

PROCEDENCIA EN EL EXTREMO SUR DEL VALLE MEDIO DEL MAGDALENA DURANTE EL CENOZOICO: DETERMINACIONES CON BASE EN EL ANÁLISIS CUANTITATIVO DE PALEOCORRIENTES

Wendy Jahel Caballero M.¹; Jorge L. Rubiano¹; Jairo Clavijo T.¹; José R. Sandoval¹

DOI: <http://dx.doi.org/10.18273/revbol.v38n1-2016004> 

Forma de citar: Caballero, W.J., Rubiano, J.L., Clavijo, J., y Sandoval, J.R. 2016. Procedencia en el extremo sur del Valle Medio del Magdalena durante el Cenozoico: determinaciones con base en el análisis cuantitativo de paleocorrientes. Boletín de Geología, 38(1): 73-86.

RESUMEN

El estudio de paleocorrientes en la sucesión cenozoica del sector sur de la cuenca del Valle Medio del Magdalena (VMM) integró dos metodologías de medición, una en superficie y la otra en subsuelo, utilizando registros *dipmeter*. A partir de estos resultados se obtuvo un modelo de paleocorrientes para la secuencia comprendida entre el Eoceno superior – Plioceno inferior (formaciones Esmeraldas, Mugrosa y Colorado Grupo Real y Formación Mesa). Los resultados arrojaron como principal fuente de aporte a la cuenca la ancestral Cordillera Central para la secuencia sedimentaria, excepto durante dos épocas: en el Mioceno inferior (Formación Colorado) y en el Mioceno superior (Real Superior), donde la fuente de aporte cambia de la ancestral Cordillera Central a la Cordillera Oriental. Estas variaciones en las direcciones de los paleoflujos probablemente están asociadas con los primeros pulsos de levantamiento de la Cordillera Oriental durante el Mioceno temprano y tardío. Sin embargo la abundancia de materiales ígneos y metamórficos indican que la Cordillera Central continuó su actividad, aportando material a las formaciones depositadas durante estos periodos.

Palabras clave: direcciones de flujo, Paleógeno, Neógeno, Cordilleras Central y Oriental.

PROVENANCE IN THE SOUTHERN EXTREME OF THE MIDDLE MAGDALENA VALLEY DURING THE CENOZOIC: MEASUREMENTS BASED ON THE PALEOCURRENTS QUANTITATIVE ANALYSIS

ABSTRACT

The paleocurrents studies in the cenozoic succession of southern area of the Middle Magdalena Valley Basin (MVB), have had integrate two measurement methodologies, one in surface and the other one in the subsurface, using dipmeter logs. From those results a paleocurrents model for the sequence between the Upper Eocene – Lower Pliocene (formations Esmeraldas, Mugrosa and Colorado, Real Group, and Mesa Formation) was obtained. The results showed as the main supply source to the basin, the ancestral Central Cordillera for the sedimentary sequence, with the exception of two epochs: Lower Miocene (Colorado Formation) and Upper Miocene (Upper Real), where the supply source changes from the ancestral Central Cordillera to the Eastern Cordillera. In the sense of the paleoflows these variations are probably associated with the first pulses of the Eastern Cordillera rise during the Early and Late Miocene. However the abundance of igneous and metamorphic materials indicates that the Central Cordillera keeps its activity, providing material to the formations deposited during those periods.

Keywords: Flow directions, Paleogene, Neogene, Central Cordillera and Eastern Cordillera.

¹ Ecopetrol - ICP, wendy.jahel@gmail.com

INTRODUCCIÓN

El área de estudio se encuentra comprendida entre los municipios de Mariquita y Venadillo (Tolima) al sur del VMM (FIGURA 1), donde es preciso ampliar el conocimiento geológico con enfoque al recobro de recursos no convencionales de arenas bituminosas existentes en la zona. Para ello se hace necesaria la elaboración de un modelo de paleodirecciones de flujo en subsuelo y superficie que proporcione la ubicación y composición de áreas fuentes, elementos necesarios para reconstruir paleo geográficamente la cuenca y complementar estudios anteriores como los realizados por Gómez *et al.* (2003), Guerrero (1997) y De Porta (1974), en los cuales se identificó un aporte significativo a la secuencia sedimentaria por parte de la ancestral Cordillera Central, reflejado en el material ígneo metamórfico existente en las unidades. Por lo anterior se espera encontrar un mayor aporte de la ancestral Cordillera Central y en menor proporción la ancestral Cordillera Oriental.

El presente trabajo plantea un modelo de paleoflujos en subsuelo y superficie basado en la metodología utilizada en algunos trabajos como Berg (1998), Rubiano (1998) y Delgado y Rubiano (2008) donde a partir de los buzamientos medidos por el registro de *dipmeter* se identificaron las principales fuentes de aporte de sedimentos en determinadas áreas, actividad tectónica y cambios en la paleogeografía. Esta metodología se complementó con la empleada por DeCelles *et al.* (1983), la cual toma datos de afloramiento para identificar paleoflujos y plantear modelos de paleocorrientes en superficie. Otros estudios como el de Quintero (2010), basado en la metodología de DeCelles *et al.* (1983) a partir del modelo de paleocorrientes, analizó la cinemática de las estructuras de deformación presentes en una cuenca colombiana.

De esta forma, complementando estas dos metodologías, el presente estudio analiza posibles variaciones, similitudes y direcciones de los paleoflujos en toda la secuencia sedimentaria, teniendo en cuenta que del total de la secuencia sedimentaria, solo dos unidades (Mesa y Real Inferior) presentan escasos afloramientos en superficie. En éstas la estratificación predominante y mejor preservada es la estratificación cruzada en artesa con lentejones de gravas, indicando la existencia de una sedimentación poco tranquila resultado de los ambientes continentales (De Porta, 1966), de tipo fluvial que se desarrollaron en la cuenca durante el Neógeno. Una vez medidas las paleocorrientes en las artesas se integró esta información con el análisis estadístico de los datos

de subsuelo y posteriormente se generó el modelo de paleocorrientes para la zona.

Dicha información tiene algunas limitaciones y no es del todo confiable ya que se encuentra sujeta a la preservación de las formaciones, incluso a parámetros de perforación como el tratamiento de fluidos naturales, lodos de perforación y otras posibles interferencias (Arche, 2010). Por ello, mientras se cuente con mayor información para el análisis estadístico de los datos, mejor se complementarán las dos metodologías para minimizar la incertidumbre y más confiables serán los resultados; también es importante anotar que la mayoría de los pozos del área cuentan con el registro de *dipmeter*:

El área de estudio se ubica en el sur del VMM, entre las Cordilleras Central y Oriental al oeste y este del río Magdalena, de norte a sur entre los municipios de Mariquita y Lérida (FIGURA 1); entre las coordenadas planas (gauss origen Bogotá) N: 1°067.500 a 1°030.000 E: 905.000 a 937.500.

La secuencia estratigráfica la conforman rocas de edad Eoceno tardío (Frm. Esmeralda), Oligoceno (Frm. Mugrosa), Mioceno temprano (Frm. Colorado), Mioceno medio (formaciones Real Inferior y Medio, Mioceno tardío (Frm. Real Superior y Plioceno (Frm. Mesa) (Rubiano, 1998). Toda la secuencia es atravesada por los ocho (8) pozos perforados en esta área, mientras que en campo solo se evidencian la Formación Mesa que aflora hacia la parte Central del área, y la parte inferior del Grupo Real. Real Medio y Superior se encuentran erosionados hacia el oeste de la zona, único lugar donde se expone el Real Inferior, ocurriendo pinchamiento de toda la secuencia. De los ocho pozos perforados únicamente tres presentan algunos pies corazonados, en los cuales se hizo identificación de facies basados en el estudio de Olaya *et al.* (2001).

METODOLOGÍA

Determinación de paleocorrientes a partir de datos de afloramiento

La recolección de la información de campo se realizó en cercanías a los municipios de Mariquita, Honda, Armero y caseríos de Armero-Guayabal, Lérida, Cambao y Méndez (FIGURA 1). Aunque en el área existe poca exposición de roca, el sector donde se encontraron los mejores afloramientos del Grupo Real, con estratificación cruzada en artesa, están localizados por la vía Honda-Bogotá y Mariquita-Méndez (FIGURA 1, rutas en rojo y amarillo, respectivamente).

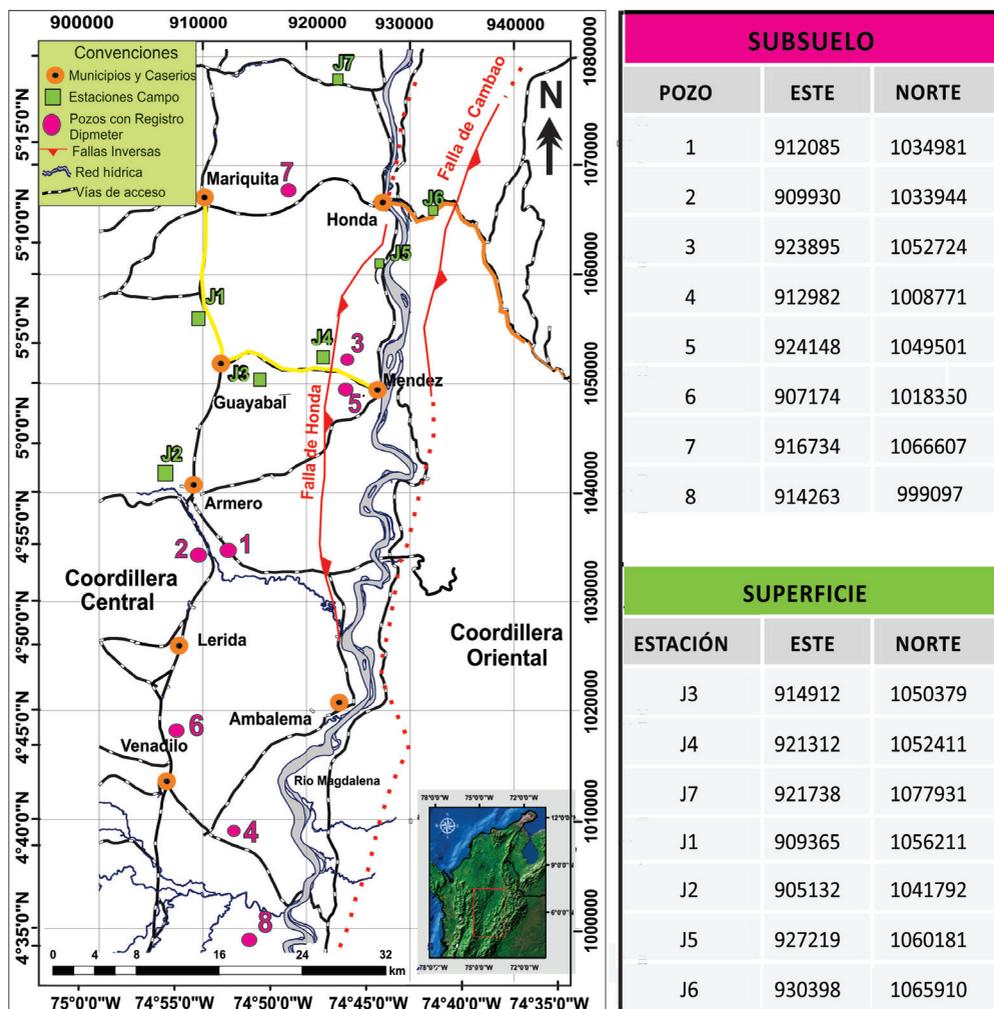


FIGURA 1. Mapa de ubicación con estaciones de paleocorrientes en campo (en verde) y pozos con registros de *dipmeter* (en fucsia), y tablas con coordenadas, área Mariquita (Tolima) Colombia. En naranja y amarillo rutas con las mejores exposiciones de roca.

En la fase de campo se localizaron los afloramientos con mayor presencia de estratificación en artesa (estructura sedimentaria utilizada en esta investigación) para luego medir las paleodirecciones (azimut) basados en la metodología de DeCelles *et al.* (1983) de la siguiente manera:

- Medición del rumbo y buzamiento del afloramiento (FIGURA 2A).
- Identificación de la estratificación cruzada tipo en artesa con sus dos flancos completos (FIGURA 2A).
- Medición de la orientación y buzamientos de los flancos derecho e izquierdo. Se pueden hacer entre 15 y 30 mediciones de acuerdo a las condiciones del afloramiento.
- Representación de los polos de los planos en una red estereográfica distribuyéndose de forma bimodal limbos izquierdo y derecho (FIGURA 2B).
- Definición del plano con el valor promedio de cada flanco de la artesa (FIGURA 2B).
- Definición del plano en el *stereonet* que más se aproxime al promedio de cada grupo de datos a partir de los valores promedio de cada artesa (FIGURA 2B).
- Determinación de la intersección de dos planos promedio y el plano resultante de la orientación del eje de la artesa (FIGURA 2B).
- Finalmente, si los estratos se encuentran inclinados, se procede a rotar el eje de la artesa a la horizontal para hallar la dirección de paleocorriente (Caballero, 2010).

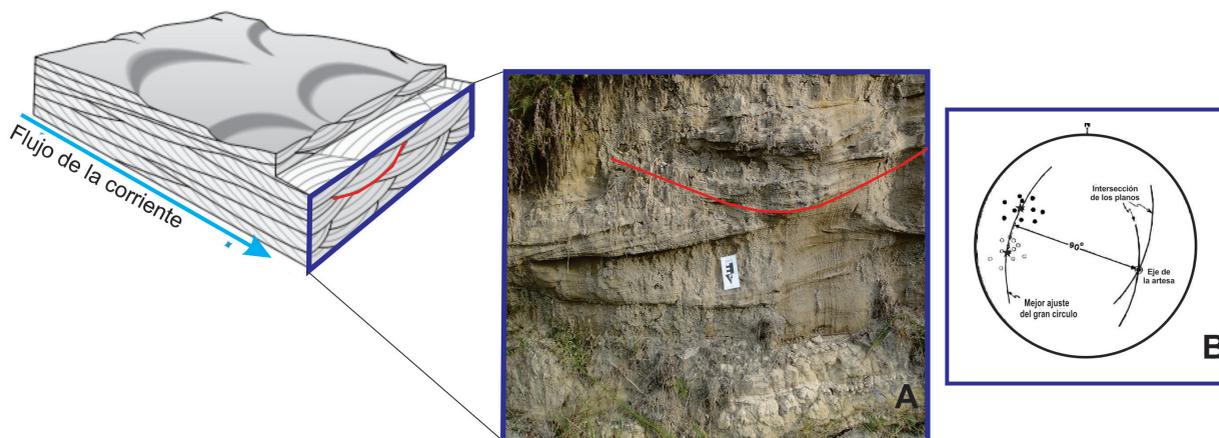


FIGURA 2. A. Afloramiento de la Formación Real Inferior, estación J5; en rojo se resalta la artesa en la cual se tomaron las mediciones de la paleocorrientes. En el bloque diagrama se ilustra la artesa en tres dimensiones con la dirección de flujo. B. Gráfica de un conjunto bimodal de datos de medidas de artesas. Los limbos izquierdo (círculos negros) y derecho (círculos blancos) de una artesa, como polos en una red estereográfica de Schdmit. (Tomado de DeCelles *et al.*, 1983).

Determinación de paleocorrientes a partir de los registros de *Dipmeter*

Los patrones de paleocorrientes, obtenidos por el *Dipmeter*, pueden ser diferenciados de otras estructuras captadas por este: rumbo, buzamiento y fracturas (fallas o diaclasas) mediante el uso de la técnica Statical Curvature Analysis (SCAT) aplicada por Rubiano (2009), quien resume esta técnica en los siguientes pasos:

- Definición de los valores regionales de rumbo y buzamiento de la estratificación para cada una de las diferentes formaciones.
- Corrección por basculamiento de todos los datos obtenidos del registro de *dipmeter* para cada pozo y unidad estratigráfica estudiada.
- Selección y análisis estadístico de los datos con buzamiento entre 5° y 45°.
- Se determina el valor de la media (Θ , medida en azimut) de las paleocorrientes para cada unidad estratigráfica de cada pozo.
- Con base en la anterior información se procede a calcular la media total de cada formación.
- A partir del azimut de las corrientes obtenidas en los registros de *dipmeter* se halla la relación de consistencia (CR) para cada pozo, basados en las siguientes ecuaciones:

$$B = \left[\cos A \left[\frac{PI}{180} \right] \right] \quad (1)$$

$$C = \left[\sin A \left[\frac{PI}{180} \right] \right] \quad (2)$$

$$CR = \frac{\left[\sqrt{\sum B^2 + \sum C^2} \right]}{\sum D} \quad (3)$$

Donde A es el azimut de la paleocorriente, D la cantidad de datos (TABLA 1).

TABLA 1. Ejemplo del tratamiento de los datos obtenidos a partir del registro de *dipmeter* para hallar la CR.

Unidad	A (Azimut dirección de corriente)	B	C	D	CR
Unidad	350,9087014	0,987437814	-0,158008109	1	
Unidad	58,39509784	0,524058777	0,851682099	1	
Unidad	350,5	0,986285602	-0,165047606	1	
Unidad	277,5866392	0,132025245	-0,991246354	1	0,66
Unidad	65,627	0,412675234	0,910878231	1	
Unidad	13,62	0,971878861	0,235481377	1	
Unidad	309,17	0,631623456	-0,775275312	1	

- Una vez obtenida la CR de cada pozo, se aplican nuevamente las formulas 1, 2, y 3 a estos datos para hallar la CR por formación.
- Con base en los anteriores análisis estadísticos se procede a la elaboración de mapas (FIGURAS 7 a 10) de cada una de las unidades estratigráficas con la paleodirección de cada pozo y de los afloramientos.

RESULTADOS

El primer afloramiento (J1) donde se expone la parte inferior del Grupo Real está localizado por la vía Mariquita – Guayabal (FIGURA 1), el afloramiento presenta un espesor de 20 m (FIGURA 3) y está constituido hacia la base por facies pertenecientes a conglomerado arenosos sin estructuras definidas (Facies CxCg – SlessCg, TABLA 2). En la parte media del afloramiento continúan los conglomerados arenosos, y en menor proporción facies gravosas

(SlessCg) e inicio de niveles de finos (Psol), friables con ligera impregnación de hidrocarburos, con clastos de tamaño guijarro y gránulos. En el tope es común encontrar niveles de arcillas y arenas bituminosas con niveles de arenisca ligeramente lodosa meteorizada, y ángulos de inclinación de alrededor de los 10°. La artesa tiene una longitud desde el eje a cada flanco de aproximadamente 0,60 m. Una vez tomados y analizados los datos de la artesa, la paleocorriente arrojó una paleodirección de 0° (Azimut) e inclinación de 13° al norte.

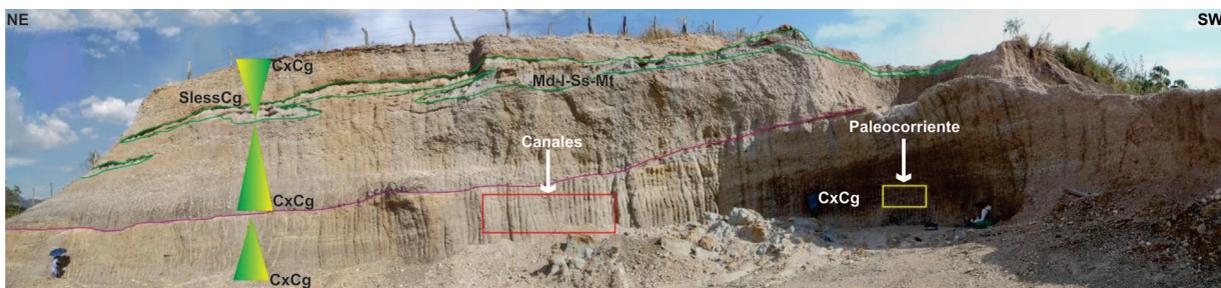


FIGURA 3. Panorámica de la estación J1, vía Mariquita – Guayabal, parte inferior del Grupo Real. En la fotografía se ubican algunas de las facies identificadas en el afloramiento, cambios en el tamaño de grano de la litología representado por los triángulos verdes de grano creciente a grano decreciente. El cuadro rojo indica la ubicación de las estructuras en forma de canal y el cuadrado amarillo indica el lugar donde se tomó la paleocorriente.

El segundo afloramiento (J2), con la Formación Real Inferior, se ubicó en los alrededores del municipio de Armero (FIGURA 1). La roca está conformada por capas gruesas estratificadas sub-horizontales que buzcan hacia el sureste, con superficies de estratificación difusa o erosiva y un espesor aproximado de 18 m (FIGURA 4). Hacia la base comprende niveles de facies gravosas principalmente (CxCg - SlessCg), con impregnación de hidrocarburo, intercalados con algunos niveles finos de lodolitas verdosas (md-l-Ss-mt) y areniscas en su mayoría lodosas (CxSs). Las facies gravosas generalmente muestran una secuencia granodecreciente en la cual aumenta el contenido de arcilla hacia el tope de la capa. Los niveles conglomeráticos presentan impregnación de hidrocarburos, la cual disminuye notablemente hacia el tope del afloramiento. Las estructuras en artesas que facilitaron la medición de paleocorrientes aparecen de forma difusa hacia la base del afloramiento, la más evidente presenta una longitud desde el eje a cada flanco de 1,10 m y su dirección de paleoflujo es de 13° (azimut) y la inclinación de 12° al NE.

La tercera estación (J3), perteneciente a la Formación Mesa, presenta un afloramiento con un espesor aproximado de 12 m (FIGURA 5), localizado en el km 2, margen izquierdo de la carretera que comunica

a los caseríos de Méndez y Guayabal en sentido este-oeste (FIGURA 1). La secuencia aflorante está constituida principalmente por sedimentos tobáceos con intercalaciones de rocas volcánicas y arcillas blancas caoliníticas, en donde se aprecia una falla inversa de orientación 322/31 NE (Azimut de rumbo) y desplazamiento horizontal de 0,3 m y vertical de 0,24 m, que podrían estar asociados a rupturas leves generados por la compresión hacia el oeste de la Falla de Honda (FIGURA 1). La roca tiene gran variedad de estructuras sedimentarias como estratificación cruzada, planar de alta energía, derrumbes (*slumps*), laminación convoluta y estructuras de carga; son comunes los niveles con clastos de pumitas y de rocas ígneas. Se registraron 15 datos de rumbo e inclinación por cada flanco de la artesa obteniéndose como resultado de la paleodirección 36° azimut e inclinación de 18° al NE.

A continuación se describen las direcciones de paleocorrientes encontradas en la secuencia sedimentaria, la cual está compuesta de base a tope por las formaciones Esmeraldas, Mugrosa y Colorado; el Grupo Real Inferior, medio y superior; y la Formación Mesa. En las TABLAS 3 y 4 se presenta el análisis estadístico de los datos de paleocorrientes registrados en subsuelo y en superficie.

TABLA 2. Facies propuestas en este estudio basadas en Olaya *et al.* (2001) y formaciones geológicas que las contienen.

Facies	Litología	Descripción	Depósito	Formaciones
CxCg		Conglomerado matriz soportado con estructura, estratificación cruzada en artesa, clastos entre 2-16 mm, algunos de de curazo y líticos.		Mesa Real Inferior Colorado
SlessCg	CONGLOMERADO	Conglomerado arenoso matriz soportado, sin estructura con granulos y clastos tamaño de grano guijarro de cuarzo lechoso y esquistos que gradan a arenisca conlglomerática.	DEPÓSITOS DE CANAL	Mesa Real Inferior Esmeraldas
PblCg		Conglomerado clasto-soportado sin estructura, ni cementación, con clastos tamaño de grano guijarro, clastos de cuarzo y líticos sueltos.		Mesa Real Inferior
HI		Intercalación de arenas y arcillas en capas muy delgadas.		Mesa Real Inferior
CxSs		Arenisca la mayoría lodosa, granos subredondeados a subangulares, moderada selección y esfericidad, con líticos sueltos y estratificación cruzada.		Mesa Real Medio Real Inferior Colorado
	Arenas		DEPÓSITOS DE LLANURA DE INUNDACIÓN	Esmeraldas Real Medio Real Inferior
BrSs		Arenisca lodosas, sin estrucura, con raíces, óxidos y bioturbación.		Colorados Mugrosa Esmeraldas
SlessSs		Areniscas lodosas sin estructura, algunas conglomeraticas, moderada a mala selección, con óxidos.		Real Medio Real Inferior Esmeraldas
Md-l-Ss-Mt	Finos	Limolitas arenosas grisácea y verdes, arcillolitas y lodolitas arenosas con esferosideritas y algunas raíces.	DEPÓSITOS DE LLANURA DE INUNDACIÓN	Real Superior Real Medio Real Inferior Colorado
				Mugrosa Esmeraldas
Psol		Limolitas arenosas, arcillolitas y lodolitas, varicoloreadas y rojizas con abundantes óxidos, esferosideritas, rizolitos y caliche.		Real Superior Real Medio Real Inferior Mugrosa Esmeraldas

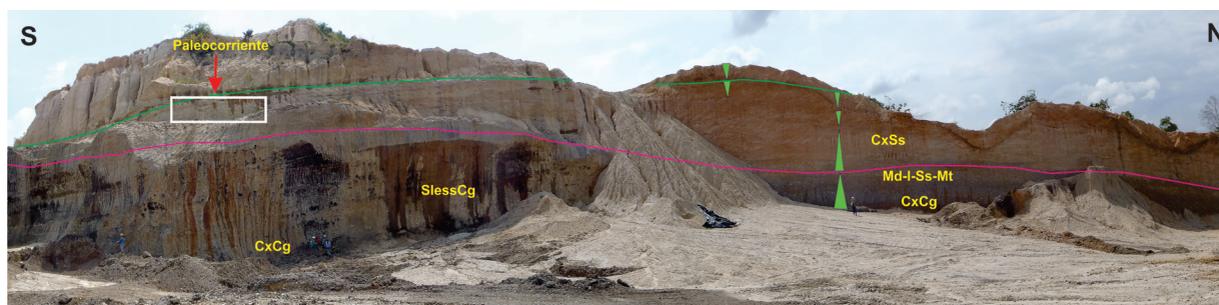


FIGURA 4. Panorámica de la estación J2, vía Armero – Vereda San Pedro, Grupo Real Inferior. En la fotografía se ubican las facies identificadas en el afloramiento, cambios en el tamaño de grano de la litología representado por los triángulos verdes que corresponde a cambios de tamaño de grano de grano creciente a grano decreciente. El cuadrado blanco indica el lugar donde se tomó la paleocorriente.

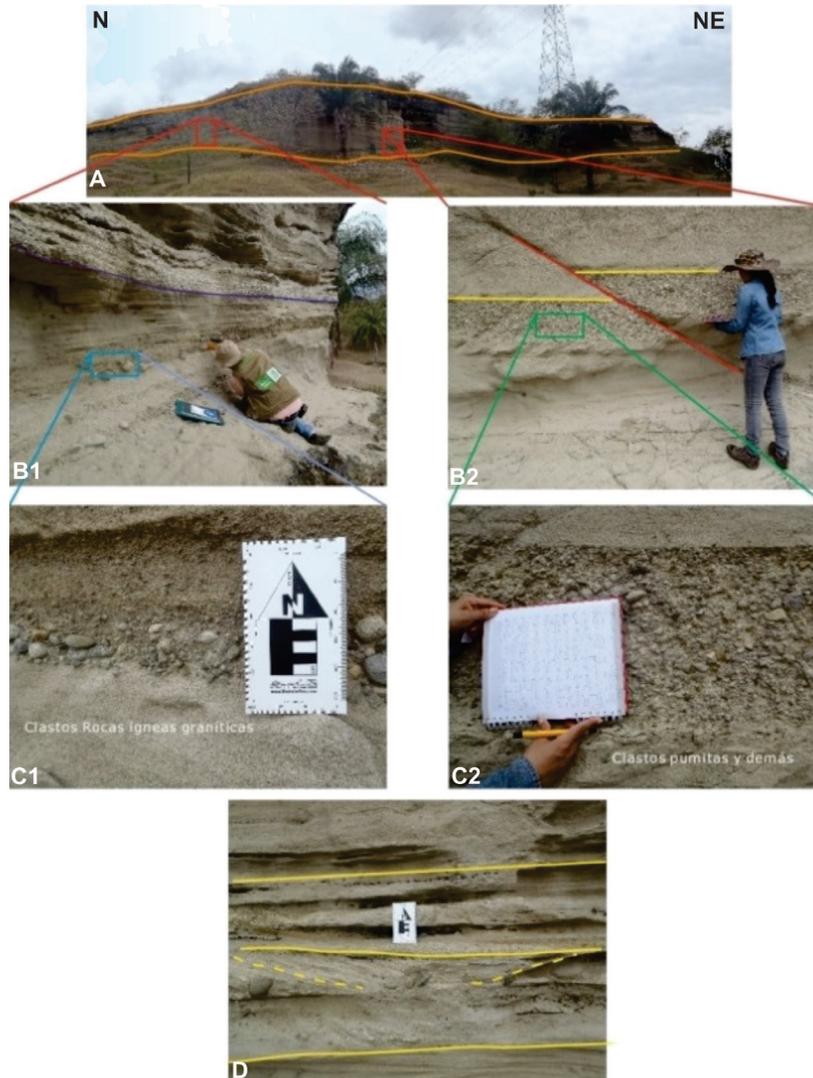


FIGURA 5. Estación J3, vía Guayabal – Méndez, Formación Mesa. **A.** Panorámica del afloramiento J3, la franja naranja indica paquete de arenas finas a gravas. **B1.** Acercamiento de la parte media del afloramiento. **B2** Acercamiento de la parte media del afloramiento indicando una falla inversa que divide los paquetes de arenas y gravas. **C1** Acercamiento de la foto B1, donde se indica el cambio abrupto entre las arenas y gravas. **C2** Acercamiento de la foto B2 donde se observa el carácter heterogéneo de las gravas. **D.** Paquete de arenas de grano medio, con estratificación en artesa donde se tomó la paleodirección. Para su localización ver FIGURA 1.

TABLA 3. Resultados estadísticos de las direcciones de paleocorrientes medidas en subsuelo en la zona, valor de la media del vector promedio (media en azimut y grados) y su relación de consistencia (CR).

Formación	Número de pozos	Número total de medidas	1		2		3		4		5		6		7		8		Total de medidas por Formación	Diferencia de ángulo entre las Formaciones	
			Media	CR	Media	CR	Media	CR	Media	CR	Media	CR	Media	CR	Media	CR	Media	CR			
Esmeraldas	2	451	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	32,56	0,124	-	-	72,892	0,37	52,7	0,930	8,00
Mugrosa	8	765	233,1	0,63	70,62	0,8	57,39	0,11	207	0,29	72,931	0,79	346,2	0,138	51,29	0,87	70,628	0,44	61,00	0,422	100,00
Colorado	8	1561	264,8	0,19	84,43	0,7	316,5	0,8	281,2	0,4	89,54	0,65	226,9	0,199	54,5	0,81	312,1	0,4	321,00	0,250	160,00
Real Inferior	5	310	295,6	0,85	90,71	0,4	187	0,71	141,7	0,38	-	-	-	-	65,21	0,95	-	-	121,96	0,310	18,00
Real Medio	6	369	266,4	0,89	-	-	218,7	0,46	163,2	0,68	71,677	0,48	10,4	0,266	68,24	0,84	-	-	103,09	0,123	112,00
Real Superior	2	86	309,5	0,81	-	-	33,07	0,60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	351,00	0,746	26,00
Mesa	1	9	-	-	-	-	16,57	0,91	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	16,56	0,910	

TABLA 4. Resultados estadísticos de las direcciones de paleocorrientes medidas en superficie en la zona, valor de la media del vector promedio (medida en azimut y grados) y su relación de consistencia (CR).

Formación	Punto	Este	Norte	Paleocorrientes		Media Paleocorriente	CR por Formación
				Rumbo	Buzamiento		
Fm Mesa	J3	914912	1050379	36	18	44	0,3
	J4	921312	1052411	93	1		
	J7	921738	1077931	266	3		
Real Inferior	J1	909365	1056211	0	13	351	0,95
	J2	905132	1041792	13	12		
	J5	927219	1060181	334	9		
	J6	930398	1065910	329	20		

CR=Relación de consistencia

Formación Esmeraldas (Eoceno superior)

Dos pozos perforan esta formación con registro de *dipmeter*, el Pozo 6 ubicado al sureste de la zona y el Pozo 8 ubicado al sur del área de estudio (FIGURA 6). Fueron tomadas en total 451 medidas cuyo valor de la media es noreste. La consistencia es alta de 0,939 y una paleodirección de 52,7° de azimut (TABLA 3).

Formación Mugrosa (Oligoceno)

Esta formación fue atravesada por ocho pozos con un total de 765 mediciones. Según el análisis estadístico los datos presentan poca dispersión de 0,42 y una paleodirección de 61° azimut. La diferencia de ángulo de las medias entre las formaciones Esmeraldas y Mugrosa es de 10° (TABLA 3, FIGURA 7).

Formación Colorado (Mioceno inferior)

Los resultados estadísticos de las paleocorrientes obtenidas a partir de los 1.561 datos de los registros de *dipmeter* plasmados en el diagrama de rosetas para la Formación Colorado, indican una forma polimodal con un valor de la media de 321° de azimut y una relación de consistencia de 0,2 (FIGURA 8). Con relación a la anterior unidad (Formación Mugrosa) se observa que la fuente cambia de noreste a noroeste, siendo la diferencia de ángulo entre las medias de 100° (TABLA 3, FIGURA 8).

Grupo Real

El Grupo Real está conformado por las unidades Real Inferior, Real Medio y Real Superior.

Formación Real Inferior (Mioceno medio): para esta unidad se contó con información tomada del subsuelo y superficie. La paleodirección según el análisis estadístico de los datos tomados en superficie es de 351° azimut con sentido noroeste y una muy buena relación de consistencia (0,95°) (TABLA 4, FIGURA 9). Esta información se obtuvo a partir de las cuatro estaciones de campo. Las estaciones J1 y J2 están ubicadas al oeste del área, mientras que las estaciones J5 y J6 se ubican al este de la zona, lugar donde predominan clastos y guijarros de origen metamórfico y en su mayoría ígneos, los cuales disminuyen hacia el tope del afloramiento; para la estación J5 se presentan abundantes estructuras en forma de canal.

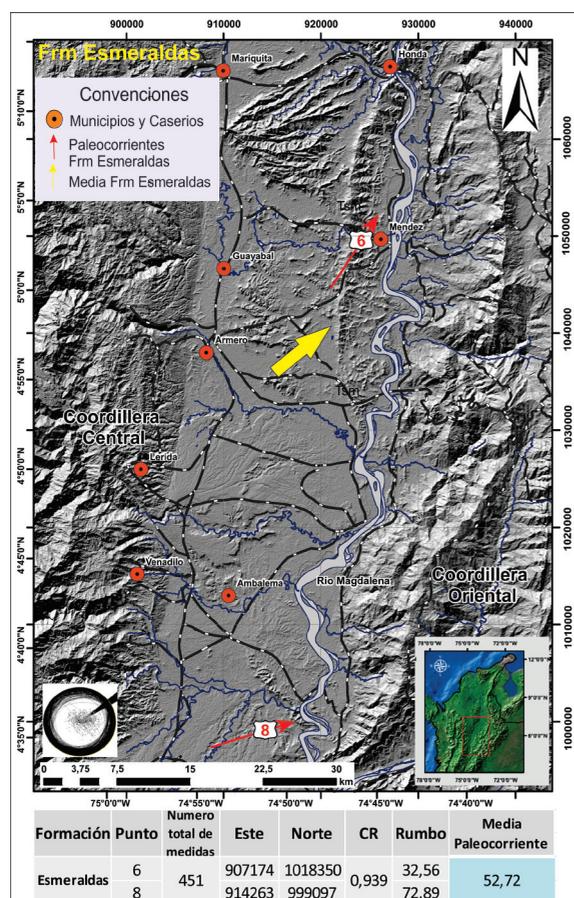


FIGURA 6. Mapa de paleocorrientes para la Formación Esmeraldas a partir de los registros de *dipmeter* con resultados estadísticos (formación, punto o estación, total de mediciones, coordenadas, relación de consistencia (CR), rumbo y media de paleocorriente). En rojo las flechas de paleocorrientes y en amarillo la media de estos datos.

En la información de subsuelo se analizaron 310 datos de *dipmeter* para esta unidad. El diagrama de rosetas indica una forma polimodal con un valor de la media de 121°azimut y una relación de consistencia de 0,3 (FIGURA 9). Esta peledirección propone que el área de aporte para esta formación es igual al de la Formación Real Medio. La diferencia en ángulo entre el valor de las medias de la paleodirección de la formaciones Colorado y el Real Inferior es de 160° (FIGURA 9).

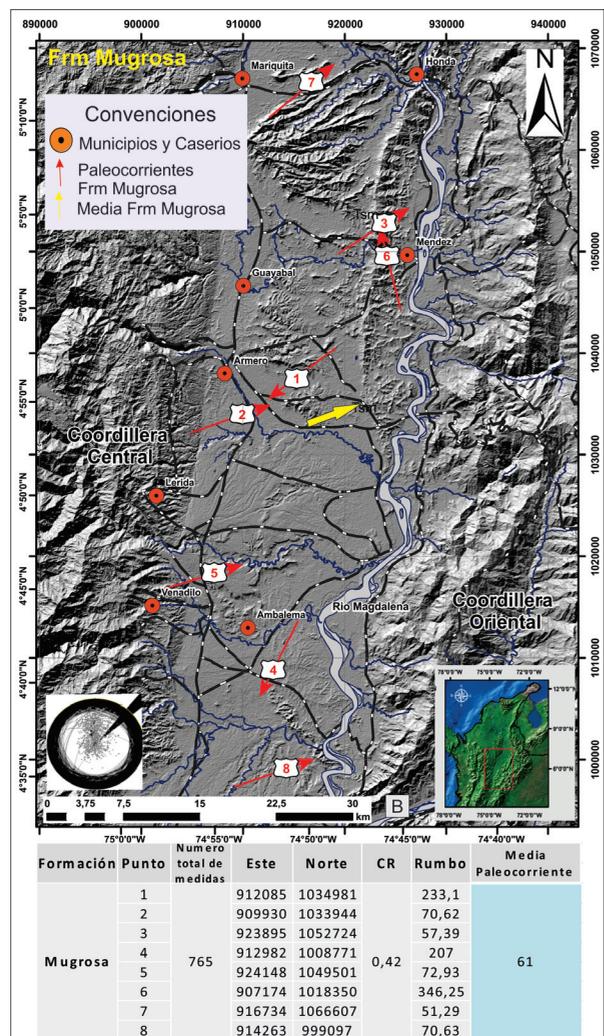


FIGURA 7. Mapa de paleocorrientes para la Formación Mugrosa a partir de los registros de *dipmeter* con resultados estadísticos (formación, punto o estación, total de mediciones, coordenadas, relación de consistencia (CR), rumbo y media de la paleocorriente). En rojo las flechas de paleocorrientes y en amarillo la media de estos datos.

Formación Real Medio (Mioceno medio): los resultados obtenidos mediante el análisis estadístico a partir de los 369 datos de los registros de *dipmeter* se graficaron en el diagrama de rosetas para la Formación Real Medio, presentando un patrón polimodal con un valor de la media

de 103° azimut y una relación de consistencia de 0,123 (TABLA 3, FIGURA 10). La diferencia de ángulo entre la media de las formaciones Real Inferior y Medio es de 18°, lo cual indica que continua la migración del área de aporte de los sedimentos y posiblemente actividad moderada.

Formación Real Superior (Mioceno superior): los resultados de la dirección de los flujos obtenidos mediante la estadística se plasmaron en el diagrama de rosetas, allí se utilizaron 86 datos de los registros de *dipmeter* de los Pozos 1 y 3. Según la estadística la media o dirección de la paleocorriente para esta unidad estratigráfica es de 351° azimut y la consistencia es alta (0,745) (TABLA 3, FIGURA 11). En este caso la diferencia de los ángulos de la Formación Real Medio y Superior es de 112°.

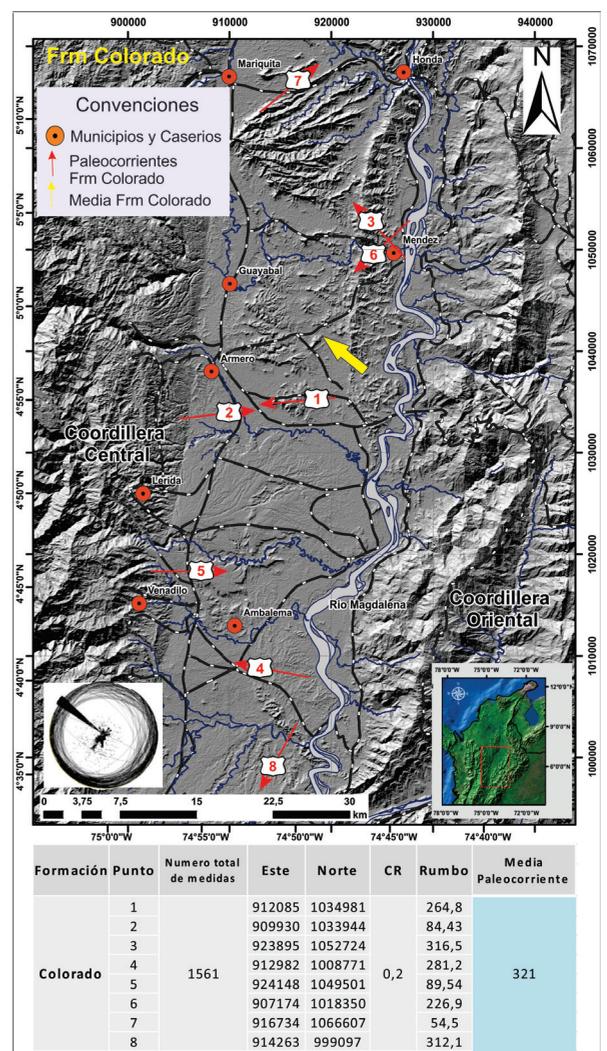


FIGURA 8. Mapa de paleocorrientes para la Formación Colorado a partir de los registros de *dipmeter* con resultados estadísticos (formación, punto o estación, total de mediciones, coordenadas, relación de consistencia (CR), rumbo y media de paleocorriente). En rojo las flechas de paleocorrientes y en amarillo la media de estos datos.

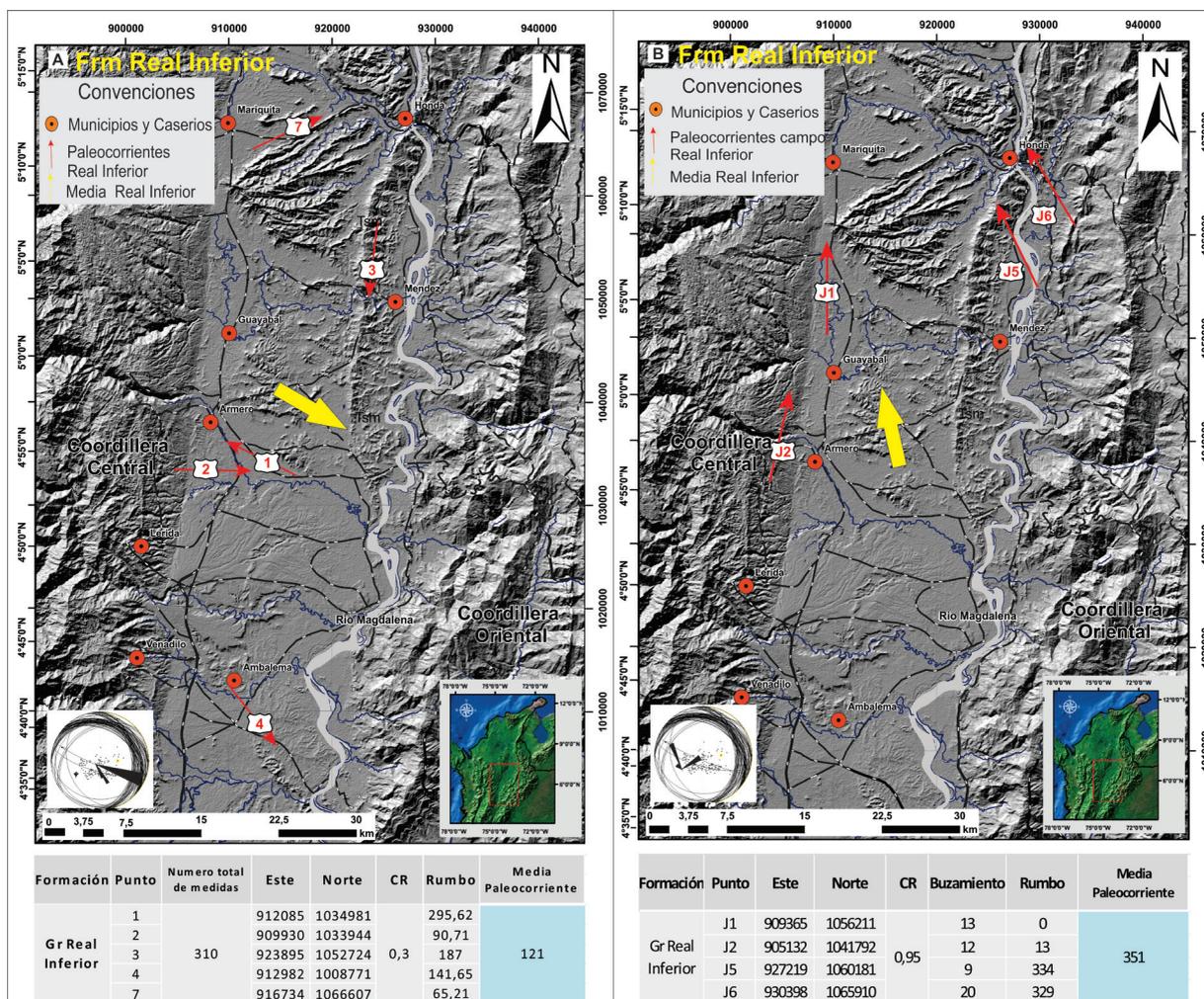


FIGURA 9. Paleocorrientes para la Formación Real Inferior con resultados estadísticos (formación, punto o estación, total de mediciones, coordenadas, relación de consistencia (CR), rumbo y media de paleocorriente). A. Mapa de paleocorrientes a partir de los registros de *dipmeter* con resultados estadísticos. B. Mapa de direcciones de paleocorrientes medidas en superficie con resultados estadísticos. En rojo las flechas de paleocorrientes y en amarillo la media de estos datos.

Formación Mesa (Plioceno inferior)

Para esta unidad se contó con información tomada de subsuelo y superficie. Las paleodirecciones resultado del análisis estadístico a partir del registro de *dipmeter* del pozo 3 se graficaron en el diagrama de rosetas para la Formación Mesa, arrojando un valor de la media de 16° azimuth, y una buena relación de consistencia de 0,91 (TABLA 3, FIGURA 12A).

Para los datos de superficie se obtuvieron tres datos de paleocorrientes, uno por cada estación, ubicadas en una franja orientada N-S, en la parte central del área de trabajo (TABLA 4, FIGURA 12B). Según el análisis estadístico la dirección de paleocorriente predominante para la Formación Mesa es hacia el sureste, valor de la media 44° azimuth y una relación de consistencia de 0,3 (FIGURA 12B).

En la parte centro a sur se ubican las estaciones J3 y J4, allí el valor de la media es de 36° y 93° azimuth, respectivamente, con un sentido de la paleodirección hacia el este. En la estación J7 ubicada más al norte de las anteriores secciones, la dirección del paleoflujo cambia 266° azimuth, proveniente del noreste del área, donde se ubica la Cordillera Oriental.

Estas paleodirecciones sugieren el suroeste como área de aporte predominante de los sedimentos. Para la época de acumulación, abanicos aluviales con afluentes de la Cordillera Central y en menor proporción de la Cordillera Oriental son sugeridos (Gómez *et al.*, 2003), para la parte norte del área de estudio (estación J7).

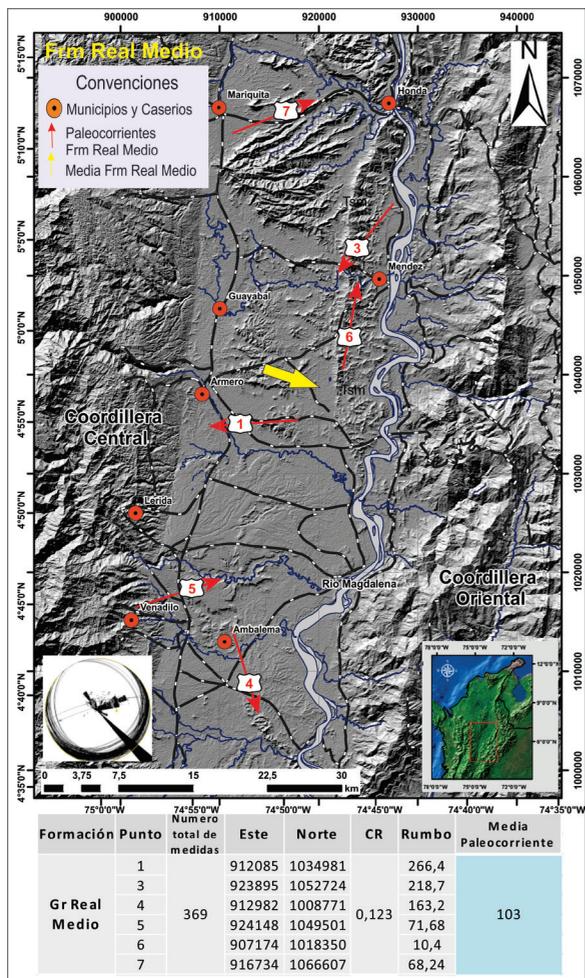


FIGURA 10. Mapa de paleocorrientes para la Formación Real Medio a partir de los registros de *dipmeter* con resultados estadísticos (formación, punto o estación, total de mediciones, coordenadas, relación de consistencia (CR), rumbo y media de paleocorriente). En rojo las flechas de paleocorrientes y en amarillo la media de estos datos.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A partir del estudio de paleocorrientes se deducen cambios importantes en la paleogeografía en las áreas fuentes de sedimentos para la secuencia sedimentaria en el sur de la cuenca del VMM. (TABLA 5, FIGURAS 5 a 11).

Para las unidades Esmeraldas y Mugrosa, no aflorantes en superficie, se evaluaron los paleoflujos a partir de los datos de subsuelo donde se obtuvo un valor medio de la paleocorriente para la Formación Esmeraldas de 52° azimut y una buena consistencia de 0,93. Para la Formación Mugrosa el análisis estadístico arrojó 61° azimut y una consistencia de 0,42 con alta dispersión (TABLA 5), lo cual sugiere como fuente de suministro de sedimentos para estas dos unidades la ancestral Cordillera Central. Posteriormente se depositó la

Formación Colorado, para esta época ocurrió un cambio significativo en el área fuente de sedimentos donde se obtuvo un valor medio del paleoflujo de 321° azimut y una consistencia de 0,43 (TABLA 5), con una dirección de la paleocorriente noroeste, siendo la principal fuente de aporte la Cordillera Oriental. Este evento es asociado posiblemente con los primeros pulsos de levantamiento de la Cordillera Oriental.

Esta variación puede también ser comparable con lo propuesto por Guerrero (1997), quien describe a partir del estudio de paleocorrientes en el área de Villavieja (al sur del área de estudio), que el levantamiento de la Cordillera Oriental ocurrió hace 12,9 a 11,8 Ma. Para la Formación Real Inferior los datos tomados en afloramiento y los de subsuelo arrojaron un valor de la media total 56° azimut (TABLA 6) y una consistencia baja de 0,35; con fuente de aporte de sedimentos asociada a la ancestral Cordillera Central (FIGURA 11).

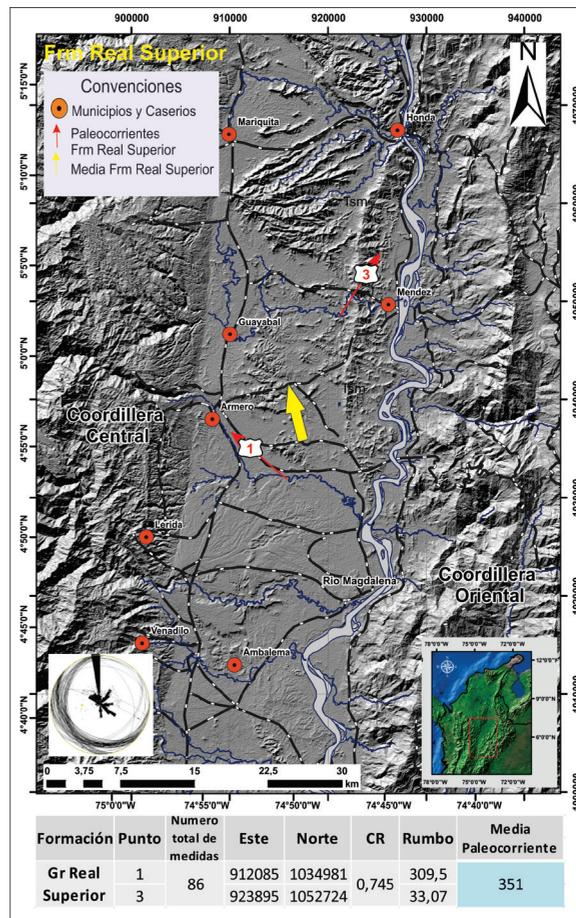


FIGURA 11. Mapa de paleocorrientes para la Formación Real Superior a partir de los registros de *dipmeter* con resultados estadísticos (formación, punto o estación, total de mediciones, coordenadas, relación de consistencia (CR), rumbo y media de paleocorriente). En rojo las flechas de paleocorrientes y en amarillo la media de estos datos.

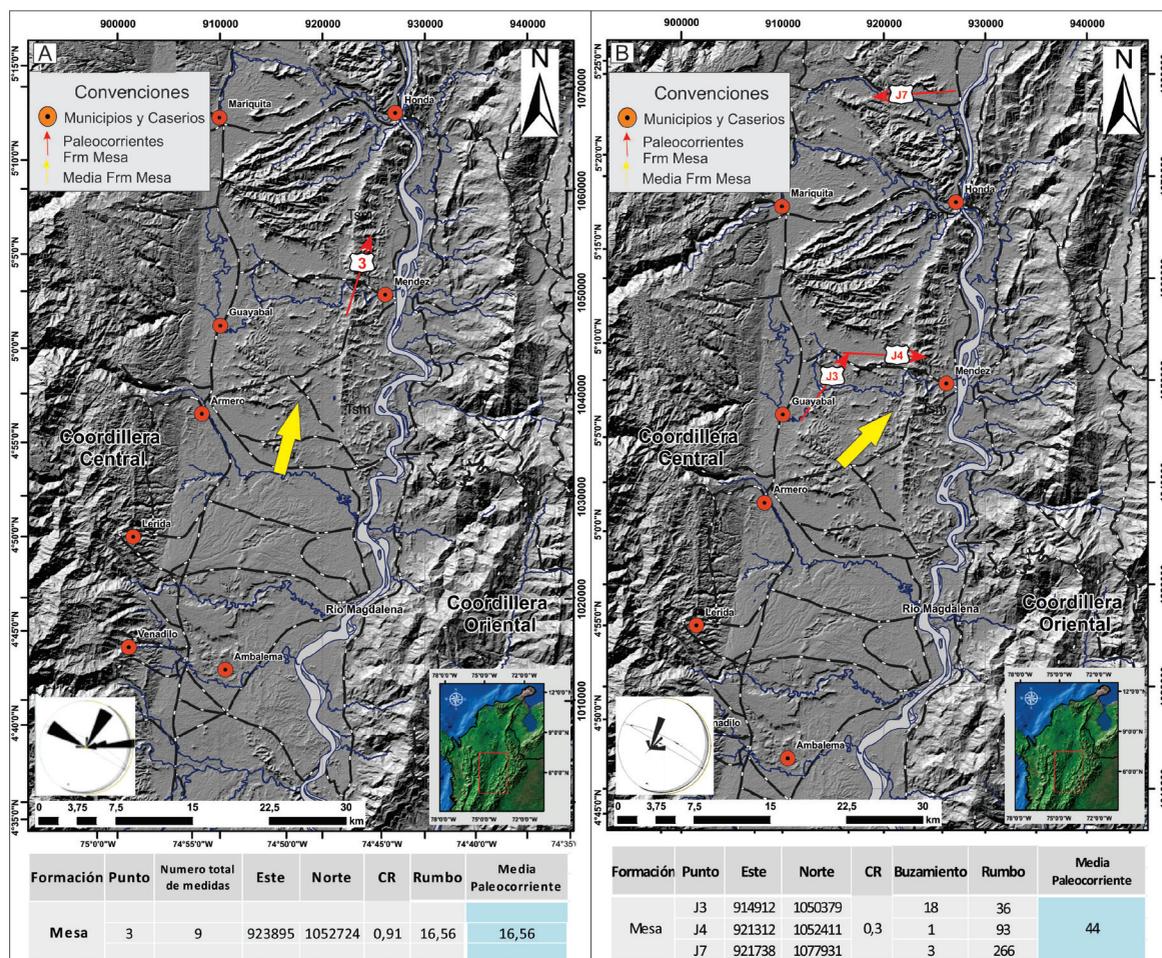


FIGURA 12. Paleocorrientes para la Formación Mesa con resultados estadísticos (formación, punto o estación, total de mediciones, coordenadas, relación de consistencia (CR), rumbo y media de paleocorriente). A. Mapa de paleocorrientes medidos en subsuelo. B. Mapa de direcciones de paleocorrientes medidas en superficie. En rojo las flechas de paleocorrientes y en amarillo la media de estos datos.

TABLA 5. Resumen de paleodirecciones para la secuencia sedimentaria. Relación de consistencia (CR).

Formación	Paleocorrientes Subsuelo (Grados)	CR	Paleocorrientes Superficie (Grados)	CR
Mesa	16 ↗	0,91	44 ↗	0,3
Real Superior	351 ↗	0,7		
Real Medio	103 →	0,12		
Real Inferior	121 ↘	0,3	351 ↗	0,95
Colorado	321 ↗	0,2		
Mugrosa	61 ↗	0,422		
Esmeraldas	52 ↗	0,93		

TABLA 6. Integración de resultados de paleodirecciones para las formaciones Mesa y Real Inferior.

Formación	Número de pozos	Número total de medidas en pozo	Número total de medidas afloramiento	Total de medidas por Formación CR	Total de medidas por Formación Media (θ)
Mesa	1	9	3	0,97	30
Real Inferior	5	310	4	0,42	56

Estos resultados también son comparables con los presentados por Guerrero (1997). En dicho trabajo se concluyó que la depositación del Real Inferior inició durante una fase intensa de actividad volcánica y tectónica de la Cordillera Central. Durante este periodo de tiempo los ríos meandriformes que fluían en el área eran aparentemente continuos con una orientación oriente – suroriente. Según De Porta (1966), Hettner en

1892 tal vez fue el primero en proponer como fuente de aporte para el Real Inferior a la ancestral Cordillera Central, basándose en el carácter arcósico de las areniscas, probablemente derivadas de la desintegración de las rocas ígneas asociadas a la Cordillera Central, información que también se corroboró con los datos de campo donde se encontró predominancia de material volcánico, clastos ígneos y metamórficos provenientes muy probablemente de la Cordillera Central.

La Formación Real Medio, según el análisis estadístico de paleocorrientes, tiene una paleodirección sureste de 103° azimut, con una consistencia baja de 0,123, que al igual que el Real Inferior, probablemente tiene como fuente de aporte la ancestral Cordillera Central. Posteriormente se depositó la Formación Real Superior, con una paleodirección de 351° azimut, en este caso la diferencia de los ángulos de la Formación Real Medio y Superior es de 112° (TABLA 3), lo cual sugiere una disminución abrupta en el aporte de materiales volcánicos de la Cordillera Central y una nueva fuente de aporte a la cuenca (De Porta, 1974) proveniente de la Cordillera Oriental. Esto implica un nuevo levantamiento, teniendo en cuenta que el principal levantamiento de la Cordillera Oriental se dio después del Mioceno (Gómez *et al.*, 2003).

Por último, se analizó la Formación Mesa, la cual cambia su fuente de aporte de sedimentos de la Cordillera Oriental y pasa nuevamente a la ancestral Cordillera Central. El análisis estadístico arrojó una dirección media de paleocorriente para esta formación de 30° azimut y alta relación de consistencia de 0,97 (TABLA 6 y FIGURA 11).

Los resultados de paleocorrientes indican que hubo cambios significativos en la paleogeografía de las áreas de aporte de los sedimentos para cada formación de la secuencia sedimentaria. Estos cambios obedecen posiblemente a los primeros levantamientos de la Cordillera Oriental durante el Mioceno temprano (Formación Colorado) y tardío (Real Superior) según el análisis estadístico de las paleocorrientes. Se interpreta que la ancestral Cordillera Central pudo ser la principal fuente de sedimentos seguida por la Cordillera Oriental, las cuales presentaron levantamientos relativos con tasas de sedimentación fuertes y subsidencia, en una cuenca aparentemente muy activa tectónicamente (Guerrero, 1997).

Los resultados de paleocorrientes obtenidos indican que el área de estudio es una zona altamente inestable tectónicamente, evidencia de ello son los constantes cambios en las direcciones de flujo de los sedimentos

provenientes principalmente de la ancestral Cordillera Central y en menor proporción de la Cordillera Oriental. En las dos geoformas el aporte proviene de puntos geográficamente diferentes resultado muy probablemente, de los levantamientos con tasas de sedimentación fuertes, producidas por los esfuerzos de tipo compresional que atravesó el área desde el Eoceno Superior hasta la actualidad.

CONCLUSIONES

Los datos de paleocorrientes analizados indican que el mayor aporte para la secuencia cenozoica (Frm. Esmeraldas, Frm. Mugrosa, Grupo Real y Frm. Mesa) provino de la ancestral Cordillera Central, durante el Eoceno tardío (Formación Esmeraldas), Oligoceno (Formación Mugrosa), Mioceno medio (Frm. Real Inferior y Frm. Real Medio) y Plioceno tardío (Formación Mesa), posiblemente de puntos geográficamente diferentes. Un menor aporte provino de la ancestral Cordillera Oriental, la cual según el análisis de paleocorrientes sufrió sus primeros pulsos de levantamiento durante Mioceno temprano (Frm. Colorado) y Mioceno tardío (Formación Real Superior), periodos en los cuales predominó su aporte de sedimentos respecto a la ancestral Cordillera Central.

Las metodologías utilizadas en superficie y subsuelo para medir paleocorrientes se complementan. Se logró de esta manera obtener indicios de la geodinámica de la cuenca para la época en que se depositaron los sedimentos que conforman cada unidad.

Los registros de *dipmeter*, por ser continuos, brindan información vertical detallada en centenas o millares de metros, permitiendo obtener información de roca no aflorante. Su correcta interpretación litológica está supeditada a un adecuado tratamiento en la separación del efecto de fluidos naturales, lodos de perforación y otras posibles interferencias (Arche, 2010). Estos factores pueden ser soportados si se cuenta con información de pozos cercanos con registros o núcleos que puedan ser correlacionables, y así aumentar su fiabilidad.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al geólogo Isaid Quintero quien nos guio para la toma de paleocorrientes en campo y tratamiento de la información. También agradecemos a los colegas Clara Torres y Freddy Hernández con quienes se realizó la labor de campo y se discutió sobre el manejo e interpretación de los datos. Por último también agradecimientos a los dos evaluadores del

artículo, por su interés, paciencia y espíritu científico para dar sus aportes al presente trabajo; así como a todas las personas que de alguna u otra manera contribuyeron para poder llevar a cabo este estudio.

REFERENCIAS

- Arche, A. 2010. Sedimentología del proceso físico a la cuenca sedimentaria - Consejo Superior de Investigaciones Científicas de España, pp. 28-33.
- Berg, Ch.R. 1998. Syntetic deviation, a new dipmeter interpretation method. AAPG Bulletin, 82(6): 1133-1139.
- Caballero, V. 2010. Evolución tectono-sedimentaria del Sinclinal de Nuevo Mundo, cuenca sedimentaria Valle Medio del Magdalena, Colombia, durante el Oligoceno-Mioceno. Tesis de Maestría en Geología. Universidad Industrial de Santander, 149p.
- De Porta, J. 1966. Geología del extremo sur del Valle Medio del Magdalena entre Honda y Guataqui (Colombia). Boletín de Geología, 22-23: 5-347.
- De Porta, J. 1974. Lexique Stratigraphique International. Volume V Amérique Latine. Centre National de la Recherche Scientifique. Paris, Fasc. 4, 692p.
- DeCelles, P., Langford R., and Schwartz, R. 1983. Two new methods of paleocurrent determination from trough cross-stratification. Journal of Sedimentary Petrology, 53(2): 629-642.
- Delgado, A., y Rubiano, J. 2008. Determinación de la dirección de las paleocorrientes y del área fuente de los sedimentos (Plioceno la Neógeno) en los campo de Lisama, Tesoro, Nutria y Peroles, Vale Medio del Magdalena, Colombia, Sur America. VI Ingepet, Informe Interno Ecopetrol-ICP, pp. 14-18.
- Gómez, E., Jordan, T.E., Allmendinger, R.W., Hegarty, K., Kelley S., and Hiezler M. 2003. Controls on architecture of the Late Cretaceous to Cenozoic southern Middel Magdalena Valley Basin, Colombia, Geological Society of America Bulletin, 115(2): 131-147.
- Guerrero, J. 1997. Stratigraphy, sedimentary environments, and the Miocene uplift of the Colombian Andes. In: Kay R.F, Madden, R.H., Cifelli. R.L., and Flynn, J.J. (Eds.). Vertebrate Paleontology in the Neotropics. The Miocene Fauna of La Venta, Colombia. Smithsonian Institution Press, pp. 15-43.
- Olaya, I., Munar, F., Rubiano, J., Reyes, J., Galindo, M., y Díaz, O. 2001. Estratigrafía de unidades reservorio y sellos en el límite de las cuencas Valle Medio del Magdalena y Valle Superior del Magdalena. Informe interno Ecopetrol – ICP, pp. 120-134.
- Rubiano, J.L. 1998. Determinación de las direcciones de paleocorrientes en el Campo Provincia, Valle Medio del Magdalena. Ciencia, Tecnología y Futuro, 1(4): 33-48.
- Rubiano J.L. 2009. Modelo geológico de los campos maduros de Lisama, Tesoro, Nutria y Peroles, Valle Medio del Magdalena. Colombia, X Simposio Bolivariano Exploración Petrolera en Cuencas Subandinas Cartagena, Colombia. pp. 2-7.
- Quintero, I. 2010. Cinemática de las estructuras de deformación del sector norte de la cuenca de Medina (Colombia) durante la depositación del Grupo Guayabo. Tesis de maestría Universidad Industrial de Santander, 83p.

Trabajo recibido: septiembre 9 de 2014

Trabajo aceptado: julio 5 de 2015