

# Análisis e interpretación estructural de la Falla Carolina en el sector "A", mina Calenturitas, La Loma-Cesar, Colombia

## Analysis and structural interpretation of the Carolina Fault in the sector "A", Calenturitas mine, La Loma-Cesar, Colombia

Andrés José Córdoba Corzo<sup>1</sup>, Yesica Paola Moscote Daza<sup>2</sup>, Elías Ernesto Rojas Martínez<sup>3</sup>, Dino Carmelo Manco Jaraba<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Ingeniero geólogo, Fundación Universitaria del Área Andina, Semillero de Investigación Geológico Minero. Valledupar. Colombia.  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9003-8771>

<sup>2</sup> Ingeniero geólogo, Fundación Universitaria del Área Andina, Semillero de Investigación Geológico Minero. Valledupar. Colombia.  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6224-2342>

<sup>3</sup> Geólogo, Esp. Minería a Cielo Abierto, Fundación Universitaria del Área Andina, Grupo de Investigación en Ingeniería Geológica. Valledupar. Colombia.  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0402-1565>

<sup>4</sup> M.Sc. Gestión Ambiental y Energética en las Organizaciones, Dirección de Investigación, Universidad de La Guajira.  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8506-094X>

Email: [dinomancojaraba@gmail.com](mailto:dinomancojaraba@gmail.com)

**Cite this article as:** A. J. Córdoba Corzo, Y. P. Moscote Daza, E. E. Rojas Martínez, D. C. Manco Jaraba "Análisis e interpretación estructural de la Falla Carolina en el sector "A", mina Calenturitas, La Loma-Cesar, Colombia", *Prospectiva*, Vol. 17 N° 2, 18-24, 2019

**Recibido: 12/01/2018 / Aceptado: 16/05/2019**

<http://dx.doi.org/10.15665/rp.v17i2.1882>

### RESUMEN

La mina Calenturitas ubicada en el corredor carbonífero del departamento del Cesar, es dividida en varios sectores, particularmente en el sector "A" existe una falla geológica local, llamada Falla Carolina, sin seguimiento de control estructural y caracterización descrita, ocasionando problemas durante el minado de los mantos de carbón, generando inestabilidad en las paredes y rampas. Para la descripción y detalle del comportamiento de la falla se efectuaron levantamientos estructurales en campo y correlaciones de secciones transversales en el sector, determinándose que es una falla de tipo inversa con un rumbo N76°W y buzamiento 57° NE, la falla genera saltos verticales en los mantos de carbón desde 3.5 hasta 9 metros, los saltos no son constantes, varían a medida que la minería avanza hacia el sur de la mina. La Falla Carolina no posee un componente de rumbo así su desplazamiento horizontal es igual a 0 y por lo tanto su desplazamiento neto es igual al salto vertical. La interpretación de pozos exploratorios y correlación de secciones, determinaron que en los futuros nivel de minería la Falla Carolina no tendrá efecto sobre la secuencia estratigráfica.

**Palabra claves:** Dirección de buzamiento; Estratificación; Falla geológica; Mantos de carbón; Modelo geológico, Yacimiento.

### ABSTRACT

The Calenturitas mine located in the Carboniferous corridor of the Department of Cesar, is divided into several sectors, particularly in sector "A" there is a local geological fault, called Carolina Fault, without monitoring of structural control and described characterization, causing problems during the mining of the coal seams, generating instability in the walls and ramps. for the description and detail of the behavior of the fault were made structural surveys in the field and correlations of cross sections in the sector, determining that it is a fault of reverse type with a bearing N76°W and dip 57° NE, the fault generates vertical jumps in the coal beds from 3.5 to 9 meters, the jumps are not constant, they vary as the mining advances towards the south of the mine. The Carolina Fault does not have a bearing component so its horizontal displacement is equal to 0 and therefore its net displacement is equal to the vertical jump. The interpretation of exploratory wells and correlation of sections, determined that in the future mining level the Carolina Fault will have no effect on the stratigraphic sequence.

**Key words:** Coal seams; Deposit; Direction of dip; Geological fault; Geological model; Stratification.

## 1. INTRODUCCIÓN

La mina Calenturitas es uno de los proyectos mineros más importantes de todo el corredor carbonífero del departamento del Cesar, está dividida en varios sectores, A, B, C y D respectivamente.

El yacimiento geológicamente se localiza en el sinclinal de La Loma, estructuralmente está afectado por fallas geológicas de carácter local [1], resalta la Falla Carolina, objeto principal de esta investigación. La importancia y menester del desarrollo de este análisis es académico y práctico, el conocimiento y la interpretación del comportamiento de la Falla Carolina brinda una orientación acerca del proceso de minado del carbón en las áreas de influencia de la falla.

La Falla carolina en la secuencia carbonífera origina problemas durante el minado de los mantos de carbón e inestabilidad en paredes bajas, de avance y rampas en el sector, razón por la cual se pretende utilizar los resultados de este estudio como base para futuras investigaciones, orientadas a seguimientos más profundos y avanzados en la falla y demás estructuras asociadas, que puedan generar complicaciones en las actividades mineras.

### 1.1 Localización

La mina Calenturitas se encuentra ubicada geográficamente [2], entre los municipios de El Paso, Becerril y La Jagua de Ibirico (figura 1), sobre la Troncal de Oriente, a unos 14 Km del sitio denominado Cruce La Loma hacia el Municipio de La Jagua de Ibirico; colindando con otros proyectos importante como: Mina El Descanso al norte, Colombia Natural Resources (CNR), Mina, Mina La Francia y Mina El Hatillo al oeste, La Mina La Jagua al este y con La Mina Pribbenow al sur [3] [4].

Figura 1. Ubicación geográfica de la mina Calenturitas y otras operaciones del grupo Prodeco.  
Figure 1. Geographic location of the Calenturitas mine and other operations of the Prodeco group



Fuente: C.I Prodeco S.A, 2016. / Source: C.I Prodeco S.A, 2016.

### 1.2 Marco geológico Regional

Eventos trascendentales en el bloque Andes Norte o Norandino están relacionados con la actividad geotectónica de la Falla de Oca y la placa caribe [5], las cuales provocaron esfuerzos que ocasionaron una rotación dextral de la región occidental del bloque, afectando la Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM) [6], la Serranía del Perijá (SP) y la cuenca Cesar – Ranchería [7], dicha rotación generó un acortamiento en la cuenca Cesar – Ranchería, y la fragmentación del basamento tanto de la Sierra Nevada como la Serranía del Perijá [8].

La cuenca Cesar – Ranchería, considerada una depresión intra montañosa [9], afectada por la interacción de la placa caribe con la placa suramericana [9], estructuralmente levantada por la Serranía del Perijá, como resultado del movimiento oblicuo y colisión de la placa caribe y suramericana [10].

### 1.3 Marco geológico Local

La litología predominante en la mina Calenturitas es de origen sedimentario (Paleógeno – Neógeno), representadas por las Formaciones Barcos, Cuervos y Cuesta, y depósitos sedimentarios del Holoceno [11].

La mayor parte de los depósitos de carbón se formaron durante los últimos tiempos del Carbonífero y principios del Pérmico [12], la explotación de carbón que se lleva a cabo en el yacimiento se encuentra estratigráficamente situada en el miembro medio de la Formación Cuervos (Paleógeno) [11]. El sector “A” de la mina Calenturitas se caracteriza por una secuencia de eventos cíclicos grano decreciente, con areniscas de color gris de tamaño de grano fino a medio, limolitas grises, arcillolitas carbonosas y mantos de carbón, suprayacidas por arenas, limos, y arcillas no consolidadas [11] (figura 2).

El yacimiento estructuralmente está limitado hacia el NW por la Falla La Loma y el Hatillo y hacia el SE por la Falla El Tigre [13]. El sector “A” es afectado por fallas locales de naturaleza normal e inversa, cuyos desplazamientos van desde los 50cm y los 9mts, siendo la más importante la Falla Carolina. El sinclinal de la Loma en su flanco occidental presenta cambios graduales en los buzamientos de los mantos, oscilando entre los 25° y los 45° este eje es denominado cambio de buzamiento occidental, mientras que hacia su flanco oriental se observa un cambio brusco en el buzamiento, que van desde los 25° a los 65° sobre el eje de inflexión, nombrado eje de inflexión oriental (figura 3).

Figura 2. Mapa geológico del sector "A" de la mina Calenturitas.  
Figure 2. Geological map of sector "A" of the Calenturita mine.

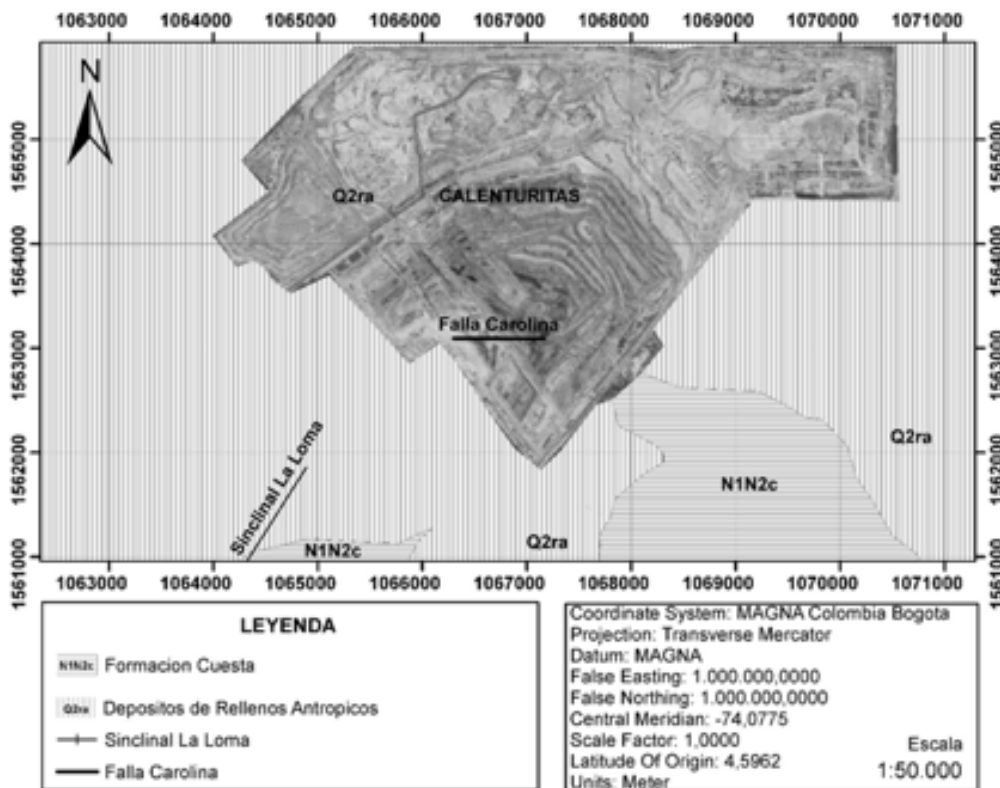
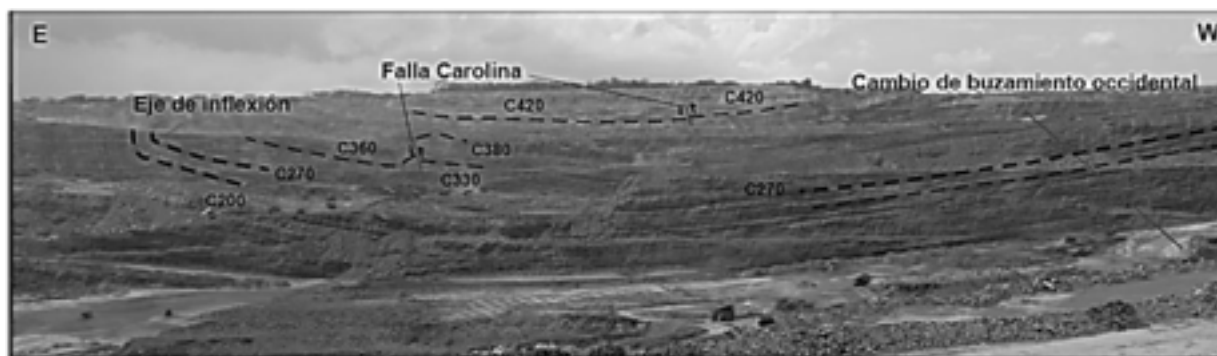


Figura 3. Principales estructuras del sector "A", en la mina Calenturitas.  
Figure 3. Main structures of sector "A", in the Calenturitas mine.



Fuente: Autores. / Source: Authors.

## 2. METODOLOGÍA

Levantamientos estructurales fueron efectuados en campo, regidos por los estándares establecidos por la empresa [14], donde se especifican los procedimientos para la toma de información en campo. Fue necesario el levantamiento de las superficies de fallas, diaclasas, saltos de fallas durante la minería, las trazas y respaldos de los mantos de carbón que se encuentre afectado por la falla.

Para la caracterización de las trazas y los respaldos, se georreferenciaron con un Global Positioning System (GPS), siguiendo el rumbo del manto (cada 20 metros) especifi-

cando el nivel (divisiones del tajo) de donde fue tomada la información con la cota correspondiente. El levantamiento estructural de las diaclasas se hizo con brújula, determinando rumbo y buzamiento, los saltos de fallas se obtuvieron con cinta métrica según fuese el desplazamiento de los mantos.

Se interpretaron y correlacionaron las voladuras bajo manto (VBM), pozos exploratorios y registros geofísicos, del sector A. El análisis de los registros se hizo bajo los parámetros establecidos en el estándar Log analysis for mining applications [15], detallándose las respuestas de registros geofísicos en diferentes litologías.

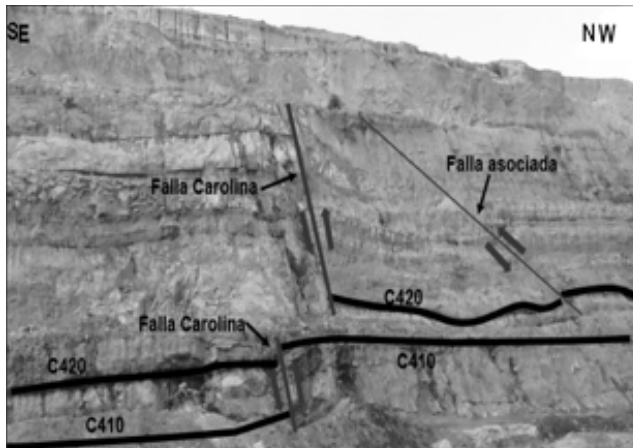
El registro Gamma Ray, fue utilizado como herramienta fundamental para la discriminación de la litología en el subsuelo, debido a su capacidad para medir naturalmente la radiactividad de las rocas, en el caso del carbón dicha respuesta es inferior a los 75 API (American Petroleum Institute).

Las secciones estructurales realizadas en el sector A, muestran los efectos de la Falla Carolina en la secuencia carbonífera, estimando las zonas donde posiblemente puede continuar el trazo de la Falla.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las estructuras observadas en el sector A, son asociadas a fallas satélites y fallas antitéticas, las fallas satélites tienen una orientación paralela al plano principal de la Falla Carolina (figura 4), con rumbo N55°W y buzamiento 41°NE, generan pequeños desplazamientos en los matos de carbón [16] que van desde los 80cm hasta 1.85mts. Las fallas antitéticas, tienen un comportamiento opuesto al plano principal de la Falla Carolina, son formadas en condiciones de deformación frágil debido a la propagación de los esfuerzos en el área, presentan un rumbo paralelo y buzamiento contrario con respecto al plano de falla principal, su rumbo y Buzamiento es de N50°W/59°SW y desplazamiento de 1.5mts.

Figura 4. Desplazamiento generado en los mantos 420 y 410 por el plano de Falla Carolina y el plano de falla asociada al plano principal.  
Figure 4. Displacement generated in layers 420 and 410 by the Carolina Fault plane and the fault plane associated with the main plane.

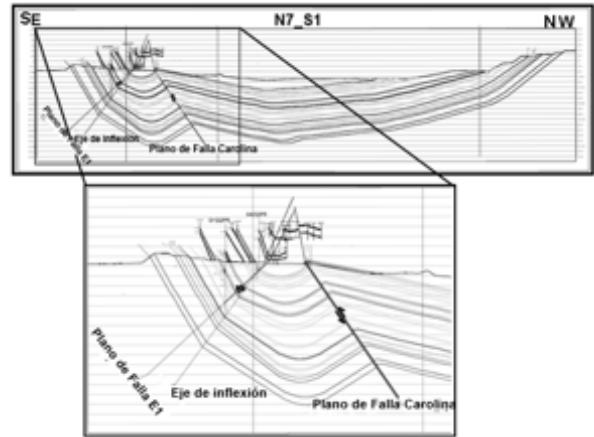


Fuente: Autores. / Source: Authors.

#### 3.1 Correlación de secciones transversales

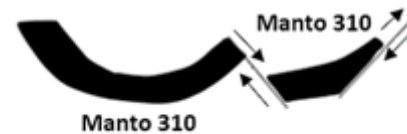
En la sección transversal N7\_S1 (figura 5) se observó que la Falla Carolina tiene un efecto en toda la secuencia estratigráfica, la falla sufre un desplazamiento en esta zona de 9mts, los mantos de carbón proveniente de flanco oriental se encuentran más plegados que los del flanco occidental, esta sección transversal muestra una falla normal denominada E1, ubicada al oriente de la Falla Carolina, tiene un desplazamiento de 1.5mts, desde el manto 345 hasta el manto 160 (figura 6).

Figura 5. Sección transversal N7\_S1.  
Figure 5. Cross section N7\_S1.



Fuente: C.I Prodeco S.A / Source: C.I Prodeco S.A

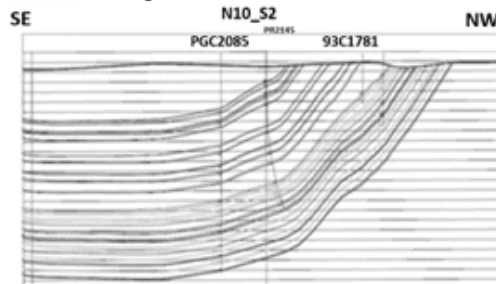
Figura 6. Falla E1, asociada a la Falla Carolina, desplazando el manto 310.  
Figure 6. Fault E1 associated with the Carolina Fault, displacing the mantle 310.



Fuente: Autores. / Source: Authors.

La sección transversal N10\_S2 (figura 7), futura zona de minería, se observa que la Falla Carolina no tiene ningún efecto sobre la secuencia estratigráfica, información corroborada por los registros density y dipmeter de pozos exploratorios.

Figura 7. Sección transversal N10\_S2.  
Figure 7. Cross section N10\_S2

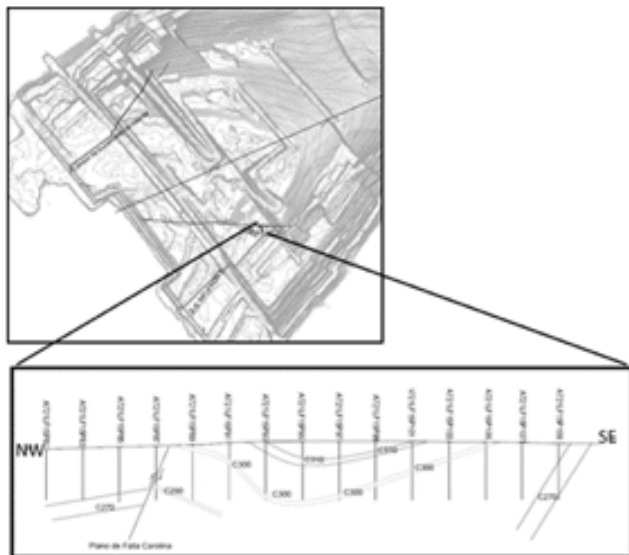


Fuente: Autores. / Source: Authors.

### 3.2 Interpretación de barrenos de voladura bajo manto (vbm) y pozos exploratorios

Los registros Gamma Ray de barrenos de voladuras bajo manto (VBM) realizados en el sector A, permiten observar la pérdida en la continuidad de la secuencia carbonífera, dicha pérdida es atribuida directamente a la Falla Carolina (figura 8).

Figura 8. Interpretación de barreno de voladura bajo manto.  
Figure 8. Blasthole interpretation under mantle.



Fuente: Autores. / Source: Authors.

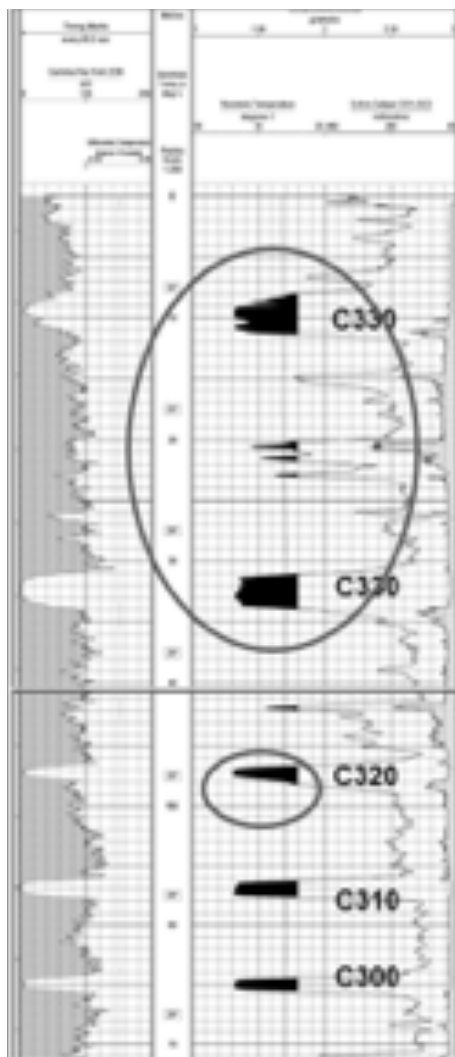
Los registros density y dipmeter del pozo PR2207, muestran una repetición del manto 330 y aumento en el espesor del manto 320, indicando un comportamiento inverso de la Falla Carolina (figura 9), se observa pérdida en la continuidad de los mantos en la secuencia estratigráficas, producto de las fallas satélites de comportamiento normal que se encuentran asociadas al plano principal de la Falla, los cambios en el buzamiento son muy evidente oscilan entre 25° y 65°, debido al efecto del eje de inflexión en esta zona.

### 3.3 Descripción de la Falla Carolina

La Falla Carolina es una falla de tipo inverso, con un alto ángulo de buzamiento, presentando un movimiento en el sentido de su buzamiento, este comportamiento es evidente en el ascenso del flanco noroccidental respecto al flanco suroriental (figura 10), las estructuras detalladas en campo asociadas a la falla tienen un rumbo promedio de N76°W y buzamiento 57° NE.

La Falla Carolina presenta características muy comunes de las fallas de buzamiento, como son los pliegues de arrastre [17]. El pliegue de arrastre es una deflexión curva de los marcadores adyacentes a los planos de fallas [18], existen dos tipos de estos pliegues, están los normales que son deflexio-

Figura 9. Interpretación del registro density del pozo PR2207, en el que se evidencia la repetición del manto 330 y un aumento del espesor del manto 320.  
Figure 9. Interpretation of the well density record PR2207, which shows the repetition of the mantle 330 and an increase in the thickness of the mantle 320.



Fuente: C.I. Prodeco S.A. / Source: C.I. Prodeco S.A.

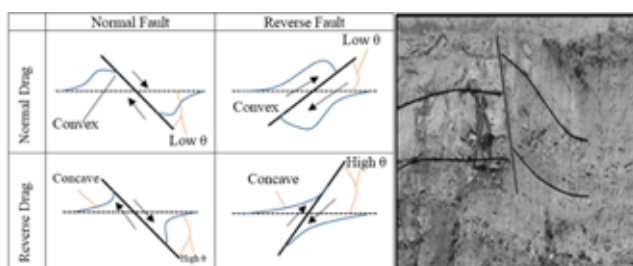
Figura 10. Flanco noroccidental asciende respecto al flanco suroriental  
Figure 10. Northwest flank rises with respect to the southeast flank



Fuente: Autores. / Source: Authors.

nes de los marcadores en forma convexa en la dirección del movimiento y los pliegues inversos que son deflexiones de los marcadores, pero en forma cóncava en la dirección del movimiento [19] (figura 11); además genera saltos verticales en los mantos de carbón desde 3.5mts hasta 9mts, estos saltos van disminuyendo hacia el sur de la mina; La falla no posee un componente de rumbo así su desplazamiento horizontal es igual a 0 y por lo tanto su desplazamiento neto será igual al salto vertical de la falla.

Figura 11. Tipos de pliegues según Grasemann B, Martel S. y Passchier C. Y pliegue formado por la Falla Carolina.  
Figure 11. Types of folds according to Grasemann B, Martel S. and Passchier C. And fold formed by the Carolina Fault.



Fuente: Autores. / Source: Authors.

#### 4. CONCLUSIONES

Los datos obtenidos en campo y las correlaciones realizadas en las secciones transversales en el sector “A” de la mina Calenturitas, comprueban que la Falla Carolina corresponde a una falla inversa con un rumbo y buzamiento promedio de N76°W / 57°NE. Además, estas secciones permitieron corroborar que la secuencia estratigráfica de todo el depósito en el sector es afectada por el trazo de la Falla.

En la zona de influencia de la Falla Carolina se encuentran fallas satélites de comportamiento inverso asociadas a ella, con un rumbo de N55°W y un buzamiento de 41°NE, y fallas antitéticas de comportamiento normal con rumbo de N50°W, y buzamiento 59°SW.

La interpretación de pozos exploratorios y la correlación de secciones permiten concluir que el desplazamiento neto originado por la falla no es constante, tiende disminuir hacia el sur de la mina, asimismo, se estima que, en los futuros niveles de minería, la Falla Carolina no tendrá efecto sobre la secuencia estratigráfica.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar sus agradecimientos al departamento de geología de la mina Calenturitas, por su apoyo en la realización e interpretación de los análisis realizados.

#### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA

- [1] Y. Estévez y D. Quintero D. (2008). Determinación del ambiente de depósito de la formación los cuervos miembro medio, aplicado a la variabilidad en la calidad del carbón y a las asociaciones litofaciales obtenidas de los núcleos de perforación, en el sector del hatillo, la Loma – cesar. Tesis pregrado, Universidad industrial del Santander UIS, Colombia.
- [2] Prodeco, (2016). Ubicación geográfica de la mina Calenturitas y otras operaciones del grupo Prodeco. Disponible desde <http://www.grupo-prodeco.com.co/es/quienes-somos/grupo-prodeco/ 2016>.
- [3] N. Romero. (2011). Supervisión en voladura bajo manto y control de calidad en la extracción del carbón. Bucaramanga. Proyecto de grado modalidad práctica empresarial. Tesis pregrado, Universidad industrial del Santander UIS, Colombia.
- [4] J. Hincapié. (2015). Aportes a la caracterización geológica y geotécnica del material que compone los depósitos de estéril en la mina La Jagua. Proyecto modalidad práctica empresarial. Tesis pregrado, Universidad de Caldas, Colombia.
- [5] G. Germán, A. Bayona, J. Silva, A. Cardona, A. Rapalini, P. Montañón, A. Eisenhauer, Karol. Dussan, V. Valencia, V. Montes. (2019). Jurassic break-up of the Peri-Gondwanan margin in northern Colombia: Basin formation and implications for terrane transfer. *Journal of South American Earth Sciences*. [online] (89) pp 92 – 117. Disponible desde <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0895981118302013>
- [6] G. Chicangana, A. Kammer, A. Vargas. (2019, Enero). La Sierra Nevada de Santa Marta y la Serranía de Perijá, Colombia y Venezuela: ¿Son resultado de la convergencia entre la placa Caribe y el margen suramericano durante el Neógeno Superior?. Presentado en 19th CARIBBEAN GEOLOGICAL CONFERENCE Le Gosier, Guadeloupe, France March 21st to March 24th 2011. [En línea] Disponible <[https://www.researchgate.net/publication/330482608\\_Session\\_Geodynamics\\_Caribbean\\_tectonic\\_and\\_tectonic\\_evolution\\_Select\\_preferred\\_Oral\\_La\\_Sierra\\_Nevada\\_de\\_Santa\\_Marta\\_y\\_la\\_Serrania\\_de\\_Perija\\_Colombia\\_y\\_Venezuela\\_Son\\_resultado\\_de\\_la\\_convergencia\\_entre\\_](https://www.researchgate.net/publication/330482608_Session_Geodynamics_Caribbean_tectonic_and_tectonic_evolution_Select_preferred_Oral_La_Sierra_Nevada_de_Santa_Marta_y_la_Serrania_de_Perija_Colombia_y_Venezuela_Son_resultado_de_la_convergencia_entre_)>
- [7] G. Chicangana, A. Kamme, C. Vargas, C. Ordoñez, H. Mora, A. Ferrari y S. López. (2011). El posible origen de la sismicidad somera que se presenta en la región que corresponde a la Sierra Nevada de Santa Marta, la Serranía de Perijá y la Península de La Guajira, noreste de Colombia. *Caycau*. [online] 6 (1), pp. 1 – 33. Disponible desde <[https://www.researchgate.net/publication/277273595\\_El\\_posible\\_origen\\_de\\_la\\_sismicidad\\_somera\\_que\\_se\\_presenta\\_en\\_la\\_region\\_que\\_corresponde\\_a\\_la\\_Sierra\\_Nevada\\_de\\_Santa\\_Marta\\_la\\_Serrania\\_de\\_Perija\\_y\\_la\\_Peninsula\\_de\\_La\\_Guajira\\_noreste\\_de\\_Colombia](https://www.researchgate.net/publication/277273595_El_posible_origen_de_la_sismicidad_somera_que_se_presenta_en_la_region_que_corresponde_a_la_Sierra_Nevada_de_Santa_Marta_la_Serrania_de_Perija_y_la_Peninsula_de_La_Guajira_noreste_de_Colombia)>
- [8] Universidad Industrial del Santander – Agencia Nacional de Hidrocarburos. Prospectividad de la Cuenca Cesar Ranchería. Contrato 027 de 2007, entre Universidad Industrial de Santander [UIS] y Agencia Nacional de Hidrocarburos [ANH]. Bucaramanga. Colombia. Disponible desde <[http://www.anh.gov.co/Informacion-Geologica-y-Geofisica/Estudios-Integrados-y\\_Modelamientos/Presentaciones%20y%20Poster%20Tcnicos/Cesar\\_Rancheria.pdf](http://www.anh.gov.co/Informacion-Geologica-y-Geofisica/Estudios-Integrados-y_Modelamientos/Presentaciones%20y%20Poster%20Tcnicos/Cesar_Rancheria.pdf). (2008)>
- [9] A. Arias Y C. Morales. Mapa geológico generalizado del departamento del cesar memoria explicativa. Ministerio de minas y energía instituto de investigación geocientífica, minero – ambiental y nuclear (Ingeominas) Bogotá D.C. 1999.
- [10] C. Ojeda. (2008). Petrografía y petrología de unidades paleógenas en las cuencas Cesar – Ranchería y Catatumbo y sus implicaciones en la tectónica regional. Tesis pregrado, Universidad Nacional de Colombia.

- [11] M. Hernández. Geología de plancha 48 Jagua de Ibirico. Disponible desde [http://aplicaciones1.sgc.gov.co/Bodega/i\\_vector/130/10/0100/20444/documento/pdf/0101204441101000.pdf](http://aplicaciones1.sgc.gov.co/Bodega/i_vector/130/10/0100/20444/documento/pdf/0101204441101000.pdf) 2002
- [12] G. Feulner. (2017). Formation of most of our coal brought Earth close to global glaciation. *PubMed*. [online] 114 (43) pp 11333 - 113337. Disponible <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/29073052>>
- [13] Intera Bioss. Evaluación geológica regional de la cuenca Cesar – Ranchería: desarrollo estructural regional de la cuenca Cesar – Ranchería, Serranía del Perijá y cuenca de Maracaibo. La Unión Temporal Intera Information y Technologies y Bioss LTDA. 1995.
- [14] Prodeco, Manual de Procedimientos para la toma de información en campo, 2013.
- [15] D. Firth, *Log analysis for mining applications*, Australia: Peter Elkington Editorial, 1999.
- [16] A. Druga, Z. Schleder y C. Krezsek. (2014, Junio). The Evolution of Reverse Faults in Forced-fold Analogue Experiments Using Wet Clay. Presentado en 76th EAGE Conference and Exhibition. [En línea] Disponible <<http://earthdoc.eage.org/publication/search/?pubedition=402>. 2014>
- [17] B. Grasemann, S. Martel y C. Passchier (2005). Reverse and normal drag along a fault. *Journal of structural geology*. [Online]. 27 (6) pp 999 – 1010. Disponible desde <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0191814105000738>>
- [18] H. Niemeyer. (1999). Nuevos datos cinemáticos para la Falla Sierra Castillo en Quebrada del Carrizo, Precordillera de la Región de Atacama. *Geología*. [Online]. 26 (2). pp.159-174. Disponible desde <[https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0716-02081999000200002](https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0716-02081999000200002)>
- [19] E. Bonanno, L. Bonini, R. Basili, G. Toscani y S. Seno. (2017). How do horizontal, frictional discontinuities affect reverse fault-propagation folding?. *Journal of Structural Geology*. [Online] 102 (1). pp. 147-167. Disponible desde <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0191814117301554>>