vol. 48, n.° 1, enero-abril de 2026
ISSN impreso: 0120-0283 • ISSN en línea: 2145-8553

Microtermometría de rocas carbonatadas de las formaciones Hondita y Loma Gorda, sector Cueva del Tigre, Municipio de Yaguará - Huila, Colombia

María Camila Quevedo-Villamil[1*]; Ingrid Natalia Muñoz-Quijano[1]; María Camila Lozano-Vivas[1]; Diego Germán Loaiza-García[2]

[1] Facultad de Ingeniería, Universidad Surcolombiana, Neiva, Colombia.
(*) maria.quevedo@usco.edu.co; ingrid.munoz@usco.edu.co; lozanocamila29@gmail.com
[2] Departamento de Ciencias Geológicas, Universidad de Caldas, Manizales, Colombia.
diego.loaiza@ucaldas.edu.co

Resumen

Las limitadas reservas petrolíferas de Colombia hacen imperativo potencializar cuencas productivas como la del Valle Superior del Magdalena. En la industria del petróleo, la temperatura de los fluidos es un parámetro clave para entender la madurez del sistema. Este estudio se enfoca en las rocas madre carbonatadas de las formaciones Hondita (Albiano medio-Turoniano inferior-medio) y Loma Gorda (Turoniano superior-Coniaciano) en el sector de Yaguará, Huila, caracterizando su historia térmica mediante microtermometría de inclusiones fluidas. Se encontraron diferencias claras entre ambas unidades: la Formación Hondita presenta un rango de temperaturas de homogenización (105,5-146,3 °C) y salinidades (promedio 23,1 %) que abarca una ventana de generación desde petróleo pesado a liviano. En contraste, la Formación Loma Gorda registra temperaturas consistentemente más altas (130,5-150,1 °C) y salinidades ligeramente menores (promedio 21,3 %), por lo que se sitúa en una ventana de madurez térmica superior que va desde petróleo mediano hasta la generación de gas húmedo y condensado. Estos datos reflejan que ambas unidades registran una fase diagenética tardía, caracterizada por la circulación de salmueras calientes durante el soterramiento profundo, pero con una inversión térmica debido al sistema de pliegues y cabalgamientos de la cuenca.

Palabras clave: Cretácico; Diagénesis; Inclusiones fluidas; Sistema petrolífero; Madurez térmica; Valle Superior del Magdalena.

Microthermometry of carbonate rocks from the Hondita and Loma Gorda formations, Cueva del Tigre sector, municipality of Yaguará– Huila, Colombia

Abstract

Given Colombia's limited oil reserves, it is imperative to enhance the productivity of basins such as the Upper Magdalena Valley. In the petroleum industry, fluid temperature is a key parameter for understanding the system's maturity. This study focuses on the carbonate source rocks of the Hondita (middle Albian - lower-middle Turonian) and Loma Gorda (upper Turonian-Coniacian) formations in the Yaguará sector, Huila, characterizing their thermal history through fluid inclusion microthermometry. Clear differences were found between both units: the Hondita Formation shows a range of homogenization temperatures (105,5-146,3 °C) and salinities (avg. 23,1 %), spanning a heavy

Forma de citar: Quevedo-Villamil, M.C.; Muñoz-Quijano, I.N.; Lozano-Vivas, M.C.; Loaiza-García, D.G. (2026). Microtermometría de rocas carbonatadas de las formaciones Hondita y Loma Gorda, sector Cueva del Tigre, Municipio de Yaguará - Huila, Colombia. *Boletín de Geología, 48*(1), 53-63. https://doi.org/10.18273/revbol.v48n1-2026003

to light oil generation window. In contrast, the Loma Gorda Formation records consistently higher temperatures (130,5-150,1 °C) and slightly lower salinities (avg. 21,3 %), placing it in a higher thermal maturity window ranging from medium oil to wet gas and condensate generation. These data reflect that both units record a late diagenetic phase, characterized by the circulation of hot brines during deep burial, but with a thermal inversion resulting from the basin's fold-and-thrust system.

Keywords: Cretaceous; Diagenesis; Fluid inclusions; Petroleum system; Thermal maturity; Upper Magdalena Valley.

Introducción

La cuenca del Valle Superior del Magdalena (VSM), en Colombia, es una cuenca intramontana de gran interés geológico y económico, debido a su probado potencial como sistema petrolífero. Su compleja evolución tectónica, resultado de la interacción de las cordilleras Central y Oriental, ha generado una prolífica secuencia sedimentaria, donde destacan las rocas del Cretácico superior. Específicamente, las formaciones Hondita y Loma Gorda son cruciales, ya que han sido identificadas como las principales rocas generadoras de hidrocarburos en la región (Cooper *et al*., 1995; Guerrero, 2002; Sarmiento-Rojas *et al*., 2006); además, han sido objeto de diversas investigaciones en los campos de geología, estratigrafía y petrografía (Patarroyo, 2011; Vargas-Cuervo *et al*., 2014; Gaona-Ramírez y Sánchez, 2018).

Desde el punto de vista cronoestratigráfico, la Formación Hondita es del Albiano medio al Turoniano inferior-medio (Patarroyo, 1993, 2011; Villamil *et al*., 1999), mientras que la Formación Loma Gorda abarca desde el Turoniano superior hasta el Coniaciano (Vergara-Streinesberger, 1994; Patarroyo y Dueñas, 2006). Ambas unidades se depositaron en un ambiente de plataforma marina somera que propició la acumulación de materia orgánica con un alto potencial generador, evidenciado por altos contenidos de carbono orgánico total (TOC) que pueden superar el 5 % y un querógeno de tipo II (Schamel, 1991; ANH, 2010). Este potencial es tan significativo que la Formación Loma Gorda ha sido evaluada incluso como un posible yacimiento no convencional (Montaño, 2015).

La evidencia de un sistema petrolífero activo no solo reside en la geoquímica de la roca madre, sino también en las numerosas manifestaciones de hidrocarburos en superficie, como rezumaderos y rocas impregnadas que afloran en la cuenca (Sarmiento y Rangel, 2004; Vargas-Cuervo *et al*., 2014; Mosquera-Quintero *et al*., 2016). Estos fenómenos demuestran una migración exitosa desde la roca generadora. De hecho, la historia de migración de hidrocarburos en la subcuenca de Neiva ha demostrado ser compleja, con la identificación de múltiples pulsos de migración ocurridos en un amplio rango de temperaturas, desde los 63 °C hasta más de 220 °C (Jiménez-Díaz, 2024).

Durante su soterramiento profundo, las rocas generadoras de la subcuenca Neiva son modificadas por eventos diagenéticos tardíos. Fluidos calientes y químicamente activos circulan por la roca, lo cual causa la disolución de componentes inestables y el fracturamiento tectónico, lo que crea porosidad secundaria (Longman, 1980; Moore y Wade, 2013). Estos nuevos poros y fracturas son posteriormente sellados por la precipitación de cementos minerales, principalmente calcita y dolomita. Es durante el crecimiento de estos cristales de cemento tardío cuando porciones de los fluidos de la cuenca (salmueras, hidrocarburos) quedan atrapadas herméticamente y forman inclusiones fluidas (IFs). Por lo tanto, su análisis se convierte en un registro directo de las condiciones de temperatura y composición de los fluidos durante las etapas clave de la generación y migración del petróleo (Roedder, 1984; Goldstein y Reynolds, 1994).

Esta complejidad en la migración resalta la importancia de entender la historia térmica de la roca generadora. Para reconstruir estos procesos, la microtermometría de inclusiones fluidas es una herramienta fundamental que permite determinar la temperatura y salinidad del fluido en el momento de su captura (Castaño-Dávila *et al*., 2019) y procesos diagenéticos posteriores. Dicha técnica ya ha sido aplicada para reconstruir la evolución termal en diferentes sectores de la cuenca (Castaño-Dávila *et al*., 2019; Gómez-Ramírez *et al*., 2022; Quevedo-Villamil *et al*., 2023; Jiménez-Díaz, 2024).

Bajo este contexto, el presente estudio se enfoca en el análisis microtermométrico de las formaciones Hondita y Loma Gorda, en el sector de la Cueva del Tigre (Yaguará, Huila). El objetivo principal es determinar la temperatura de homogeneización y salinidad de las inclusiones fluidas, con el fin de comprender la historia termal de estas unidades y establecer si alcanzaron la ventana de generación de hidrocarburos, para contribuir al entendimiento del sistema petrolífero del Valle Superior del Magdalena (VSM).

Localización y entorno geológico

El área de estudio se sitúa en la subcuenca de Neiva, perteneciente a la Cuenca del Valle Superior del Magdalena (VSM). Específicamente, se ubica en el sector de la Cueva del Tigre, municipio de Yaguará (Huila). La geología de esta zona, que incluye las unidades de interés y sus relaciones de contacto, se detalla en la plancha 345 del Servicio Geológico Colombiano (SGC) (Morales *et al*., 2001), cuya cartografía se presenta en la Figura 1.

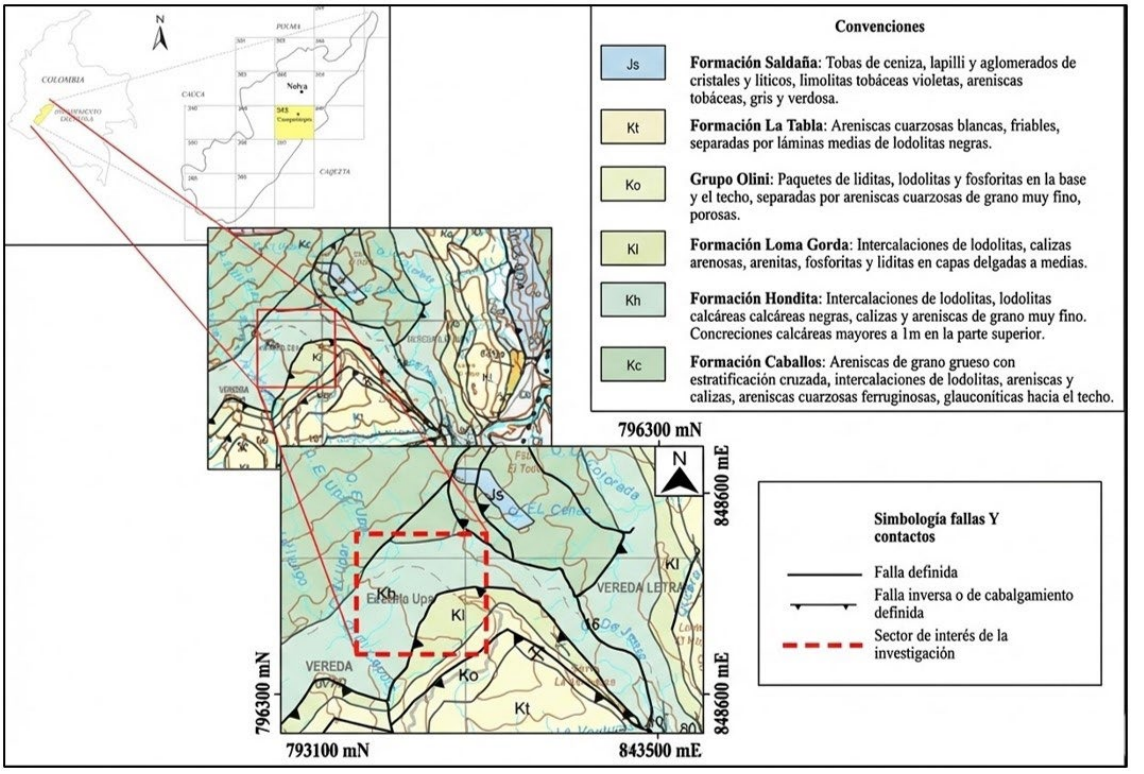

Figura 1. Mapa geológico del área de estudio en el municipio de Yaguará (Huila); se muestran las unidades geológicas, sus contactos y la zona de muestreo (recuadro punteado). Modificado de Morales *et al*. (2001).

La descripción estratigráfica de la Formación Hondita en el área se basa en el trabajo de Morales *et al*. (2001). En dicho estudio, la sección de la formación fue dividida en cuatro segmentos de base a techo. El primer segmento consiste en intercalaciones de lutita negra con capas de micrita en el tope. El segundo segmento presenta una interestratificación de lutita con capas delgadas de micrita, las cuales están en contacto con el tercer segmento, dominado por lutita con intercalaciones de limolita. Por último, el segmento cuatro se encuentra mayormente cubierto y no aflora en su totalidad; se infiere que está compuesto por niveles de lutita similares al segmento anterior, aunque se observan dos capas visibles de calcarenita.

La descripción litológica de la Formación Loma Gorda en el área de estudio también se basa en el trabajo de Morales *et al*. (2001). En dicho estudio, la sección de la formación fue dividida en dos segmentos. El primer segmento, en la base, está conformado por caliza micrítica, bioesparítica e intramicrítica. El segundo segmento, hacia el tope, consiste en intercalaciones de lutita con capas delgadas de micrita.

Metodología

En el estudio de las inclusiones fluidas en la zona de investigación, se llevó a cabo inicialmente una exhaustiva labor de campo y la selección de muestras de mano. Se recolectaron 10 muestras de mano durante la fase de campo. A partir de estas, se prepararon 10 secciones gruesas doblemente pulidas (100-120 µm) para el análisis petrográfico y microtermométrico.

El análisis microtermométrico se realizó en un microscopio especializado Zeiss Axio Scope A1, equipado con una platina de calentamiento-enfriamiento Linkam y controlador PE95/T95. Antes de describir el procedimiento, se definen las temperaturas de cambio de fase medidas, siguiendo la terminología estándar (Roedder, 1984; Bodnar, 1993; Goldstein y Reynolds, 1994):

- Temperatura eutéctica (Te): es la temperatura de primera fusión observada durante el calentamiento de una inclusión congelada. Ofrece una indicación cualitativa del sistema de sales dominante en el fluido.
- Temperatura de fusión final del hielo (Tm): es la temperatura a la que el último cristal de hielo se derrite por completo. Se utiliza para calcular la salinidad de la inclusión.
- Temperatura de homogenización (Th): es la temperatura a la que la inclusión vuelve a una fase homogénea (en este caso, líquida). Representa la temperatura mínima de entrampamiento del fluido.

El procedimiento analítico, inicialmente, consistió en enfriar cada inclusión a aproximadamente –120 °C para asegurar su congelación total. Posteriormente, se realizó un calentamiento lento y controlado para observar y registrar sistemáticamente la Te y la Tm. Finalmente, las inclusiones fueron calentadas hasta alcanzar la Th.

Para el procesamiento de los datos, y al no disponer de un análisis composicional directo (p. ej., espectroscopía Raman), se procedió a calcular la salinidad utilizando el sistema de referencia H_2O-NaCl. Este es un procedimiento estándar para obtener una salinidad aparente o equivalente (% en peso de NaCl eq.), la cual permite cuantificar y comparar el contenido total de sales disueltas de manera consistente, incluso si la composición real del fluido es más compleja. Para ello, se utilizó el programa AQSO3 (Bakker, 2003), que aplica las ecuaciones de estado para dicho sistema a partir de los valores de Tm obtenidos. El equipo fue calibrado utilizando estándares sintéticos, y presenta una precisión (margen de error) de ±0,2 °C para las mediciones de baja temperatura (Tm) y de ±1 °C para las de alta temperatura (Th).

Resultados obtenidos

Petrografía

Las muestras de rocas carbonatadas de las formaciones Hondita y Loma Gorda se recolectaron a partir de la sección estratigráfica descrita en el área de estudio por Mann y Stein (1997) y Gaona-Ramírez y Sánchez (2018). A continuación, se presenta una breve caracterización petrográfica macroscópica con el fin de contextualizar las muestras seleccionadas para el análisis microtermométrico.

Para la Formación Hondita, la petrografía reveló que el 62 % de las muestras corresponden a wackstone grisáceos; el 25 %, a packstone rojizos, y el 13 %, a mudstone. Se identificaron porosidades primarias (intrapartícula e interpartícula) y secundarias (móldica y de fractura). En la Formación Loma Gorda, las muestras se clasificaron como 50 % wackstone y 50 % mudstone, según Dunham (1962); se identificaron también porosidades primarias y secundarias (Figura 2).

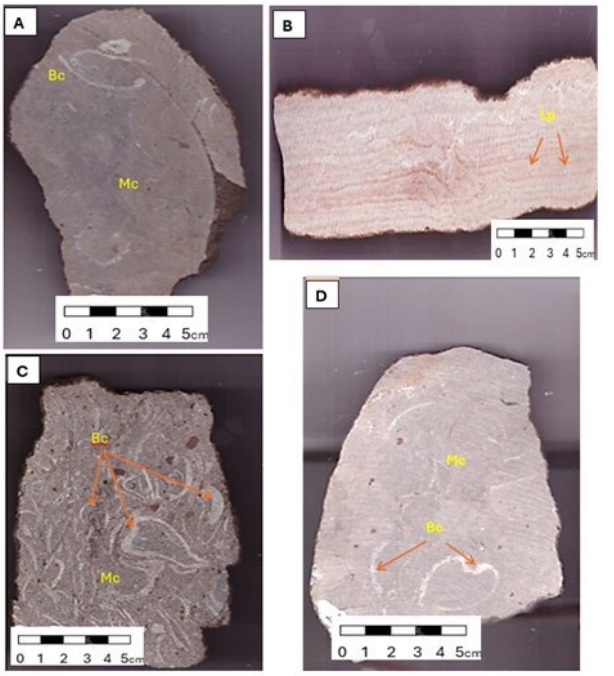

Figura 2. Aspecto macroscópico de las litologías carbonatadas estudiadas de muestras representativas, clasificadas según Dunham (1962). Formación Hondita: **A.** Wackstone con bioclastos (Bc) soportados por matriz micrítica (Mc). **B.** Mudstone con estructura de laminación paralela. **C.** Packstone caracterizado por su alta concentración de bioclastos (Bc). Formación Loma Gorda. **D.** Wackstone con bioclastos (Bc) flotantes en la matriz micrítica (Mc).

Clasificación de las inclusiones fluidas

Las inclusiones fluidas (IFs) analizadas se encontraron hospedadas en cristales de cemento de calcita tardía. Este cemento se observa petrográficamente rellenando porosidad secundaria (móldica) y fracturas que cortan los componentes originales de la roca. En general, las IFs son de tamaño pequeño, con un rango observado de aproximadamente 5 a 15 µm en su eje más largo.

Las inclusiones fluidas se clasificaron inicialmente con base en su morfología, siguiendo los criterios estándar establecidos por Roedder (1984) y Goldstein y Reynolds (1994). Predominan las morfologías irregulares (50 %), seguidas por las ovoides (30 %), tabulares (15 %) y regulares (5 %) (Figura 3).

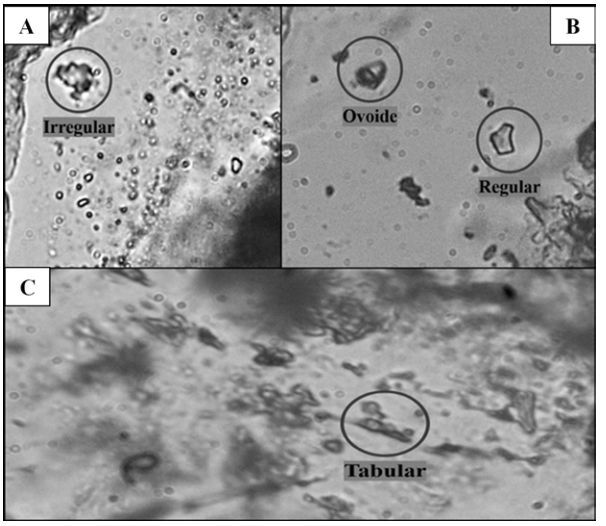

Figura 3. Morfologías presentes en las inclusiones fluidas de estudio. **A.** Irregulares. **B.** Ovoides y regulares. **C.** Tabulares. Reconocidas de acuerdo con la clasificación de Roedder (1984) y Goldstein y Reynolds (1994).

A partir de la clasificación de las inclusiones en función de sus fases, de acuerdo con Nash y Theodore (1971), se identificaron inclusiones bifásicas (líquido + vapor) tipo L, compuestas por una fase líquida acuosa dominante y una pequeña burbuja de vapor (Figura 4). La fase de vapor ocupa consistentemente un bajo porcentaje del volumen total de la inclusión, estimado visualmente en un rango de aproximadamente 5 % a 10 %, lo que es característico del entrampamiento de un fluido homogéneo líquido.

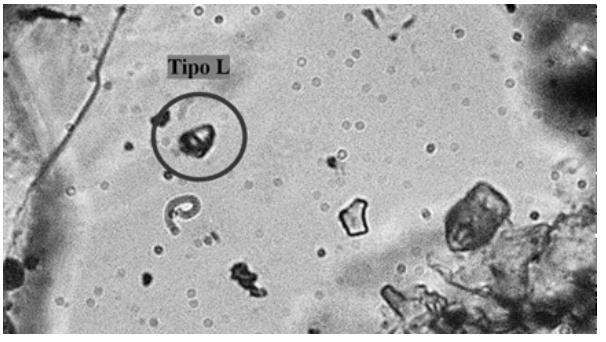

Figura 4. Inclusión fluida tipo L (bifásica) presentes en la zona de estudio.

Finalmente, las inclusiones fluidas se reconocieron según su origen, de acuerdo con la clasificación de Roedder (1984), en relación con el crecimiento de los cristales de cemento de calcita diagenética que las hospedan. Se identificaron inclusiones primarias y pseudosecundarias, dentro de los cristales de cemento precipitado en los poros y fracturas (Figura 5). La presencia de estas poblaciones de inclusiones confirma que los fluidos analizados están directamente asociados a los procesos diagenéticos tardíos que afectaron a la roca.

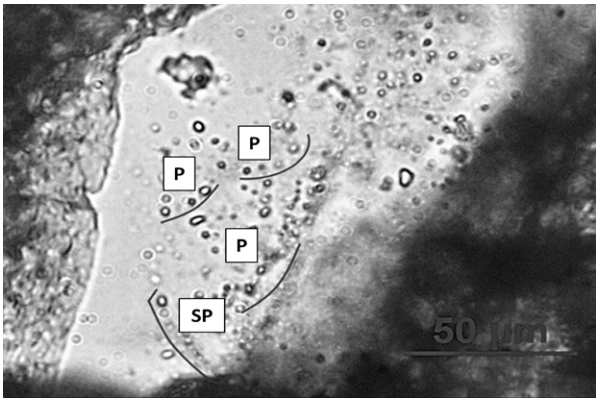

Figura 5. Inclusiones fluidas (P) primarias y (PS) pseudosecundarias presentes en la zona de estudio. De acuerdo con la clasificación de Roedder (1984).

Microtermometría de las inclusiones fluidas

Siguiendo los principios descritos en los métodos, se realizaron 77 mediciones microtermométricas en inclusiones fluidas previamente descritas y clasificadas de las formaciones Hondita (42 mediciones) y Loma Gorda (35 mediciones). Se midieron sistemáticamente las temperaturas de homogenización (Th), eutéctica (Te) y de fusión final del hielo (Tm). Los resultados obtenidos para cada formación se resumen en las Tablas 1 y 2.

Tabla 1. Datos microtermométricos principales de las IFs de la Formación Hondita.

Fase		Th°C	Te°C	Tm°C
Hondita	Mín.	105,50	−59,00	−22,60
	Prom.	130,19	−54,40	−21,29
	Máx.	146,30	−50,30	−18,80
	Moda	131,90	−52,40	−22,00

Tabla 2. Datos microtermométricos principales de las IFs de la Formación Loma Gorda.

Fase		Th°C	Te°C	Tm°C
Loma Gorda	Mín.	130,50	−55,50	−20,50
	Prom.	143,52	−50,69	−18,49
	Máx.	150,10	−44,60	−17,00
	Moda	147,00	#N/D	−17,00

Para la Formación Hondita, los rangos de temperatura de homogenización (Th) se encontraron entre 105,5 °C y 146,3 °C, con un promedio de 130,2 °C.

Las temperaturas de fusión final del hielo (Tm) para esta misma unidad variaron de –18,8 °C a –22,6 °C, promediando –21,3 °C. La temperatura eutéctica (Te) presentó un rango entre –59,0 °C y –50,3 °C, con un promedio de –54,4 °C.

En cuanto a la Formación Loma Gorda, las mediciones de Th estuvieron entre 130,5 °C y 150,1 °C, con un valor promedio de 143,5 °C. El rango de Tm fue de –17,0 °C a –20,5 °C (promedio de –18,5 °C). Adicionalmente, las temperaturas eutécticas (Te) para esta formación se midieron entre –55,5 °C y –44,6 °C, con un promedio de –50,7 °C.

El histograma de temperaturas de homogenización (Th) para la Formación Hondita (Figura 6A) muestra una distribución unimodal y asimétrica en un rango de 105,5 °C a 146,3 °C. La moda principal de la población de datos se concentra en el intervalo de 130 °C a 140 °C, con una desviación estándar de 11,8 °C. Los valores con menor frecuencia, especialmente aquellos por debajo de 120 °C, se consideran parte de la dispersión natural de la población de fluidos atrapada.

Para la Formación Loma Gorda (Figura 6B), el histograma de Th también presenta una distribución unimodal y asimétrica, con valores en un rango más restringido de 130,5 °C a 150,1 °C. La moda principal se ubica claramente en el intervalo de 140 °C a 150 °C, y la población de datos tiene una desviación estándar de 6,3 °C. La distribución muestra una cola de datos menos frecuentes hacia las temperaturas más bajas, considerados parte de la dispersión estadística natural.

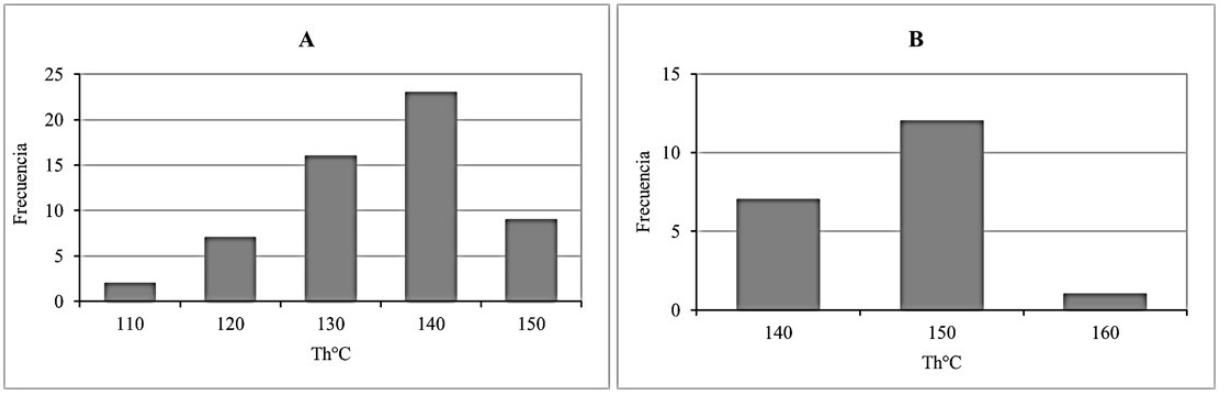

Figura 6. Histogramas de frecuencia de las temperaturas de homogenización (Th). **A.** Para la Formación Hondita, se observa una población principal de inclusiones fluidas con Th entre 128 °C y 135 °C. **B.** Para la Formación Loma Gorda, la población dominante de Th se agrupa en un rango más alto, entre 143 °C y 150 °C, lo cual sugiere condiciones de entrampamiento a mayor temperatura.

El histograma de temperaturas de fusión del hielo (Tm) para la Formación Hondita (Figura 7A) muestra una distribución unimodal y asimétrica en un rango de –18,8 °C a –22,6 °C. La población de datos presenta una desviación estándar de 1,4 °C; la moda principal está claramente concentrada alrededor de los –22 °C. Los valores menos frecuentes, como los cercanos a –18 °C, se interpretan como parte de la dispersión natural de la población de fluidos atrapada.

Es fundamental comparar esta dispersión geológica con el error instrumental. El margen de error del equipo (±0,2 °C) es significativamente menor que la desviación estándar observada (1,4 °C), lo cual demuestra que la variabilidad en los datos de Tm es una característica geoquímica real de los fluidos atrapados y no un artefacto de la medición.

Dado que la distribución es unimodal (presenta un solo pico, como se observa en la Figura 7A), los valores menos frecuentes, como aquellos en la cola de la distribución (cercanos a –18 °C), no se consideran atípicos ni errores, según los criterios estándar (p. ej., Goldstein y Reynolds, 1994).

Para la Formación Loma Gorda (Figura 7B), el histograma de Tm también presenta una distribución asimétrica, con valores en un rango de –17,0 °C a –20,5 °C. La moda principal se ubica alrededor de los –17 °C, y la población de datos tiene una desviación estándar de 1,2 °C. Los valores con menor frecuencia se consideran parte de la dispersión estadística natural de los datos.

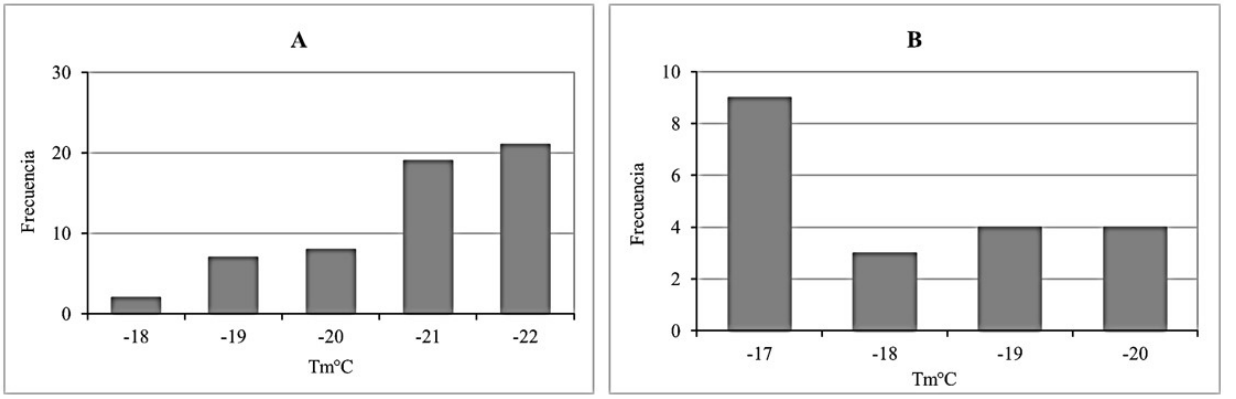

Figura 7. Histogramas de frecuencia de las temperaturas de fusión final del hielo (Tm). **A.** Para la Formación Hondita, la población principal de datos se concentra en un rango de Tm bajo (entre –21 °C y –22,6 °C). **B.** Para la Formación Loma Gorda, la moda de Tm se desplaza hacia valores más altos (entre −17 °C y −19 °C).

Salinidad y temperatura de fusión del hielo (Tm)

Los resultados del cálculo de la salinidad se resumen en las Tablas 3 y 4. Los datos se obtuvieron con el programa AQSO3 (Bakker, 2003), asumiendo un sistema binario H_2O-NaCl para los fluidos atrapados.

Se debe señalar que las temperaturas eutécticas (Te) registradas son significativamente más bajas que la del sistema puro H_2O-NaCl (–21,2 °C). Estos valores sugieren la probable presencia de otras sales disueltas en el fluido, como cloruro de calcio ($CaCl_2$), lo cual indica un sistema de salmueras más complejo.

No obstante, dado que no se contó con un análisis composicional directo (p. ej., espectroscopía Raman) para identificar de forma inequívoca todas las especies iónicas, se procedió a calcular la salinidad asumiendo un sistema binario H_2O-NaCl. Este es un procedimiento estándar y ampliamente aceptado en la literatura para obtener una salinidad aparente o equivalente (% en peso de NaCl eq.), la cual permite cuantificar y comparar el contenido total de sales disueltas de manera consistente.

Para la Formación Hondita, las temperaturas de fusión del hielo (Tm) se registraron en un rango de –22,6 °C a –18,8 °C, con un valor promedio de –21,3 °C (± 1,4 °C). Estos valores de Tm corresponden a un rango de salinidad de 21,5 % a 24,1 %, con un promedio de 23,1 % en peso de NaCl equivalente (± 1,1 %).

En el caso de la Formación Loma Gorda, el rango de Tm fue de –20,5 °C a –17,0 °C, con un promedio de –18,5 °C (± 1,2 °C). La salinidad calculada para esta formación varía entre 20,3 % y 22,7 %, con un valor promedio de 21,3 % en peso de NaCl (± 1,0 %).

Tabla 3. Resultados cálculos de salinidad de la Formación Hondita.

Fase		Salinidad NaCl eq. wt%
Hondita	Mín.	21,65
	Prom.	23,41
	Máx.	24,30
	Moda	23,90

Tabla 4. Resultados cálculos de salinidad de la Formación Loma Gorda.

Fase		Salinidad NaCl eq. wt%
Loma Gorda	Mín.	20,27
	Prom.	21,40
	Máx.	22,88
	Moda	20,27

La relación entre la temperatura de homogenización (Th) y la salinidad calculada para cada inclusión fluida se presenta en la Figura 8. En el gráfico se observan dos agrupaciones de datos distintas. Los datos de la Formación Hondita se distribuyen en un rango de Th de 105,5 °C a 146,3 °C y salinidades de 21,5 % a 24,1 % en peso de NaCl eq. Por su parte, los datos de la Formación Loma Gorda se agrupan en un rango de Th superior, de 130,5 °C a 150,1 °C, y un rango de salinidad ligeramente inferior, de 20,3 % a 22,7 %.

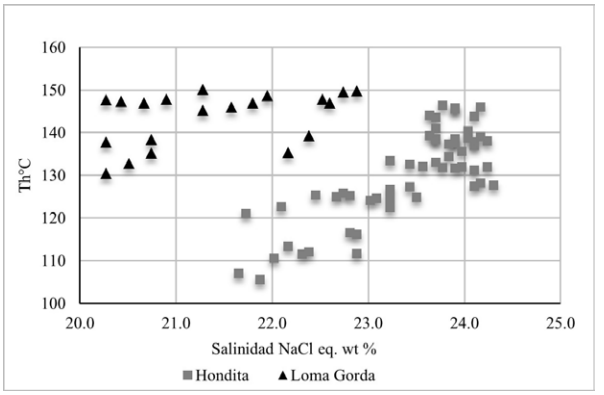

Figura 8. Diagrama de salinidad vs. temperatura de homogenización (Th) para las inclusiones fluidas de las formaciones Hondita (cuadrados) y Loma Gorda (triángulos). Se muestra la distribución y separación de ambas poblaciones de datos.

Discusión de resultados

Los resultados microtermétricos de este estudio revelan una historia diagenética compleja para las rocas carbonatadas de las formaciones Hondita y Loma Gorda, en el sector de la Cueva del Tigre. Los datos de temperatura de homogenización (Th) y salinidad no reflejan las condiciones del ambiente deposicional original, sino las de fluidos que circularon a través de las rocas durante su enterramiento profundo.

La presencia de una fauna marina diversa, evidenciada por los bioclastos observados, corresponde a un ambiente de depositación de salinidad marina normal (~3,5 %), tal como lo describe la literatura para este tipo de facies carbonatadas (Flügel, 2010). Sin embargo, las altas salinidades medidas en las inclusiones fluidas (20,3 % a 24,1 % eq. wt. NaCl) indican que las inclusiones no atraparon el agua de mar original, sino fluidos diagenéticos tardíos (salmueras de cuenca) que migraron a través de la roca mucho después de su litificación.

Estos resultados son consistentes con estudios recientes en la misma cuenca. Jiménez-Díaz (2024), analizando fluidos migrados en rocas reservorio, reportó poblaciones de salmueras de hasta 23,4 % eq. wt. NaCl. Dicho autor atribuye estas altas concentraciones de sal a la interacción de las aguas de formación con rocas evaporíticas jurásicas (Formación Saldaña) durante su evolución diagenética. Por lo tanto, con base en los estudios de Jiménez-Díaz (2024), se infiere que los fluidos representan aguas de formación que se enriquecieron en sales disueltas durante la diagénesis profunda, un proceso común en cuencas sedimentarias.

La temperatura eutéctica promedio de –50,7 °C en la Formación Loma Gorda refuerza esta idea, sugiriendo la presencia de iones como Ca^{2+}, característicos de salmueras evolucionadas.

Las temperaturas de homogenización indican las temperaturas mínimas de entrampamiento de estos fluidos. La Formación Loma Gorda presenta temperaturas sistemáticamente más altas (promedio de 143,5 °C) que la Formación Hondita (promedio de 130,2 °C). Esto podría implicar que los fluidos atrapados en Loma Gorda fueron entrampados a mayor profundidad de soterramiento o durante un pulso térmico de mayor intensidad. La mayor variabilidad en los datos de Th de la Formación Hondita (rango de 40,8 °C) podría sugerir un historial de entrampamiento más prolongado o complejo en comparación con la Formación Loma Gorda (rango de 19,6 °C).

Los datos revelan una inversión térmica significativa. Este patrón descarta un modelo de calentamiento simple por soterramiento, en su lugar, son una evidencia clara de un transporte de calor advectivo, donde pulsos de fluidos calientes migraron a través de la roca. Esta hipótesis es geológicamente coherente con el complejo historial tectónico de la cuenca, marcado por pliegues y cabalgamientos. Esta interpretación se alinea con modelos bien establecidos en cuencas tectónicamente activas (Oliver, 1986), donde los sistemas de fallas de cabalgamiento actúan como conductos para la migración vertical de salmueras calientes desde zonas profundas. Mecanismos como el de “válvula de falla” (Sibson, 1992) explican cómo estos pulsos de fluido pueden ser liberados bruscamente, causando anomalías térmicas e inversiones como la observada en este estudio.

Estas temperaturas de entrampamiento tienen una implicación directa en el estado de madurez térmica de las rocas. Al comparar los rangos de Th con el diagrama de generación de hidrocarburos propuesto por Tissot *et al*. (1974) (Figura 9), se puede inferir el estado del sistema petrolífero. Los fluidos en la Formación Hondita (105,5 °C a 146,3 °C) fueron atrapados a lo largo de una amplia ventana de maduración, desde la generación de petróleo pesado hasta liviano. Por su parte, la Formación Loma Gorda (130,5 °C a 150,1 °C) registra un evento más acotado en la ventana de petróleo mediano a liviano e incluso gas húmedo y condensado. El entrampamiento de estas inclusiones ocurrió durante diversos procesos diagenéticos, como la cementación por calcita en fracturas y la creación de porosidad secundaria; esto evidencia la circulación de fluidos calientes durante la etapa de generación de hidrocarburos.

Con base en lo anterior, es posible afirmar que la formación con mayor potencial de generación de hidrocarburos, debido a su rango de temperaturas de homogenización, el cual amplía su ventana de generación, es la Formación Hondita.

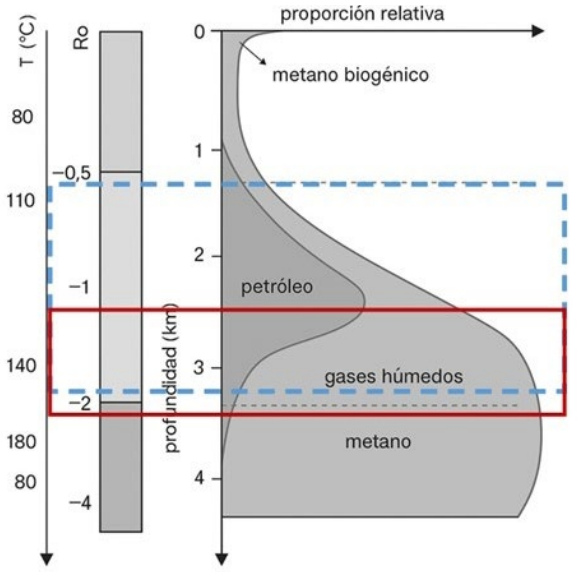

Figura 9. Condiciones de generación de petróleo y gas en función de la profundidad, relacionadas con las etapas de diagénesis, la reflectancia de la vitrinita (Ro) y la temperatura (T) de las formaciones Hondita (recuadro línea azul discontinua) y Loma Gorda (recuadro línea roja continua). Modificada de Tissot *et al*. (1974).

Conclusiones

Las inclusiones fluidas analizadas en las rocas carbonatadas de las formaciones Hondita y Loma Gorda no representan el agua de mar original, sino salmueras de cuenca (aguas de formación) con altas salinidades (entre 20,3 % y 24,1 % eq. wt. NaCl), atrapadas durante la diagénesis profunda.

Las temperaturas mínimas de entrampamiento de estos fluidos, dadas por la temperatura de homogenización, oscilan entre 105,5 °C y 150,1 °C, lo cual indica que la circulación de estas salmueras ocurrió en condiciones de soterramiento profundo, marcado por una inversión térmica en donde la Formación Loma Gorda (unidad suprayacente) registra temperaturas (promedio 143,5 °C) sistemáticamente más altas que la Formación Hondita (infrayaciente, promedio 130,2 °C). Esto descarta un modelo de calentamiento por gradiente geotérmico simple, y se interpreta como el resultado de un transporte de calor advectivo, ligado a la migración de pulsos de salmueras calientes a través del sistema de pliegues y cabalgamientos de la cuenca.

Las temperaturas de homogenización sitúan el entrampamiento de los fluidos dentro de la ventana de generación de petróleo. La Formación Hondita registra un rango más amplio (petróleo pesado a liviano), mientras que la Formación Loma Gorda se enmarca en la ventana de petróleo mediano a liviano e incluso gas húmedo y condensado, por lo que refleja diferentes momentos de la historia de maduración térmica de la cuenca.

Agradecimientos

Para la realización de este trabajo de investigación se contó con la financiación de la convocatoria interna PTG01 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° 3310. Se contó con el apoyo constante del semillero de investigación GEODA, perteneciente al grupo de investigación GIPE en el programa de ingeniería de petróleos. Así mismo, un especial agradecimiento a todo el personal del laboratorio de Microtermometría de la Universidad de Caldas, por abrirnos sus puertas para la realización de los análisis de esta investigación. De igual forma, se agradece a los revisores anónimos por sus aportes y debidas correcciones que llegase a tener este artículo. Los autores declaran el uso de una herramienta de inteligencia artificial (IA) generativa para asistir en la mejora del lenguaje y la redacción del manuscrito; sin embargo, se revisó y editó críticamente todo el contenido para ser validado, por lo cual se asume la total responsabilidad por el trabajo final.

Referencias

ANH (2010). Ronda Colombia 2010. Cuenca Valle Superior del Magdalena. Agencia Nacional de Hidrocarburos, Bogotá.

Bakker, R.J. (2003). Package FLUIDS 1. Computer programs for analysis of fluid inclusion data and for modelling bulk fluid properties. *Chemical Geology*, *194*(1-3), 3-23. https://doi.org/10.1016/S0009-2541(02)00268-1

Bodnar, R.J. (1993). Revised equation and table for determining the freezing point depression of H_2O-NaCl solutions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, *57*(3), 683-684. https://doi.org/10.1016/0016-7037(93)90378-A

Castaño-Dávila, D.L.; Hernández-González, J.S.; Molano-Mendoza, J.C.; Rodríguez-Vargas, A.I. (2019). Mineralogía y microtermometría de inclusiones fluidas de la veta con mineralización

Au-Ag de la mina La Aurora en la parte norte del Distrito Minero Zaragoza-Segovia-Remedios (DMZSR), Colombia. *Boletín de Geología, 41*(3), 107-125. https://doi.org/10.18273/revbol.v41n3-2019005

Cooper, M.A.; Addison, F.T.; Álvarez, R.; Coral, M.; Graham, R.H.; Hayward, A.B.; Howe, S.; Martínez, J.; Naar, J.; Peñas, R.; Pulham, A.J.; Taborda, A. (1995). Basin development and tectonic history of the Llanos Basin, Eastern Cordillera, and Middle Magdalena Valley, Colombia. *AAPG Bulletin*, *79*(10), 1421-1442. https://doi.org/10.1306/7834D9F4-1721-11D7-8645000102C1865D

Dunham, R.J. (1962). Classification of carbonate rocks according to depositional textures. In: W.E. Ham (ed.). *Classification of Carbonate Rocks — A Symposium* (pp. 108-121). AAPG Memoir.

Flügel, E. (2010). *Microfacies of Carbonate Rocks Analysis, Interpretation and Application.* Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-03796-2

Gaona-Ramírez, J.; Sánchez, I. (2018). Caracterización diagenética y petrofísica de las rocas carbonatadas FMS. Hondita - Loma Gorda, sector Cueva del Tigre, municipio de Yaguará – Huila, con potencial para yacimientos de hidrocarburos. Tesis, Universidad Surcolombiana, Neiva, Huila.

Goldstein, R.H.; Reynolds, T.J. (1994). Systematics of fluid inclusions in diagenetic minerals. SEPM Short Course 31.

Gómez-Ramírez, J.M.; Muñoz-Quijano, I.N.; Loaiza-García, D.G. (2022). Microtermometría de rocas carbonatadas de las formaciones Hondita-Loma Gorda, sector vereda Bomboná, municipio de Palermo–Huila, Colombia. *Ingeniería y Región*, *27*, 24-34. https://doi.org/10.25054/22161325.3515

Guerrero, J. (2002). A proposal on the classification of systems tracts: Application to the Allostratigraphy and Sequence Stratigraphy of the Colombian Basin. Part 1: Berriasian to Hauterivian. *Geología Colombiana*, *27*, 3-25.

Jiménez-Díaz, S.D. (2024). Origen y migración de hidrocarburos presentes en arenitas bituminosas de las cuencas Valle Superior del Magdalena y Caguán Putumayo, Colombia. Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia, Colombia.

Longman, M.W. (1980). Carbonate diagenetic textures from nearsurface diagenetic environments. *AAPG Bulletin*, *64*(4), 461-487. https://doi.org/10.1306/2F918A63-16CE-11D7-8645000102C1865D

Mann, U.; Stein, R. (1997). Organic Facies Variations, Source Rock Potential, and Sea Level Changes in Cretaceous Black Shales of the Quebrada Ocal, Upper Magdalena Valley, Colombia. *Boletín AAPG, 81*(4), 556-576. https://doi.org/10.1306/522B43CF-1727-11D7-8645000102C1865D

Montaño, Q. (2015). Caracterización y análisis de la Formación Loma Gorda, aplicado a la evaluación del potencial como yacimiento no convencional de hidrocarburos, Huila, Valle Superior del Magdalena. Tesis, Universidad Nacional de Colombia, Colombia.

Moore, C.H.; Wade, W.J. (2013). *Carbonate Reservoirs: Porosity Evolution and Diagenesis in a Sequence Stratigraphic Framework*. 2nd Edition. Vol. 67. Elsevier. https://doi.org/10.1016/S0264-8172(03)00037-0

Morales, C.; Caicedo, J.; Velandia, F.; Núñez, T. (2001). Geología de la plancha 345, Campoalegre: Memoria explicativa. Instituto de Investigación e Información Geocientífica, Minero-Ambiental y Nuclear. Ingeominas.

Mosquera-Quintero, D.F.; Realpe-Rojas, J.E.; Dussan-Quintero, S.T. (2016). Caracterización geológica de los indicios superficiales de hidrocarburos en el sector norte y sur del departamento del Huila, zona Minus. Tesis de pregrado, Universidad Surcolombiana, Colombia.

Nash, J.T.; Theodore, T.G. (1971). Ore fluids in the porphyry copper deposit at Copper Canyon, Nevada. *Economic Geology*, *66*(3), 385-399. https://doi.org/10.2113/gsecongeo.66.3.385

Oliver, J. (1986). Fluids expelled tectonically from orogenic belts: Their role in hydrocarbon migration and other geologic phenomena. *Geology*, *14*(2), 99-102. https://doi.org/10.1130/0091-7613(1986)14<99:FETFOB>2.0.CO;2

Patarroyo, P. (1993). Las formaciones cretácicas Hondita y Loma Gorda a propósito de la nomenclatura estratigráfica del Valle Superior del Magdalena, Colombia. *VI Congreso Colombiano de Geología.* Medellín, Colombia.

Patarroyo, P.; Dueñas, H. (2006). Eulophoceras jacobi hourcq y palinomorfos asociados del Coniaciano temprano, Formación Loma Gorda, quebrada Bambucá (Aipe-Huila-Colombia, S.A.). *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, *30*(117), 503-510.

Patarroyo, P. (2011). Sucesión de amonitas del Cretácico Superior (Cenomaniano-Coniaciano) de la parte más alta de la Formación Hondita y de la Formación Loma Gorda en la quebrada Bambucá, Aipe-Huila (Colombia, S.A.). *Boletín de Geología*, *33*(1), 69-92.

Quevedo-Villamil, M.C.; Muñoz-Quijano, I.N.; Loaiza-García, D.G. (2023). Microtermometría de rocas carbonatadas de la Formación Loma Gorda, sector las Brisas, Huila, Colombia. *DYNA*, *90*(226), 163-169. https://doi.org/10.15446/dyna.v90n226.106661

Roedder, E. (1984). *Fluid Inclusions*. *Reviews in Mineralogy*. Vol. 12. Mineralogical Society of America.

Sarmiento, L.F.; Rangel, A. (2004). Petroleum systems of the upper Magdalena Valley, Colombia. *Marine and Petroleum Geology*, *21*(3), 373-391. https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2003.11.019

Sarmiento-Rojas, L.F.; Van Wess, J.D.; Cloetingh, S. (2006). Mesozoic transtensional basin history of the Eastern Cordillera, Colombian Andes: Inferences from tectonic models. *Journal of South American Earth Sciences*, *21*(4), 383-411. https://doi.org/10.1016/j.jsames.2006.07.003

Schamel, S. (1991). Middle and Upper Magdalena Basins, Colombia. En: K.T. Biddle (ed.). *Active Margin Basins* (pp. 283-301). AAPG Memoir 52. https://doi.org/10.1306/M52531C10

Sibson, R.H. (1992). Implications of fault-valve behaviour for rupture nucleation and recurrence. *Tectonophysics*, *211*(1-4), 283-293. https://doi.org/10.1016/0040-1951(92)90065-E

Tissot, B.; Durand, B.; Espitalié, J.; Combaz, A. (1974). Influence of the Nature and Diagenesis of Organic Matter in Formation of Petroleum. *AAPG Bulletin*, *58*(3), 499-506. https://doi.org/10.1306/83D91425-16C7-11D7-8645000102C1865D

Vargas-Cuervo, R.; Pérez-Badillo, C.A.; Díaz-Quimbaya, C.I. (2014). Levantamiento estratigráfico detallado para el miembro Shale de Bambucá en dos secciones de la subcuenca de Neiva. *Ingeniería y Región*, *12*, 59-67. https://doi.org/10.25054/22161325.731

Vergara-Streinesberger, L. (1994). Stratigraphic, micropaleontologic and organic geochemical relations in the Cretaceous of the upper Magdalena Valley, Colombia. Thesis, University of Giessen, Germany.

Villamil, T.; Arango, C.; Hay, W.W. (1999). Plate tectonic paleoceanographic hypothesis for Cretaceous source rocks and cherts of northern South America. En: E. Barrera, C.C. Johnson (eds.). *Evolution of the Cretaceous Ocean-Climate System* (pp. 191-202). Geological Society of America. https://doi.org/10.1130/0-8137-2332-9.191

Fecha de recibido: 07 de febrero de 2024
Fecha de aceptado: 22 de enero de 2026