

*Artículo de Investigación***Análisis de fracturas y caracterización de diaclasas de la formación Villeta, sector occidental de la subcuenca de Neiva****Analysis of fractures and characterization of joints of the Villeta formation, western sector of the Neiva sub-basin****Juan David Monje Díaz**Estudiante de Ingeniería de Petróleos. Universidad Surcolombiana. Avenida Pastrana Borrero-Carrera 1 Neiva – Huila, Colombia. E-mail: u20151134333@usco.edu.co**Nicole Daniela Latorre Bustos**Estudiante de Ingeniería de Petróleos. Universidad Surcolombiana. Avenida Pastrana Borrero-Carrera 1 Neiva – Huila, Colombia. E-mail: u20151133529@usco.edu.co**Ingrid Natalia Muñoz Quijano**PhD. En Geología. Docente Universidad Surcolombiana. Avenida Pastrana Borrero-Carrera 1 Neiva – Huila, Colombia. E-mail: ingrid.munoz@usco.edu.co

Fecha de recibido: 01/10/2020

Fecha de revisión: 27/10/2020

Fecha de aprobación: 21/12/2020

DOI: 10.25054/22161325.2725

Resumen

Para evaluar los yacimientos naturalmente fracturados se tienen diferentes fuentes de información y métodos que pueden ser de limitado acceso o de altos costos, especialmente para formaciones en las que se desconoce su nivel de productividad, o que aún no se ha estudiado para determinar su viabilidad como productora de hidrocarburos. Por lo que en este artículo se presenta la aplicación de un método de análisis de afloramiento, como fuente de información indirecta, para caracterizar y determinar las posibles vías de migración de las formaciones carbonatadas Hondita y Lomagorda pertenecientes al grupo Villeta. En el desarrollo de esta caracterización se implementó el uso de estrategias de muestreo de fracturas de tipo ventana rectangular, mediante el ejercicio de tomar medidas estructurales, como rumbo, buzamiento, separación y espaciamiento, sobre zonas delimitadas en los afloramientos de las formaciones de interés. Con ayuda de los resultados se identificaron 7 zonas de diaclasas, con una tendencia en rumbos de bajo ángulo con rangos en dirección noreste, estableciendo que esta sería la predominancia de migración de fluidos; dando una expectativa para que estos datos mejoren positivamente el desarrollo de los yacimientos.

Palabras clave: análisis de afloramiento; migración de fluidos; yacimientos naturalmente fracturados; yacimientos carbonatados.

Abstract

To evaluate naturally fractured reservoirs, there are different sources of information and methods that may be of limited access or high costs, especially for formations in which their level of productivity is unknown, or that have not yet been studied to determine their viability as hydrocarbon producer. Therefore, this article presents the application of an outcrop analysis method, as a source of indirect information, to characterize and determine the possible migration routes of the Hondita and Lomagorda carbonate formations belonging to the Villeta group. In the development of this characterization, the use of rectangular window-type fracture sampling strategies was implemented, through the exercise of taking structural measures, such as direction, dip, separation and spacing, over

delimited areas in the outcrops of the formations of interest. With the help of the results, were identified 7 zones of joints, with a trend in low-angle courses with ranges in the northeast direction, establishing that this would be the predominance of fluid migration; giving an expectation that these data positively improve the development of the reservoirs.

Keywords: outcropping analysis; fluid migration; naturally fractured reservoirs; carbonate reservoirs.

1. Introducción

En Colombia, en más de cien años de historia de producción han sido los yacimientos convencionales de origen silisiclásico los que han tenido mayor auge, pero por las limitadas reservas petrolíferas que existen y al aumento de demanda de energía, cada día se hace más importante encontrar nuevos campos de producción o potencializar los existentes. Por lo que resulta trascendental avanzar en el conocimiento, identificación y caracterización de más cuencas sedimentarias, en este caso haciendo énfasis en los yacimientos carbonatados. En los cuales su evaluación ha sido de gran interés durante mucho tiempo para investigadores del área de hidrocarburos a nivel internacional, pues estos representan un porcentaje grande y creciente de las reservas mundiales de hidrocarburos (Roehl & Choquette, 2012); además de gran dificultad por su heterogeneidad, en especial, los naturalmente fracturados (Padilla & Toledo, 2013).

Debido al limitado acceso de conocimiento de las fracturas mediante información de registro de pozos, sísmica y datos geofísicos, se tienen otros métodos de evaluación, empleando: fuentes directas, que incluyen núcleos y recortes de perforación; y fuentes indirectas, como análisis de afloramientos, análisis de presiones y la historia de producción del pozo (Aguilera & Aguilera, 2001), (Khoshbakht *et al.*, 2012), (Larssen *et al.*, 2020), (Vo *et al.*, 2020). Entre los cuales autores destacan los análogos de afloramiento con enfoques estadísticos, en los que los parámetros de fractura derivados se usan para la determinación del flujo de fluidos (Spence *et al.*, 2004), (Agosta *et al.*, 2010), (Guerriero *et al.*, 2013), (Panza *et al.*, 2015).

Según Stephenson *et al.*, (2007) los estudios de afloramiento se utilizan para caracterizar patrones de fractura dentro de las unidades potenciales de yacimientos de hidrocarburos, con la expectativa de que estos datos mejoren positivamente su desarrollo. Pero, para que los datos tomados sean de valor para el diseño de ingeniería, es necesario emplear métodos de muestreo estadístico y procesamiento de datos más rigurosos, como las técnicas de línea de exploración y muestreo de ventana rectangular (Watkins *et al.*, 2015).

El presente trabajo se ha enfocado en investigar las formaciones de Hondita y Lomagorda, en las que se han realizado estudios de cortes estructurales tomados en campo para cartografía, encontrando que estas unidades tienen buzamientos hacia el oeste donde alcanzan hasta 65° de inclinación, por lo que proponen que el tensor de esfuerzos local es en una dirección de compresión WNW-ESE. (Blanco *et al.*, 2002), (Ferreira *et al.*, 2002), (Gómez *et al.*, 2005). Adicionalmente, autores han realizado diferentes análisis sobre el potencial de hidrocarburos en la zona de interés, concluyendo que el grupo al que pertenecen estas formaciones es exitoso como productor de hidrocarburos (Duque *et al.*, 2012), (Barrios, 2015).

De aquí surge la necesidad de complementar la información disponible sobre estas formaciones, pertenecientes al grupo Villeta, trayendo a cumplimiento nuestro objetivo que es caracterizar las familias de diaclasas identificadas en los afloramientos de estos yacimientos naturalmente fracturados, para evaluar de forma integrada las posibles vías de migración con la información obtenida de las medidas estructurales tomadas sobre afloramientos de acuerdo con la técnica de muestreo de ventana rectangular.

1.1. Entorno geológico de la zona de estudio

La zona comprendida dentro del trabajo de investigación es parte integral de la cuenca del Valle Superior del Magdalena (VSM), específicamente sobre la subcuenca de Neiva, Grupo Villeta, ubicada en la plancha 323 del servicio geológico colombiano, ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.¡Error! No se encuentra**

el origen de la referencia.; los afloramientos estudiados se localizan en territorio de la Vereda Bomboná en el municipio de Palermo, al norte del departamento del Huila.

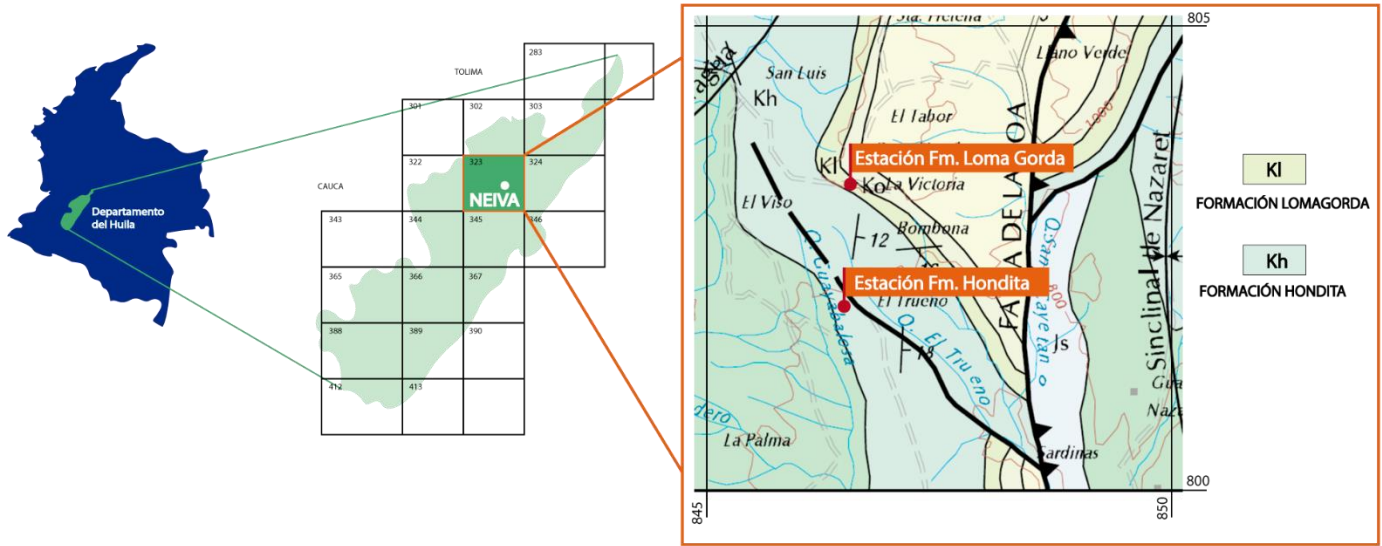


Figura 1. Ubicación de la zona de investigación. Sección tomada de plancha 323, Ferreira *et al.*, 2002.

La formación Hondita abarca zonas planas a levemente onduladas, en su mayor área se encuentra plegada y fallada, geológicamente cuenta con lodolitas con lentes de arena de grado muy fino; intercalaciones de calizas fosilíferas gris oscuro a negro, levemente arenosas; lodolitas calcáreas físciles y calizas lodosas en capas de 15 a 30 cm; encontrando restos de peces, belemnites, amonites y otros organismos plantónicos. Por otro lado, geológicamente la formación Lomagorda está constituida por lodolitas gris a negros, calizas micríticas y esparíticas de color crema a gris claro en capas estratificadas en capas delgadas levemente onduladas, además de lodolitas físciles derivadas de organismos plantónicos de origen marino (Ferreira *et al.*, 2002).

En relación con el marco tectónico, la cuenca ha estado representada por diversos episodios de deformación entre los que se puede destacar la actividad distensiva durante el Jurásico Superior de tipo Rift. Por otro lado, sobre el sistema andino, que afecta la cuenca, se cuenta con la presencia de un sistema de fallas (Falla La Plata-Chusma y asociadas) que integra de tipo cabalgamiento con una vergencia al NE, resultante de esfuerzos de deformación en sentido perpendicular: NW (Velandia *et al.*, 2001)

2. Materiales y métodos

Este estudio se desarrolló desde un frente investigativo y práctico, para lo cual fue necesario una revisión completa de la literatura básica y avanzada sobre temas que atañen a la investigación y análisis relacionados en la zona. Seguido de visitas a campo sobre el sector de la zona de interés para la toma de medidas estructurales sobre los afloramientos de las rocas carbonatadas y así procesar la información de acuerdo con los métodos de trabajo establecidos para este tipo de estudio.

2.1. Equipos y software

Para las primeras fases de la investigación, reconocimiento, fue necesario el uso de material bibliográfico y cartografía geológica de la zona. En cuanto al reconocimiento geológico y la medición estructural, que se abarcan en la etapa de campo, se realizó mediante empleo brújula, martillo, cinta métrica y libreta de campo. Y con respecto al procesamiento de los datos, se hizo uso del software online Stereonet (Cockett, 2011) y Dips v3.0 (Curran, 1999).

2.2. Procedimientos

De acuerdo con los métodos básicos de recopilación geológica, se realizaron tres salidas de campo para el levantamiento de 7 zonas del Grupo Villeta en las que se enfocó las unidades Hondita y Lomagorda, tomando medidas estructurales sobre los afloramientos de las rocas carbonatadas tales como rumbo, buzamiento, separación y espaciamiento.

De los métodos existentes para la determinación de distribución de discontinuidades, uno de los más utilizados para las mediciones de estructuras de fracturas sobre afloramientos es el de Ventana Rectangular; que consiste en delimitar el afloramiento de interés formando un rectángulo con cintas de medición fijadas a la superficie de la roca, haciendo que sea lo más grande posible para minimizar los efectos de sesgo de muestreo, y poder realizar todas las mediciones de los parámetros físicos de fractura que previamente fueron seleccionados dentro del área del rectángulo (Priest, 1993).

Este método reduce las limitaciones de la técnica de Línea de Exploración, porque se miden todas las fracturas dentro de la zona limitada, garantizando que estén presentes tanto las fracturas contenidas dentro de la ventana, como las que diseccionan y transectan la misma.

Se evidencia en la Figura 2: Fracturas contenidas dentro de la ventana, son las que sus dos extremos son visibles dentro de la ventana; Fracturas que diseccionan la ventana, discontinuidades que se cruzan con la ventana y tienen un solo extremo visible en la ventana, porque el otro extiende más allá de lo limitado; Fracturas que transectan la ventana, son las que se cruzan con la ventana y que no tienen ninguno de los extremos visibles, ya que se extienden más allá de los límites realizados.



Figura 2. Aplicación del método ventana rectangular sobre afloramiento de Hondita.

Finalmente, mediante el método de análisis estadístico de concentraciones y de distribución de polos/planos se determinó la tendencia de orientación de las fracturas y por consiguiente la de los esfuerzos. A partir de aquí, se realiza el tratamiento de los datos estructurales en forma gráfica haciendo uso de Stereonet (Cockett, 2011), para generar el diagrama de Rosetas con el cual se ayuda a visualizar las direcciones de los rumbos generales de las estructuras de planos tectónicos (diaclasas y fallas); y para para cuantificar la concentración de polos se genera el diagrama de concentración de Fisher con el software Dips v3.0, ya que para trabajar con un alto número de datos es más conveniente usar los polos de cada plano, y así observar la dispersión que presenta cada set o familia de diaclasas.

3. Resultados y discusión

La medición de datos estructurales de las unidades de Hondita y Lomagorda se realizaron de manera sistemática con la técnica de ventana rectangular, tomando la información de rumbo, buzamiento, separación y espaciamiento, obteniendo un total de 480 mediciones de estos parámetros físicos.

Tabla 1. Total de mediciones de parámetros físicos.

		Número de mediciones				
		Rumbo	Buzamiento	Separación	Espaciamiento	
Formación Hondita	Zona 1	14	14	12	12	
	Zona 2	16	16	14	14	
	Zona 3	16	16	14	14	
	Zona 4	34	34	31	31	
	Zona 5	9	9	7	7	
Formación Lomagorda	Zona 6	25	25	20	20	
	Zona 7	17	17	11	11	
TOTAL		131	131	109	109	480

Como se muestra en la Tabla 1, para la Formación Hondita se lograron identificar 5 zonas con la medición estructural de todos los parámetros en cada una de ellas, permitiendo así una agrupación de mediciones en familia, bajo un parámetro seleccionado en la etapa inicial de la investigación: permisividad de una variación máximo de 2° tanto en rumbo como en buzamiento para que pudiesen agrupadas; mientras que en la estación 2, perteneciente a la formación Lomagorda, las mediciones se llevaron en una cueva, con la mejor presentación de afloramiento, donde se lograron identificar discontinuidades, marcando tendencias en dirección de Rumbo y Buzamiento, pero limitándose en separación y espaciamiento por la dificultad presentada en ciertas fracturas.

En la Figura 3 se expresa la consolidación de las mediciones realizadas en campo, con sus concentraciones en cada uno de sus cuadrantes a manera de histograma; teniendo entonces en el cuadrante I una frecuencia aproximadamente del 15% de datos, para el cuadrante II 32%, y para el III y IV 37% y 16% respectivamente.

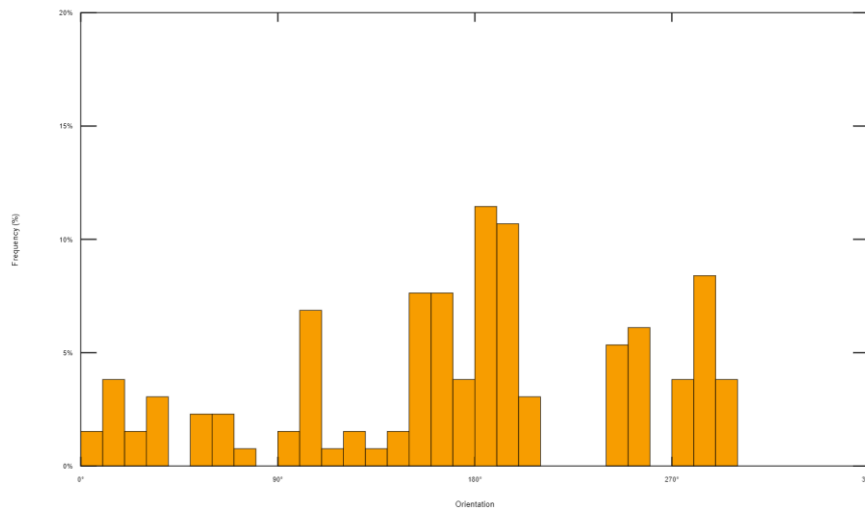


Figura 3. Histograma de planos por el software online Stereonet.

Con las medidas de las dos estaciones agrupadas, se empleó los datos de rumbo convertidos a azimut, y los de buzamientos de cada discontinuidad, indiscriminadamente de la zona o la familia, para elaborar el diagrama de roseta, presentado en la Figura 4a que permitió identificar que la agrupación de las mediciones se encuentra sobre el cuadrante suroeste, es decir, las medidas tomadas, planos de diaclasas, se encuentran dentro de esta tendencia. Esta información se corrobora con el estereograma de polos, ver Figura 4b, que muestra la mayor concentración en el cuadrante opuesto (Noroeste), porque estas medidas son opuestas a los planos, y es la representación del enterramiento de las discontinuidades, no los datos tomados directamente.

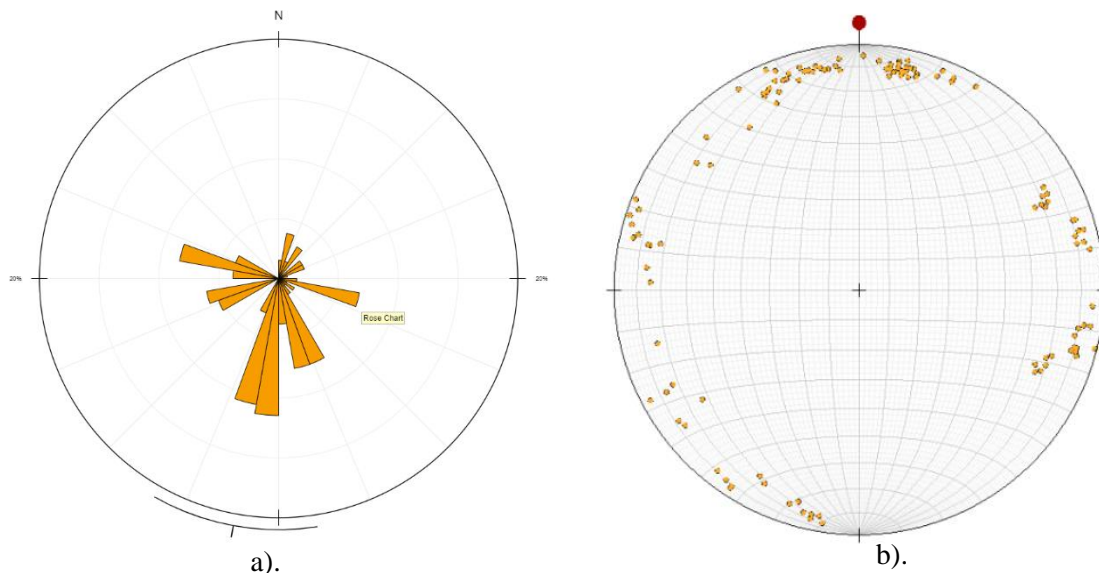


Figura 4. a). Visualización de planos en diagrama de roseta, b). representación de polos en estereograma.

La medida de interés en el estudio de análogos de afloramientos es la del enterramiento de las discontinuidades, es decir los polos, ya que esta es la respuesta en forma de alivio a todo esfuerzo al que es sometido y que supera la resistencia del material, siendo opuesta a la dirección de aquella máxima fuerza aplicada, y es a partir del alivio que se identifican las posibles vías de migración en yacimientos naturalmente fracturados como roca madre. Por lo que, al cuantificar la concentración de los polos en el diagrama Fisher, se evidencia que las discontinuidades cuentan con una concentración del 20-22.50% en el rango entre 10-15° con dirección NE, mostrado en la Figura 5 con su respectiva leyenda de dispersión; lo cual es importante para identificar que el alivio de la zona de estudio, set de discontinuidades, se encuentra en esta dirección y por tanto esta es la dirección del flujo de fluidos.

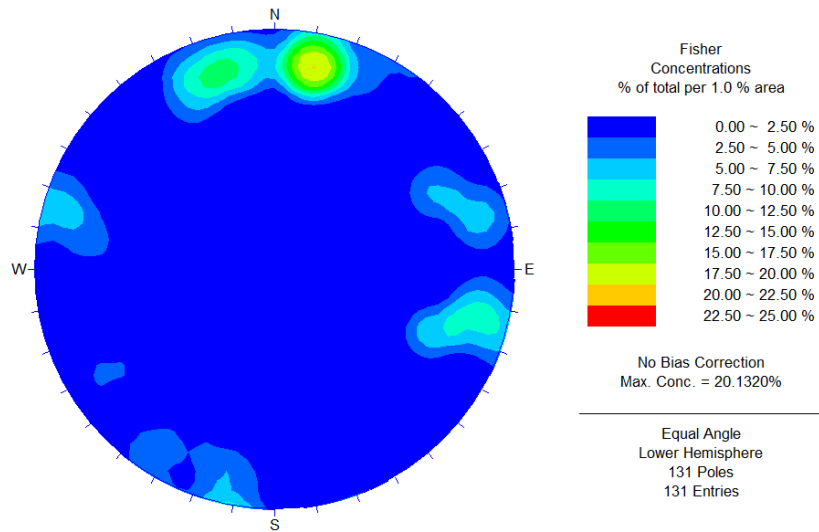


Figura 5. Concentración de polos por Diagrama de Fisher.

Una vez hallada la tendencia, se logró estimar la dirección del esfuerzo mayor, resultando perpendicular a la línea de polos, como se ilustra en la Figura 6; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Donde se logra determinar que el esfuerzo principal está en el rango 75-80 NW, lo que es congruente con el sistema geológico estructural del basamento geológico colombiano, al cual pertenece el Grupo Villeta, formado en el Cretáceo. Se puede constatar entonces que la dirección del esfuerzo principal de deformación determinado a partir del análisis de las mediciones sobre la zona descrita coincide con los estudios estructurales previos del basamento colombiano que es parte de la investigación sobre la evolución de los Andes colombianos.

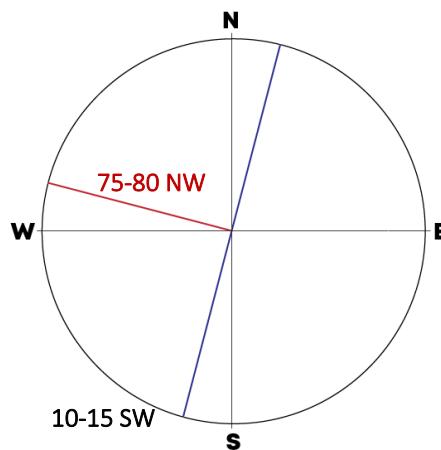


Figura 6. Diagrama de dirección de esfuerzo mayor en el Grupo Villeta.

4. Conclusiones

Se realizó el estudio en afloramientos mediante la técnica de Ventana Rectangular de 7 zonas en las formaciones: Lomagorda y Hondita, identificando familias de diaclasas entre todas las mediciones tomadas de separación, espaciamiento, rumbo y buzamiento, determinando con la representación de Diagrama de Roseta una tendencia en rumbos de bajo ángulo con rangos en dirección 10-15 SW.

Mediante el análisis de Estereograma y Diagrama de concentración de Fisher, se determinó que la orientación representativa del alivio de la zona estudiada se encuentra en el rango de 10-15 NE, siendo esta la dirección preferencial para la migración de fluidos.

Se evaluaron afloramientos de rocas carbonatadas Cretácicas del Grupo Villeta, reconociendo que el sentido del esfuerzo mayor partícipe del proceso de deformación de la zona estudiada fue en rango de 75-80 NW, lo cual es concordante con los esfuerzos regionales relacionados al levantamiento de la Cordillera Andina.

5. Agradecimientos

Para la realización de este trabajo de investigación se contó con la financiación de la convocatoria interna N° PSEM01 del 2019 para conformar el banco de proyectos de semilleros de investigación y desarrollo tecnológico e innovación, en la modalidad de financiación de la Universidad Surcolombiana. Proyecto N° 3337. Y el apoyo constante del semillero de investigación GEODA, perteneciente al grupo de investigación GIPE en el programa de ingeniería de petróleos.

6. Referencias bibliográficas

- Agosta, F., Alessandrini, M., Antonellini, M., Tondi, E., Giorgioni, M., 2010. From fractures to flow: a field-based quantitative analysis of an outcropping carbonate reservoir. *Tectonophysics* 490, 197–213. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2010.05.005>
- Aguilera, R., & Aguilera, M. S., 2001. Aspectos geológicos y de ingeniería en yacimientos naturalmente fracturados. *Revista Fuentes*, 1(1).
- Barrios L. A., 2015. Caracterización geológica de los indicios superficiales de hidrocarburos en el departamento del Huila "zona centro-Characterización Popayán". Neiva: Universidad Surcolombiana.
- Blanco, M., Macia, A., Sanabria., 2002. Geología estructural de piedemonte oriental de la cordillera central entre los municipios de Yaguará y Palermo, Valle Superior del Magdalena. Departamento del Huila (Colombia) / Mauricio Alberto Blanco; dirs. Carlos Macía, Mario de Freitas. Tesis de grado. pp 98.
- Cockett R., 2011. <https://app.visiblegeology.com/stereonet.html>. Consultado el 11 de julio de 2020.
- Curran J., 1999. Dips, (Versión 3.0). [Programa de computador]. Toronto, Ontario, Canadá: Rocscience Inc.
- Duque, C. A., Gómez, R., Cabrejo, T., Fonseca, C., & Garcia, J., 2012. Potencial Adicional De La formación Tetuán En El Campo Tenay. In 11th Simposio Bolivariano-exploración Petrolera en las Cuencas Sub Andinas (pp. cp-330). European Association of Geoscientists & Engineers. <https://doi.org/10.3997/2214-4609-pdb.330.88>
- Ferreira, P., Núñez, A., Rodríguez, M.A., 2002. Levantamiento geológico de la plancha 323, INGEOMINAS.
- Fisher, N.I., 1995. *Statistical Analysis of Circular Data*. Cambridge University Press, pp. 277.

- Gómez, E., Jordan, T. E., Allmendinger, R. W., Hegarty, K., y Kelley, S., 2005. Syntectonic Cenozoic sedimentation in the northern middle Magdalena Valley Basin of Colombia and implications for exhumation of the Northern Andes: Geological Society of America Bulletin, 17 (5-6): 547-569. <https://doi.org/10.1130/B25454.1>
- Guerriero, V., Mazzoli, S., Iannace, A., Vitale, S., Carravetta, A., Strauss, C., 2013. A permeability model for naturally fractured carbonate reservoirs. Marine and Petroleum Geology. 40, 115–134. [10.1016/j.marpetgeo.2012.11.002](https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2012.11.002)
- Khoshbakht, F., Azizzadeh, M., Memarian, H., Nourozi, G., Moallemi, S., 2012. Comparison of electrical image log with core in a fractured carbonate reservoir. J. Petrol. Sci. Eng. 86, 289–296. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2012.03.007>
- Larssen, K., Senger, K., Grundvåg, S. A., 2020. Fracture characterization in Upper Permian carbonates in Spitsbergen: A workflow from digital outcrop to geo-model. Marine and Petroleum Geology. 122. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2020.104703>
- Padilla, R., Toledo, R., 2013. Evaluación de yacimientos naturalmente fracturados y retos por resolver. Ingeniería petrolera, Vol. 53 No. 3, · ISSN 0185-3899.
- Panza, E., Agosta, F., Zambrano, M., Tondi, E., Prosser, G., Giorgioni, M., Janiseck, J. M., 2015. Structural architecture and Discrete Fracture Network modelling of layered fractured carbonates (Altamura Fm., Italy). Ital. J. Geosci., Vol. 134, No. 3, pp. 409-422. <https://doi.org/10.3301/IJG.2014.28>
- Priest, S.D., 1993. Discontinuity Analysis for Rock Engineering. Chapman & Hall, London, United Kingdom.
- Roehl, P.O., Choquette, P.W., 2012. Carbonate Petroleum Reservoirs. Springer Science & Business Media. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4612-5040-1>
- Spence, G. H., Couples, G. D., Bevan, T. G., Aguilera, R., Cosgrove, J. W., Daniel, J. M., and Redfern, J., 2014. Advances in the study of naturally fractured hydrocarbon reservoirs: a broad integrated interdisciplinary applied topic. Geological Society, London, Special Publications, 374, 1-22. <https://doi.org/10.1144/SP374.19>
- Stephenson, B.J., Koopman, A., Hillgartner, H., McQuillan, H., Bourne, S., Noad, J.J., Rawnsley, K., 2007. Structural and stratigraphic controls on fold-related fracturing in the Zagros Mountains, Iran: implications for reservoir development. <http://dx.doi.org/10.1144/GSL.SP.2007.270.01.01>
- Vo, M., Su, S., Lv, J., Xiao, C., 2020. Reservoir Modeling and Production History Matching in a Triassic Naturally Fractured Carbonate Reservoir in Sichuan, China. Improved Oil and Gas Recovery, vol 4. DOI: [10.14800/IOGR.1155](https://doi.org/10.14800/IOGR.1155)
- Watkins, H., Bond, C. E., Healy, D., and Butler, R.W.H., 2015. Appraisal of fracture sampling methods and new workflow to characterize heterogeneous fracture networks at outcrop. Journal of Structural Geology. 72, 67-82. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2015.02.001>