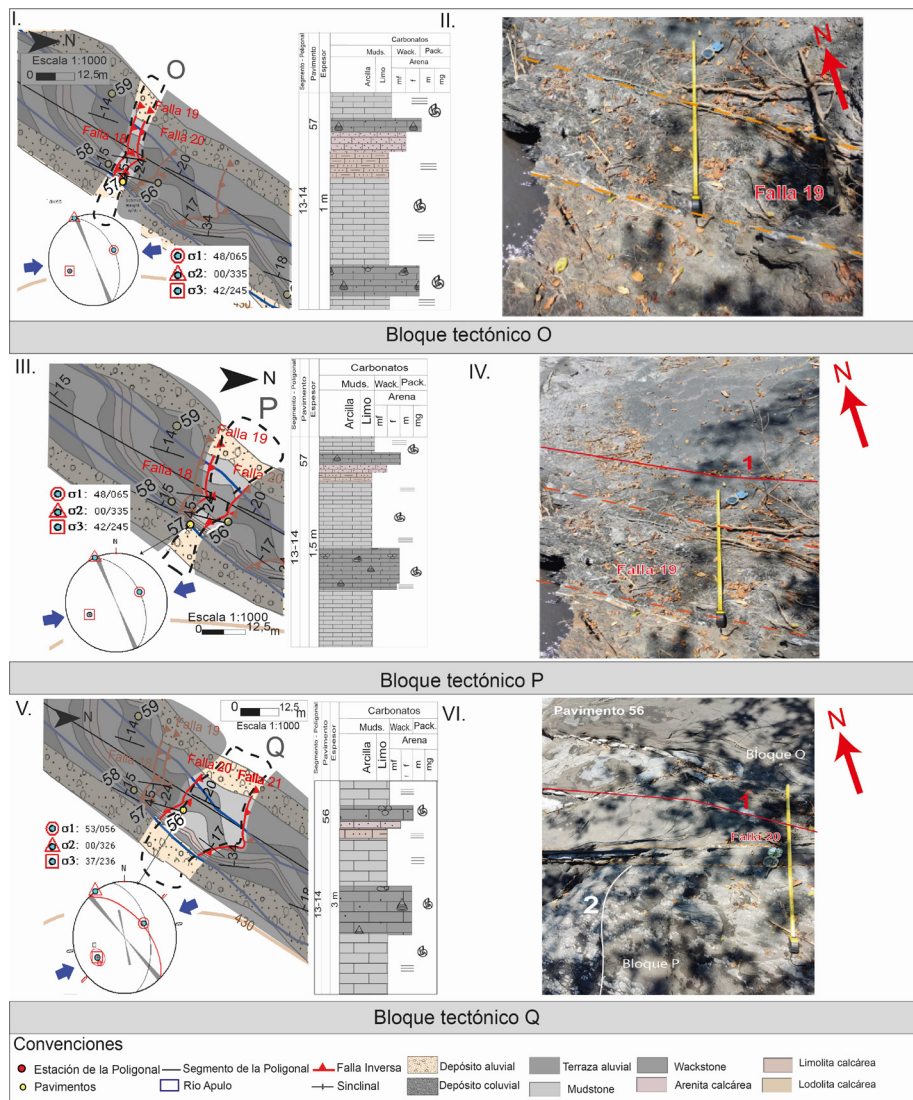
**Tabla 5.** Identificación, mediciones estructurales y análisis de los afloramientos 51 a 60 correspondientes a los bloques tectónicos M, N y Ñ. / **Table 5.** Identification, structural measurements and analysis of outcrops 51 to 60 corresponding to tectonic blocks M, N and Ñ.



**Figura 8.** I. Sección estructural y columna estratigráfica Bloque M. II. Sistema de diaclasas afloramientos 49 y 51 Bloque M. III. Sección estructural y columna estratigráfica Bloque N. IV. Sistema de diaclasas afloramientos 53 y 54 Bloque N. V. Sección estructural y columna estratigráfica Bloque Ñ. VI. Sistema de diaclasas afloramientos 58, 59 y 60 Bloque Ñ. / **Figure 8.** I. Structural section and stratigraphic column Block M. II. Joint system outcrops 49 and 51 Block M. III. Structural section and stratigraphic column Block N. IV. Joint system outcrops 53 and 54 Block N. V. Structural section and stratigraphic column Block Ñ. VI. Joint system outcrops 58, 59 and 60 Block Ñ.

Bloque tectónico	Límites	Afloramiento	Discontinuidades (Acimut de rumbo)			Análisis estruct (Acimut de rum)
			Diaclasa	Tendencia	Intensidad	
O	Desde la Falla inversa 18 a la Falla inversa 19	57	1	335/48	4	$\sigma_1$ dirección NE-065/48
P	Desde la Falla inversa 19 a la Falla inversa 20	57	1	335/48	4	$\sigma_1$ dirección NE-065/48
Q	Desde la Falla inversa 20 a la Falla inversa 21	56	1	347/50	2	$\sigma_1$ dirección NE-057/53
			2	316/56	4	

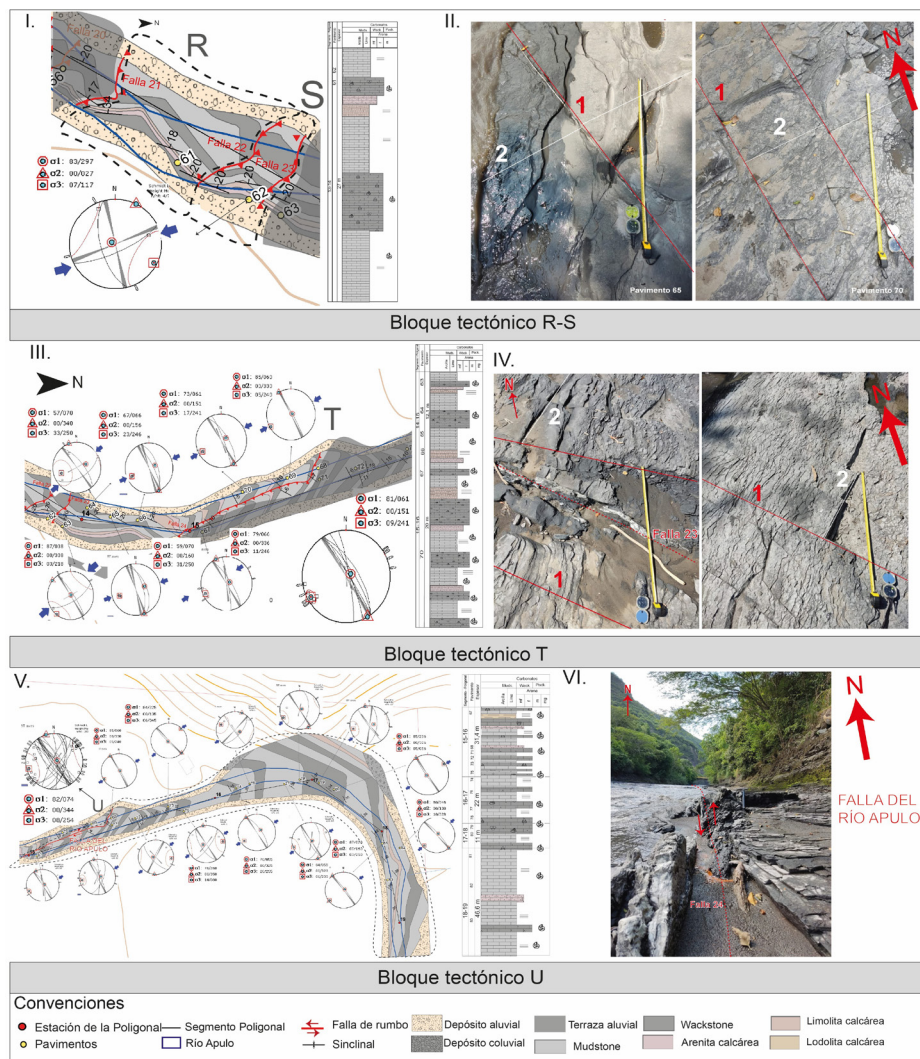
**Tabla 6.** Identificación, mediciones estructurales y análisis de los afloramientos 56 y 57 correspondientes a los bloques tectónicos O, P y Q. / **Table 6.** Identification, structural measurements and analysis of outcrops 56 and 57 corresponding to tectonic blocks O, P and Q.



**Figura 9.** I. Sección estructural y columna estratigráfica Bloque O. II. Sistema de diaclisas afloramiento Bloque O. III. Sección estructural y columna estratigráfica Bloque P. IV. Sistema de diaclisas Bloque P. V. Sección estructural y columna estratigráfica Bloque Q. VI. Sistema de diaclisas afloramiento 56 Bloque Q. / **Figure 9.** I. Structural section and stratigraphic column Block O. II. Joint system outcrop Block O. III. Structural section and stratigraphic column Block P. IV. Joint system Block P. V. Structural section and stratigraphic column Block Q. VI. Joint system outcrop 56 Block Q.

Bloque tectónico	Límites	Afloramiento	Discontinuidades (Acimut de rumbo)			Análisis estructural (Acimut de rumbo)
			Diaclasa	Tendencia	Intensidad	
R-S	Desde de la Falla inversa 21 hasta la Falla inversa 23	62	1	165/64	2	$\sigma_1$ dirección NE-SW 297/83
			2	065/75	5	
T	Desde la Falla 23 a la Falla 24	63	1	325/80	6	$\sigma_1$ dirección NE-SW 061/81
			2	060/68	2	
		64	1	320/68	5	
			2	060/55	2	
		65	1	335/54	1	
			2	345/65	1	
		66	1	340/60	1	
			2	332/75	1	
		67	1	326/76	3	
			2	350/84	2	
		68	1	330/85	3	
		69	1	326/85	4	
		70	1	327/68	2	
			2	338/82	1	
U	Desde la Falla 24 a hasta el final de la sección estructural	71	1	334/78	7	$\sigma_1$ dirección NE-SW 074/82
			2	020/63	3	
		72	3	357/82	2	
			1	205/84	4	
		73	2	137/70	2	
			1	135/84	5	
		74	1	325/70	1	
		75	1	148/65	6	
			2	035/75	3	
		76	1	040/63	12	
			2	145/85	4	
		77	1	148/78	6	
			2	009/55	3	
78	1	145/90	12			
	2	010/55	4			
79	1	005/60	7			
	2	144/85	5			
80	1	146/85	2			
81	1	323/84	6			
82	1	318/80	3			
83	1	310/83	4			

**Tabla 7.** Identificación, mediciones estructurales y análisis de los afloramientos 62 a 83 correspondientes a los bloques tectónicos R-S, T y U./ **Table 7.** Identification, structural measurements and analysis of outcrops 62 to 83 corresponding to tectonic blocks R-S, T and U.



**Figura 10. I.** Sección estructural y columna estratigráfica Bloques R-S. **II.** Sistema de diaclasas afloramiento Bloque R-S. **III.** Sección estructural y columna estratigráfica Bloque T. **IV.** Sistema de diaclasas Bloque T. **V.** Sección estructural y columna estratigráfica Bloque U. **VI.** Falla del Río Apulo, falla de rumbo dextral con componente vertical./**Figure 10. I.** Structural section and stratigraphic column of Blocks R-S. **II.** Joint system outcrop of Block R-S. **III.** Structural section and stratigraphic column of Block T. **IV.** Joint system of Block T. **V.** Structural section and stratigraphic column of Block U. **VI.** Apulo River fault, dextral strike-slip fault with vertical component.

dor del río Apulo: un primer sistema de diaclasas con un esfuerzo principal sentido E-W ( $\sigma$  265/67) y un segundo en sentido NE-SW ( $\sigma$  1 227/70). Su disposición permite identificar que el primer sistema se ve afectado por el segundo, lo que demuestra una temporalidad en los eventos de deformación. El esfuerzo generador del primer sistema se denomina esfuerzo pretérito (E-W) con una dinámica compresiva y es concordante con el esfuerzo del sistema de fallas inversas de Quininí y Salcedo. Y un segundo neotectónico (NE-SW), de dinámica transformante asociado a la reactivación de fallas durante el Plioceno-Pleis-

toceno y correspondiente al sistema de fallas de rumbo con componente vertical del río Apulo propuesto en este trabajo (Figura 12).

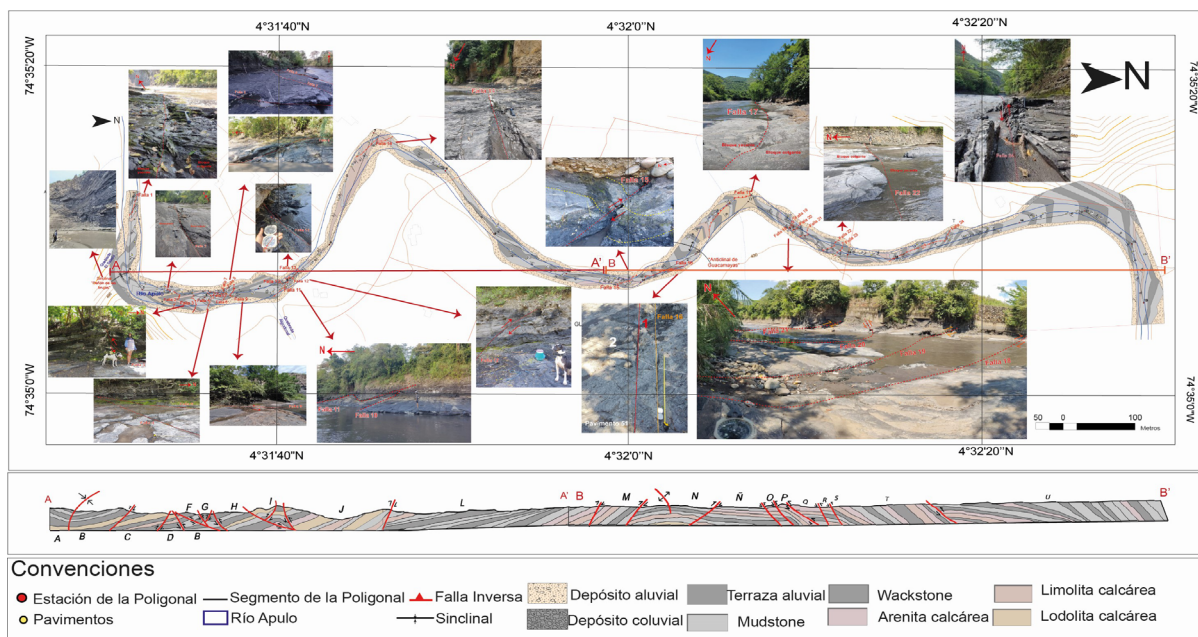
### Discusión y conclusiones

En el levantamiento geológico que se llevó a cabo en este estudio, se identificaron rocas de la Formación Hiló del Grupo Villeta en el lecho del río Apulo; afectadas por fallas y pliegues que en conjunto contribuyen a la identificación de bloques tectónicos. Los cuales reflejan dos (2) eventos de deformación diferentes: el primero, compresivo, caracterizado por fallas inversas

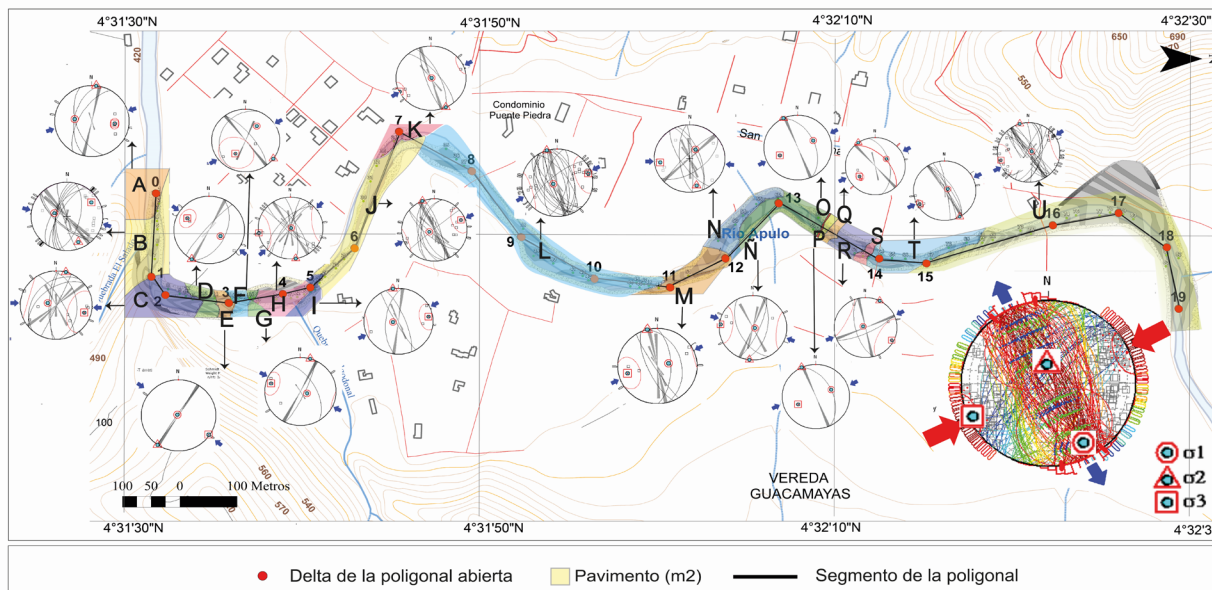
y pliegues con vergencia principalmente al E y una inclinación entre  $45^\circ$  y  $50^\circ$ . Este evento compresivo comprende familias de diaclasas paralelas al rumbo de las fallas ( $\sigma_1$  062/89) y amonitas deformadas con un eje de compresión ( $\sigma_1$  285/78) sentido E-W y eje de elongación ( $\sigma_2$  005/45) en sentido NE-SW. El segundo evento, transformante, caracterizado por fallas de rumbo dextrales, familias de diaclasas oblicuas a las fallas inversas del primer evento ( $\sigma_1$  106/74) y terrazas aluviales cuaternarias colgadas que se identifican en ambas orillas del río Apulo (Figura 11). A través del análisis de los bloques tectónicos y del levantamiento de los afloramientos (Figura 12), se puede establecer que el evento compresivo tiene un esfuerzo principal ( $\sigma_1$  062/89) E-W y que el evento transformante tiene un esfuerzo principal ( $\sigma_1$  078/64) NE-SW. Las diaclasas del evento compresivo son más antiguas, ya que están cortadas por las diaclasas neotectónicas del evento transformante. En una investigación previa de carácter local (Alvarado & Rojas, 1988), se proponen sistemas de fallas con dos esfuerzos diferentes, el primero más intenso E-W asociado al sistema de fallas de Quinín y la falla de Salcedo; y

el segundo, con esfuerzos NE-SW (Alvarado & Rojas, 1988). Es importante indicar que los sistemas de fallas de Quinín y la falla de Salcedo son resultado de esfuerzos compresivos pretéritos y el sistema de fallas del río Apulo (propuesto en este trabajo) es resultado de los esfuerzos transformantes neotectónicos, concordando con los modelos estructurales regionales y locales existentes.

En la zona es evidente una tectónica compresiva de piel delgada en aquellas rocas sedimentarias blandas como las lodolitas y limolitas calcáreas, que presentaban por el movimiento de las fallas, pliegues de arrastre demostrando su comportamiento dúctil. El análisis dinámico resulta en un esfuerzo compresivo acontecido en el Mioceno - Plioceno en sentido E-W relacionado a las fallas principales y de mayor extensión en la Cordillera Oriental, y un esfuerzo neotectónico en sentido NE-SW producto de la reactivación de las fallas principales por procesos transformantes reflejado en el Sistema de Fallas del río Apulo. Este sistema de fallas se propone de manera formal en esta investigación donde su cinemática y dinámica corresponden al análisis de los afloramientos del segundo evento de deformación.



**Figura 11.** Mapa Geológico a escala 1:1000, corte geológico con las estructuras geológicas y fotografías de las estructuras principales identificadas en el río Apulo. / **Figure 11.** Geological map at a scale of 1:1000, geological cross-section with the geological structures and photographs of the main structures identified in the Apulo River.



**Figura 12.** Análisis cinemático y dinámico de la sección estructural, con la representación estereográfica de cada bloque tectónico. Se puede identificar en cada estereograma la distribución de esfuerzos principales ( $\sigma_1$  062/89 E-W y  $\sigma_2$  078/64 NE-SW). En el estereograma generalizado de toda la sección ubicado en la parte inferior derecha, las flechas rojas indican el evento compresivo antiguo y las azules el evento transformante neotectónico. **Figure 12.** GeKinematic and dynamic analysis of the structural section, with stereographic representation of each tectonic block. The distribution of principal stresses ( $\sigma_1$  062/89 E-W and  $\sigma_2$  078/64 NE-SW) can be identified in each stereogram. In the generalized stereogram of the entire section located in the lower right, the red arrows indicate the ancient compressive event and the blue arrows the neotectonic transform event.

## Agradecimientos

Para la realización de esta investigación se contó con la financiación de la Convocatoria Permanente de Proyectos año 2024 de la Universidad de Pamplona, Colombia. Además, del apoyo de los grupos de investigación Terra Mare y GIG Mammoth del Departamento de Geología de la Universidad de Pamplona, Colombia. Se agradece a los revisores anónimos por sus aportes y debidas correcciones que han permitido mejorar y publicar este artículo.

## Conflictos de interés

Los autores hacen constar que no existen conflictos de interés con otros autores, instituciones u otros terceros sobre el contenido (total o parcial) del artículo.

## Referencias

- Acosta, J., L. Lonergan, y M.P. Coward, 2004. Oblique Transpression in the Western Thrust Front of the Colombian Eastern Cordillera: *Journal of South American Earth Sciences* 17, 3, 94-181. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2004.06.002>.
- Acosta, J, y C Ulloa.,2002. *Memoria explicativa Geología de la Plancha 246 Fusagasugá* escala 1: 100.000. Bogotá, Colombia: INGEOMINAS, 93 p.
- Alvarado, A, y Rojas, JH., 1988. *Cartografía geológica y análisis estructural del Noroccidente de Apulo*, Departamento de Cundinamarca: Universidad Nacional de Colombia, 71 p.
- Bayona, G., Cardona, A., Jaramillo, C., Mora, A., Montes, C., Caballero, V., Mahecha, H., 2013. Onset of Fault Reactivation in the Eastern Cordillera of Colombia and Proximal Llanos Basin; Response to Caribbean–South American Convergence in Early Palaeogene Time: *Geological Society, London, Special Publications* 377, 1, 285-314. <https://doi.org/10.1144/SP377.5>.
- Butler, K.R., 1983. Andean- Type Foreland Deformation: Structural Development of the Neiva Basin, Upper Magdalena Valley, Colombia: *University Microfilms International*.286 p.
- Cáceres, C., Etayo, F., 1969. Bosquejo geológico de la región del Tequendama. 1er Congreso Colombiano de Geología. In *Opúsculo guía excursión pre-congreso: Sabana De Bogotá*, 23 p.
- Cediel, F, Shaw, R. P., Cáceres, C., 2003. Tectonic Assembly of the Northern Andean Block: The Circum-Gulf of Mexico and the Caribbean Hydrocarbon Habitats, Basin Formation and Plate Tectonics, de

- Claudio Bartolini, Richard T. Buffler, y Jon F. Blickwede, *American Association of Petroleum Geologists*, 79, 48-815. <https://doi.org/10.1306/M79877C37>.
- Kammer, A., Sánchez, J., 2006. Early Jurassic Rift Structures Associated with the Soapaga and Boyacá Faults of the Eastern Cordillera, Colombia: Sedimentological Inferences and Regional Implications: *Journal of South American Earth Sciences* 21, 4, 22-412. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2006.07.006>.
- Kerr, A. C., Tarney, J., 2005. Tectonic Evolution of the Caribbean and Northwestern South America: The Case for Accretion of Two Late Cretaceous Oceanic Plateaus: *Geology* 33, 269-72. <https://doi.org/10.1130/G21109.1>.
- Mojica, J., Franco, R., 1990. Estructura y evolución tectónica del valle medio y superior del Magdalena, Colombia: *Geología Colombiana*, 17, 41-64 p.
- Sarmiento, L., Wess, J., Cloetingh, S., 2006. Mesozoic transtensional basin history of the Eastern Cordillera, Colombian Andes: Inferences from tectonic models: *Journal of South American Earth Sciences - J S AMER EARTH SCI*, 21, 383-411. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2006.07.003>.
- Saylor, J. E., Horton, B. K., Stockli, D. F., Mora, A., Corredor, J., 2012. Structural and Thermochronological Evidence for Paleogene Basement-Involved Shortening in the Axial Eastern Cordillera, Colombia: *Journal of South American Earth Sciences* 39, 202-15. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2012.04.009>.
- Villar, A., Alarcón, H., Jiménez, G., Velandia, F., 2017. Zonas transversales en el dominio axial de la Cordillera Oriental - bloque yacente de la Falla de Soapaga (Sátiva sur - Sátiva norte, Boyacá): *Boletín de Geología* 39, 3, 13-23. <https://doi.org/10.18273/revbol.v39n3-2017001>.

**Recibido :** 19 de noviembre del 2025

**Aceptado :** 27 de febrero del 2026