



Revista EIA
ISSN 1794-1237
e-ISSN 2463-0950
Año XIX/ Volumen 22/ Edición N.43
Enero - junio 2025
Reia4301 pp. 1-32

Publicación científica semestral
Universidad EIA, Envigado, Colombia

PARA CITAR ESTE ARTÍCULO / TO REFERENCE THIS ARTICLE /

Silveira Moreno, G. B.; Rodríguez Lara, A. J.; Bermúdez Cella, M. A.; Alarcón Bonilla, A. F.; Mora Hernández, C. A. y Castillo Rodríguez, F. R.
Relación entre carga, migración, expulsión de hidrocarburos e historia termal en el sinclinal de Nunchía, Piedemonte de la Cordillera Oriental.

Revista EIA, 22(43), Reia4301
pp. 1-33.
<https://doi.org/10.24050/reia.v22i43.1844>

✉ *Autor de correspondencia:*

Bermúdez Cella, M. A.
Doctor en Ciencias de la Tierra
Correo electrónico:
mauricio.bermudez@uptc.edu.co

Recibido: 11-11-2024

Aceptado: 10-12-2024

Disponibile online: 01-01-2025

Relación entre carga, migración, expulsión de hidrocarburos e historia termal en el sinclinal de Nunchía, Piedemonte de la Cordillera Oriental.

GLEUBIS BELÉN SILVEIRA MORENO¹

ANA JAZMÍN RODRÍGUEZ LARA¹

✉ MAURICIO ALBERTO BERMÚDEZ CELLA¹

ANDRÉS FELIPE ALARCÓN BONILLA¹

CESAR AUGUSTO MORA HERNÁNDEZ²

FABIAN RAMIRO CASTILLO RODRÍGUEZ¹

1. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Colombia

2. Kuenka Asesorías Geológicas S.A.S., Colombia

Resumen

Los campos Cusiana, Cupiagua y Pauto-Floreña ubicados en el Piedemonte central de la parte oriental de la Cordillera Oriental de Colombia representan el 97% de la producción de gas húmedo del país. La presente investigación tiene como objetivo definir los momentos críticos en la generación y carga de hidrocarburos de la parte central del sinclinal de Nunchía, en inmediaciones del campo Cupiagua y relacionarlos con la historia termal de la zona de estudio derivada del modelamiento del sistema petrolífero 1D tradicional y del obtenido a partir de nuevas dataciones termocronológicas. Para ello, en base a una transecta estructural y la integración de datos geoquímicos, de pozos, termocronológicos y estructurales se procedió a evaluar los procesos de madurez térmica, generación y expulsión de hidrocarburos discriminando crudo y gas, en la zona del pozo Golconda-1, pseudopozo PSW Nunchía y el pozo Ramiriquí 1, a partir del modelamiento multi 1D de sistemas petrolíferos. Los resultados arrojaron un modelo de generación y expulsión desde la zona “hinterland” y “foothills”, con migración de hidrocarburos desde el oeste hacia el este. Este proceso de migración ocurrió durante el Mioceno tardío-Plioceno y fue interrumpido por la última fase de exhumación en el

Piedemonte llanero que terminó de configurar la geometría de trampas como las de Cusiana y Cupiagua. Debido al nivel de madurez térmica alcanzado, el cual se sitúa entre el final de la ventana de aceite e inicio de la ventana de gas, se entramparon hidrocarburos de tipo crudo liviano y gas húmedo con presencia tanto de gas natural como de Gas Licuado del Petróleo.

Palabras clave: Sistema petrolífero; Generación; Expulsión; Migración; Deformación; Trampas; Gas licuado del petróleo; Exhumación; Geoquímica; Madurez termal.

Relationship between load, migration, hydrocarbon expulsion and thermal history in the Nunchía syncline, Piedmont of the Eastern Cordillera

Abstract

The Cusiana, Cupiagua, and Pauto-Floreña fields, located in the central foothills of the eastern part of Colombia's Eastern Cordillera, represent 97% of the country's wet gas production. This research aims to define the critical moments in hydrocarbon generation and charging in the central part of the Nunchía syncline, near the Cupiagua field, and to relate them to the thermal history of the study area as derived from traditional 1D petroleum system modeling and from new thermochronological dating. For this purpose, based on a structural transect and the integration of geochemical, well, thermochronological and structural data, we evaluated the processes of thermal maturity, hydrocarbon generation, and expulsion, distinguishing between oil and gas, in the Golconda-1 well, the PSW Nunchía pseudo-well, and the Ramiriquí-1 well through multi-1D petroleum systems modeling. The results yielded a model of generation and expulsion from the "hinterland" and "foothills" area, with hydrocarbon migration from west to east. This migration process occurred during the Late Miocene-Pliocene and was interrupted by the last phase of exhumation in the Llanos foothills, which completed the configuration of traps such as those in Cusiana and Cupiagua. Due to the level of thermal maturity reached, situated between the end of the oil window and the beginning of the gas window, light crude and wet gas hydrocarbons were trapped, with the presence of both natural gas and liquefied petroleum gas.

Keywords: Petroleum system; Generation; Expulsion; Migration; Deformation; Traps; Liquefied petroleum gas; Exhumation; Geochemistry; Thermal maturity.

1. Introducción

Los campos Cusiana, Cupiagua y Pauto-Floreña, ubicados en el Piedemonte central de la parte oriental de la Cordillera Oriental de Colombia (Figura 1), presentan una producción de 459.630 millones de pies cúbicos de gas (MPC), representando el 97% de la producción de gas húmedo del país (UPTC-ANH, 2022). Aunque algunos estudios se han enfocado en descifrar el sistema petrolífero del Piedemonte oriental de la Cordillera Oriental y de la cuenca Llanos (Cazier, 1995; Cortés *et al.*, 2009; Sánchez *et al.*, 2015; Mora *et al.*, 2019; Sánchez *et al.*, 2021), hasta la fecha estos no han abordado la relación entre la evolución geológica y la generación y carga de gas húmedo en la zona empleando modelamiento termal 1D tradicional y modelamiento basado en termocronología de baja temperatura.

Diferentes autores han estudiado y actualizado el modelo del sistema petrolífero en el área del Piedemonte llanero (Cazier, 1995; Cortés *et al.*, 2009; Sánchez *et al.*, 2015; Mora *et al.*, 2019; Sánchez *et al.*, 2021). Dentro de los elementos analizados de este sistema en la zona considerada, se encuentran: (i) Caracterización de las rocas fuentes de petróleo: Formación Chipaque, Formación Los Cuervos y Formación Fómeque (García, 2008; Cortes, 2009; Sánchez *et al.*, 2015; García, 2015; Sánchez *et al.*, 2015; Rangel, 2017; Mora *et al.*, 2019; Sánchez *et al.*, 2021); (ii) Caracterización de la roca reservorio: Formación Guadalupe, Formación Barco, Formación Mirador, Formación Carbonera y Formación Une (Cazier, 1995; García, 2008; Sánchez *et al.*, 2015; García, 2015; Reyes-Harker *et al.*, 2015; Rangel, 2017; Mora *et al.*, 2019; Sánchez *et al.*, 2021) (iii) Análisis sobre la roca sello: Las lutitas de la Formación Carbonera y sus miembros pares, y la Formación León.

Dentro de los procesos que intervienen en el sistema petrolífero se enumeran los siguientes: (i) Generación: García (2008) identificó dos pulsos de generación de hidrocarburos en la cuenca. El primer pulso se formó en las facies distales con afinidad marina y carbonatada de la Formación Chipaque durante el Eoceno medio-Oligoceno. Estos fluidos migraron a través de las rocas del Cretácico superior hacia la zona de antepaís a distancias de hasta 300 km

(García, 2008; Cortés *et al.*, 2009; Sánchez *et al.*, 2015; Mora *et al.*, 2019; Sánchez *et al.*, 2021). El segundo pulso proviene de las facies continentales de la Formación Gachetá durante el Plioceno (García, 2008; Cortés, 2009). (ii) Migración: García (2008) propone dos mecanismos migratorios distintos: El primero, donde las cocinas de generación se ubicaron en la actual Cordillera Oriental y el petróleo migró lateralmente hacia las estructuras preandinas de la Cuenca Llanos a través de reservorios del Neo-cretácico. El segundo, es el intenso fracturamiento y fallamiento asociado a la deformación del Piedemonte, el cual permitió la migración vertical de los fluidos generados. (iii) Entrampamiento o “Acumulación”, o Carga: Según García (2008), la hipótesis de un primer evento preandino de carga supone que el petróleo se acumuló en reservorios poco profundos y dentro de estructuras formadas en los Llanos antes de la orogenia andina. El segundo evento de carga se concentró en la parte occidental de la región (Piedemonte y antefosas) y es responsable del mayor contenido de gas en los campos de esta zona.

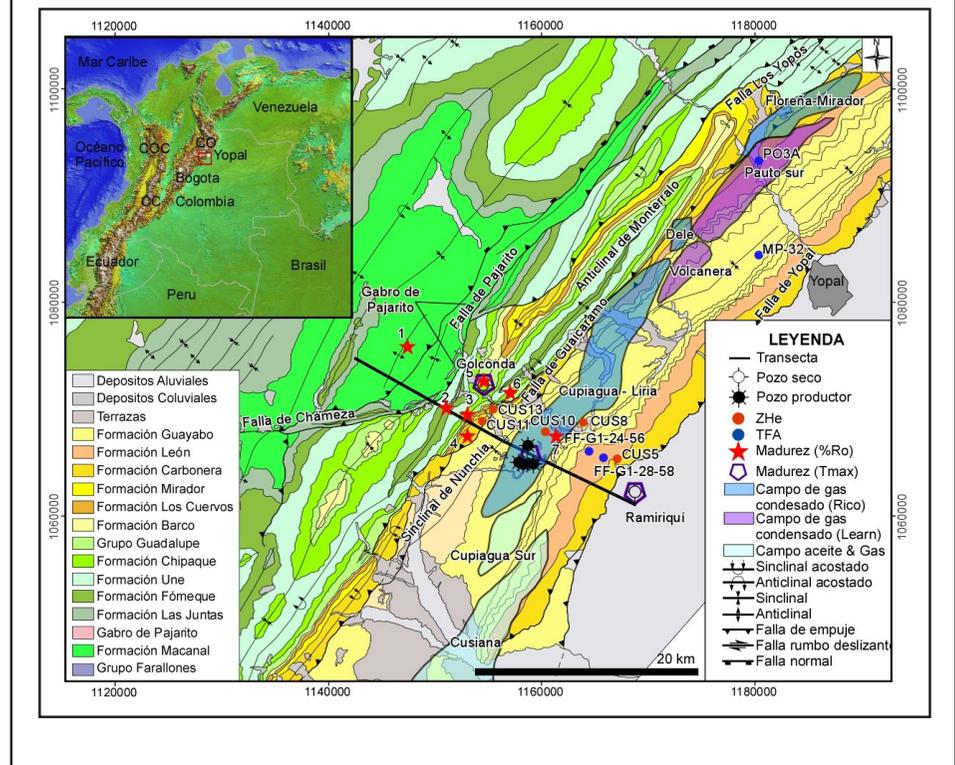
En la presente investigación, se combinan datos geoquímicos generados por distintos estudios financiados por la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH), modelos estructurales y modelización numérica tradicional 1D del sistema petrolífero, con el propósito de establecer la historia de enterramiento a lo largo de tres zonas: la zona “hinterland”, la zona “foothills” y la zona “foreland”. Existen pocos datos termocronológicos a lo largo del sinclinal de Nunchía (Ramírez-Arias *et al.*, 2012), y estos evidencian localmente que las formaciones Guayabo, León y Carbonera no alcanzaron una temperatura de soterramiento suficientemente profunda para resetear la información termocronológica. Por lo anterior, ha sido difícil emplear estas técnicas para relacionarlas con la evolución geológica de la zona de estudio. Por esto, los modelos de enterramiento realizados de forma tradicional para la zona “foothills” son comparados con modelos de historias termales derivados de nuevos datos de termocronología de baja temperatura, en particular se presentan nuevas edades obtenidas por el método (U-Th)/He en circón (Zhe). Esta comparación permite explicar la coincidencia espacial entre la presencia de gas húmedo y la historia termal para el sinclinal de Nunchía. Finalmente, este estudio tiene como objetivo

discriminar los momentos críticos en la generación de gas húmedo, relacionándolos con la historia termal del área de estudio.

2. Configuración geológica

El área de estudio se encuentra localizada en el Piedemonte Oriental de la Cordillera Oriental de Colombia, en cercanías a la ciudad de Yopal (Figura 1). La Cordillera Oriental es considerada un graben invertido durante el Oligoceno a la actualidad (Cooper *et al.*, 1995; Mora *et al.*, 2010; Tesón *et al.*, 2013; Horton *et al.*, 2020). Se han realizado estudios asociados a la configuración estructural, estratigrafía y el sistema petrolífero a medida que avanzaron la perforación de pozos y la adquisición de información sísmica 3D (por ejemplo, Cazier, 1995; Martínez, 2006, y referencias aquí). Estos estudios han demostrado que el Piedemonte Oriental de la Cordillera Oriental se desarrolló en un *rift shoulder* del Jurásico al Cretácico tardío debido a la inversión tectónica durante el Cenozoico (Sarmiento-Rojas *et al.*, 2006; Tesón *et al.*, 2013; Mora *et al.*, 2020). Tres fallas conforman el marco estructural del área de estudio: Chámeza-Pajarito, Guaicáramo y Cusiana-Yopal (Mora *et al.*, 2006; Tesón *et al.*, 2013).

Figura 1. Mapa geológico de la zona de estudio donde se presenta la ubicación de campos petrolíferos, pozos, muestras de trazas de fisión en apatitos (TFA) y (U-Th)/He en circón (ZHe), y distribución de madurez. Además, del trazo de la sección transversal utilizada para el modelamiento 1D. (Modificado de ICP, 2009).



Los cuatro eventos tectónicos que se presentaron en el área de estudio y controlaron la depositación y ambientes sedimentarios son: “pre-rift”, “syn-rift”, “post-rift” e inversión tectónica positiva (Figura 2). Depósitos “pre-rift”, los cuales corresponden a las cuarzoarenitas con intercalaciones de arcillolitas del Paleozoico de la Formación Farallones (Guerrero y Sarmiento, 1996; Guerrero 2002; Jaimes *et al.*, 2013). Los depósitos “Synrift” que están representados por las formaciones Macanal, Las Juntas y Fômeque. Estas formaciones están compuestas principalmente por arcillolitas y limolitas grisáceas, cuarzoarenitas con intercalaciones de arcillolitas y arcillolitas con intercalaciones de biomicritas y bioesparitas, respectivamente (Guerrero y Sarmiento, 1996; Guerrero, 2002). Localmente, estas rocas están intruidas por rocas básicas metamorfoseadas en el área de Pajarito (Perdomo y Murillo, 2007).

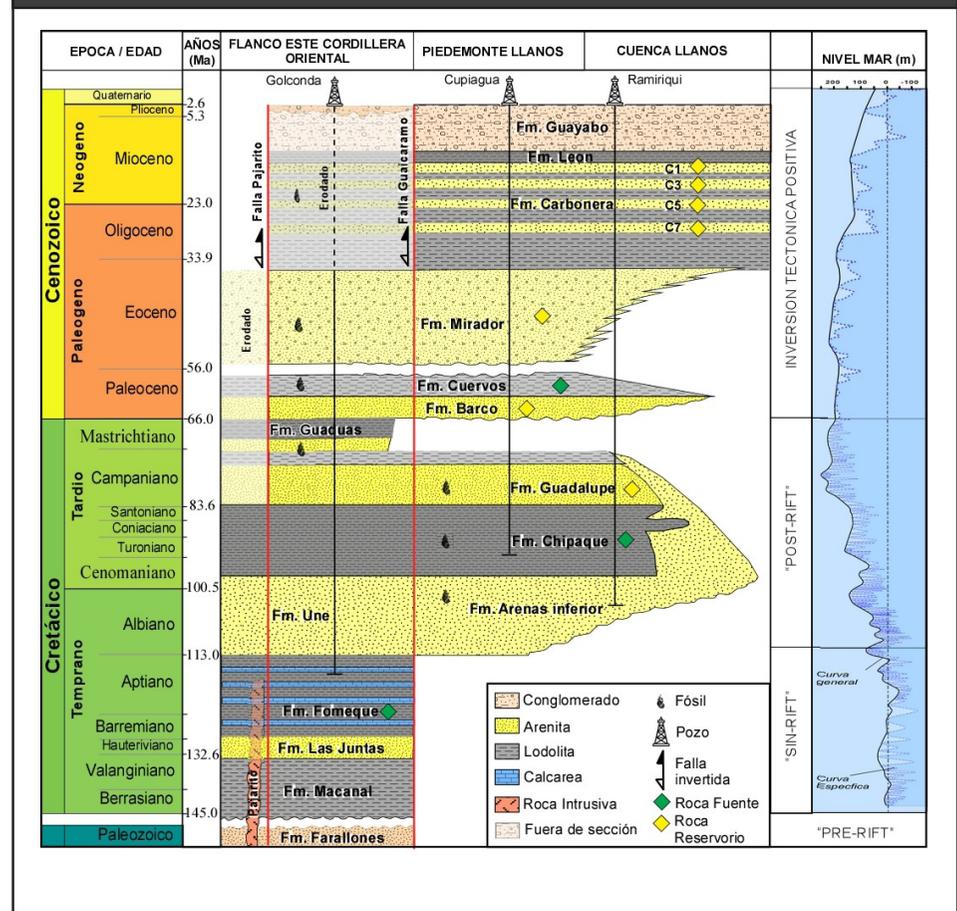
La secuencia “Postrift” inicia en el Albiano y se extiende hasta el Mastrichtiano, en donde se depositaron las formaciones Une, Chipaque, Guadalupe y Guaduas (Sarmiento-Rojas *et al.*, 2006). La Formación Une presenta cuarzoarenitas grises con intercalaciones de arena gruesa y capas delgadas de arcillolitas (Herngreen y Jimenez, 1990). Ascendiendo estratigráficamente, se encuentran lodolitas y limolitas con esporádicos lentes de arena fina con glauconita, bioturbación y restos fosfáticos en la denominada Formación Chipaque (Guerrero y Sarmiento, 1996). Suprayaciendo esta formación se encuentra la Formación Guadalupe, conformada por cuarzoarenitas fosfáticas de grano fino intercaladas con lodolitas, arcillolitas y liditas (Guerrero y Sarmiento, 1996; 2000). La última formación de la secuencia es la Formación Guaduas, la cual está compuesta por lodolitas grises con capas de carbón y cuarzoarenitas finas. Esta formación presenta una erosión hacia el este de la cuenca del Piedemonte (Guerrero y Sarmiento, 1996; 2000).

Sedimentos marinos someros a continentales durante el Cenozoico muestran la somerización de la cuenca y el registro del levantamiento de la Cordillera Oriental (Jaramillo *et al.*, 2011). Se inicia una inversión de la cuenca con sistemas que migran hacia el norte y este, durante el Paleoceno (formaciones Barco y Los Cuervos), hacia el oeste durante el Eoceno medio (Formación Mirador), hacia el este durante el Oligoceno (parte inferior de la Formación Carbonera) y hacia el este durante el Mioceno (Formación Guayabo) (Bayona *et al.*, 2007).

Se han identificado tres rocas generadoras en el Piedemonte Oriental: las formaciones Fómeque, Chipaque-Gachetá y Los Cuervos (Cazier, 1995; Ramón *et al.*, 2001; Cortés *et al.*, 2009; Sánchez *et al.*, 2015; García *et al.*, 2015; Rangel *et al.*, 2017; Mora *et al.*, 2019; Sánchez *et al.*, 2021). Se han probado con éxito tres yacimientos dentro de la zona (Cazier, 1995; Ramón y Fajardo, 2006; Sánchez *et al.*, 2015; García *et al.*, 2015). Primero, areniscas cuarzosas de la Formación Mirador depositadas en un ambiente fluvial a marino poco profundo durante el Eoceno (Ramón y Fajardo, 2006; Bayona *et al.*, 2008). En segundo lugar, areniscas cuarzosas gruesas de la Formación Barco, depositadas en un ambiente fluvial durante el Paleoceno (Ramón y Fajardo, 2006; Bayona *et al.*, 2007). En

tercer lugar, areniscas finas fosfáticas de la Formación Guadalupe depositadas en un ambiente marino poco profundo durante el Campaniano (Ramón y Fajardo, 2006; Bayona *et al.*, 2007).

Figura 2. Carta cronoestratigráfica a lo largo de la dirección del buzamiento del área de Cupiagua que muestra la estratigrafía a través del flanco oriental de la Cordillera Oriental hasta el antepaís de los Llanos. Ubicación en la Figura 1 Transecta. Compilado de Ulloa *et al.* (1981); Rodríguez y Solano (2000); Guerrero *et al.* (2000); Guerrero (2002); Jaramillo (2002); Jaramillo *et al.* (2005); Dueñas y Césari (2006); Jaramillo *et al.* (2011); Jaimes *et al.* (2013); Caballero *et al.* (2020). Distribución facial Compilado de Reyes-Harker *et al.* (2015) y Horton *et al.* (2020). Curvas del nivel del mar de Rowley y Markwick (1992) y Fulthorpe *et al.* (2011).



3. Materiales y métodos

3.1 Compilación de datos termocronológicos en el área

Un total de cuatro edades termocronológicas al interior del sinclinal de Nunchía fueron obtenidas por el método de trazas de fisión en apatitos (TFA) por Ramírez-Arias *et al.* (2012) (Figura 1). Sistemáticamente, las edades termocronológicas reportadas en

la Tabla 1 son mayores que la edad estratigráfica, lo que indicaría que la formación sedimentaria no se ha reajustado después de la depositación, o quizás sólo ligeramente, de esta forma los datos contendrán información sobre la historia predeposicional, incluyendo posiblemente múltiples componentes heredados (Kohn et al., 2024). Así las edades termocronológicas reflejarían una historia térmica más antigua de las rocas subyacentes o del sustrato sobre el que se deposita la nueva formación sedimentaria.

Tabla 1. Edades termocronológicas existentes en el sinclinal de Nunchía. Tomadas de Ramírez-Arias et al. (2012).

Nombre de la muestra	Longitud (°O)	Latitud (°N)	Elevación	Edad TFA ± Error (Ma)	Longitud ± SD (µm)	Dpar ± SD (µm)	Edad Estratigráfica ± Error (Ma)	Formación	Referencia
FF-G1-24-56	-72,5803	5,1891	305	42,5 ± 6,2	11,02 ± 1,09		13,5 ± 2,5	León	Ramírez-Arias et al. (2012)
FF-G1-28-58	-72,5913	5,1915	366	277,6 ± 22,8	12,36 ± 2,49		13,5 ± 2,5	León	Ramírez-Arias et al. (2012)
MP-32	-72,4475	5,3619	561	98,3 ± 13	11,11 ± 2,37	2,04 ± 0,18	8 ± 3	Guayabo	Ramírez-Arias et al. (2012)
PO3A	-72,4492	5,4381	520	60,8 ± 7,0	10,21 ± 2,36	1,81 ± 0,03	13,5 ± 2,5	León	Ramírez-Arias et al. (2012)

3.2 Modelamiento de sistema petrolífero de forma tradicional

Para el desarrollo del modelamiento de sistemas petrolíferos en la zona del sinclinal de Nunchía, se tomó como base el modelo evolucionario realizado a partir de secciones balanceadas presentado por Martínez et al. (2022) la cual pasa por el campo Cupiagua. También se implementaron las herramientas del software Genesis (ZetaWare, 2003) y se evaluaron los modelos de madurez térmica, generación y expulsión de hidrocarburos discriminando crudo y gas en la zona del pozo Golconda-1, pseudopozo PSW Nunchía y el pozo Ramiriquí 1. Adicionalmente, se tomó en cuenta la información de la evolución geológica estructural, la disponibilidad de la información geoquímica en los pozos para la calibración del modelo y la ocurrencia de hidrocarburos en el área.

Para calibrar el modelo, se asumió un flujo de calor transiente, el cual presenta un aumento gradual de la temperatura desde la superficie hasta alcanzar 1330 °C a la base de la litosfera (Zhiyong, 2018). En contraste con el aumento gradual de la temperatura, se tiene un flujo de calor que decae desde un valor determinado hasta un valor medio al tope de la corteza. Este tipo de modelo tiene como resultado una historia de flujo de calor variable que representa los cambios asociados a las diferentes tasas de sedimentación, siendo un modelo con mayor sentido geológico que los modelos de flujo de calor constante o flujo de calor variable con base en un punto en el pasado y el flujo de calor actual. Adicionalmente, permite su aplicación tanto en zonas en donde hay datos directos de calibración medidos en el pozo (%Ro y temperatura) como en zonas profundas donde usualmente no hay pozos perforados y es necesario construir el modelo de un pseudopozo (Zhiyong, 2018).

3.3 Termocronología ZHe y modelamiento termal

La termocronología ZHe se basa en la retención de partículas alfa (^4He) producidas por la descomposición radiactiva de los isótopos padres ^{238}U , ^{235}U y ^{232}Th . Al incrementar la temperatura, el ^4He puede perderse por difusión a medida que nos acercamos hacia los bordes del mineral. Las mediciones de las concentraciones de ^4He y de los isótopos padres se utilizan para calcular las edades ZHe, que representan el tiempo durante el cual una roca experimentó enfriamiento. La difusividad del He disminuye a medida que la roca se enfría y alcanza la superficie de la Tierra; así, la difusión es lo suficientemente lenta como para que el ^4He producido por la descomposición de los isótopos padres se retenga en el cristal y pueda ser medido de forma cuantitativa. Si la tasa de enfriamiento es relativamente rápida ($>10\text{-}15\text{ °C/Ma}$), comúnmente se aplica la temperatura de cierre efectiva de Dodson (1973), y la edad de enfriamiento puede relacionarse con un evento de enfriamiento. En el caso de un enfriamiento muy lento ($<2\text{ °C/Ma}$) y/o recalentamiento, la reducción de la pérdida de He por difusión es transicional y esta transición ocurre en un rango de temperatura que se conoce como la zona de retención parcial (PRZ).

El rango de temperatura comúnmente aplicado para la PRZ de ZHe se encuentra entre 200 °C y 160 °C (Reiners *et al.*, 2004; Hourigan *et al.*, 2005). Este rango de temperatura puede variar dependiendo de muchos factores, como: la tasa de enfriamiento, el tamaño de grano, la geometría, la cantidad de daño radiactivo acumulado en la red cristalina y el contenido efectivo de uranio ($eU = 0,238 \cdot Th + U$), donde eU es un indicador de la cantidad de daño radiactivo acumulado en la red cristalina. Además, diversos factores pueden llevar a la dispersión de las edades ZHe de grano único, tales como: fragmentación de grano, variaciones en la morfología, zonación de U y/o Th, relaciones complejas intra-grano de eU, implantación de He, incertidumbres en los cálculos del factor de eyección alfa, inclusiones minerales y/o de fluidos ricos en He, distancias de parada de partículas alfa y un prolongado tiempo de residencia en la zona de retención parcial de He (Danišík *et al.*, 2017; Hueck *et al.*, 2018; Morón *et al.*, 2020).

Así, la edad corregida mostrada en la Tabla 2 se obtuvo utilizando la ecuación para la geometría del circón propuesta por Ketcham *et al.* (2011). Las mediciones de isótopos de ^4He y la datación de 25 cristales individuales fueron realizadas en los laboratorios de la Universidad de Melbourne, así se obtuvo un total de 5 muestras individuales pertenecientes a las formaciones Guayabo (CUS-08 y CUS-10) y Carbonera (CUS-05, CUS-11 y CUS-13) datadas por el método ZHe. El protocolo analítico adoptado para los análisis de ZHe siguió lo descrito por Gleadow *et al.* (2015), excepto que en este estudio se utilizaron picos de ^{233}U y ^{229}Th . Los resultados se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Resultados ZHe para muestras del sinclinal de Nunchía

Muestra	x	y	z (m)	⁴ He (ncc)	Masa (mg)	^a F ₇	U ppm	Th ppm	Th/U relación	^b [eU] ppm	Edad corregida (Ma)	Error (±1s)	Longitud del grano (mm)	Ancho de grano medio (mm)	^c Morfología del cristal	Formación
CUS-05				8,230	0,0158	0,84	122,1	78,5	0,64	140,7	30,4*	1,9	391,0	61,4	2T	
CUS-05	-72,577	5,187	322	152,993	0,0115	0,84	149,9	144,9	0,97	184,4	563,8	35,0	301,2	62,8	2T	Carbonera
CUS-05				26,807	0,0085	0,83	407,0	129,9	0,32	438,0	58,8*	3,6	261,4	59,1	2T	
CUS-05				101,135	0,0089	0,79	114,1	95,7	0,84	136,8	640,2	39,7	382,1	45,0	2T	
CUS-05				18,537	0,0047	0,75	82,0	68,0	0,83	98,2	323,7	20,1	272,3	39,5	2T	
CUS-08	-72,602	5,206	347	13,011	0,0077	0,78	219,7	151,2	0,69	255,7	54,3*	3,4	360,7	43,0	2T	Guayabo inferior
CUS-08				7,955	0,0048	0,76	106,3	66,7	0,63	122,1	110,2	6,8	242,3	44,1	2T	
CUS-08				53,806	0,0049	0,77	230,7	145,5	0,63	265,3	329,5	20,4	245,2	44,2	2T	
CUS-08				163,907	0,0065	0,79	695,9	549,6	0,79	826,7	245,7	15,2	252,1	51,3	2T	
CUS-08				30,614	0,0027	0,71	242,4	212,0	0,87	292,9	314,8	19,5	204,7	35,3	2T	
CUS-10	-72,628	5,207	530	2,623	0,0053	0,78	36,6	38,6	1,05	45,7	88,6	5,5	242,9	46,6	2T	Guayabo inferior
CUS-10				24,043	0,0050	0,78	873,4	415,7	0,48	972,4	40,9*	2,5	224,2	48,1	2T	
CUS-10				14,605	0,0033	0,74	683,2	150,7	0,22	719,0	51,0*	3,2	207,5	39,5	2T	
CUS-10				26,775	0,0045	0,78	565,4	232,6	0,41	620,8	79,1	4,9	210,8	47,6	2T	
CUS-10				18,311	0,0093	0,84	229,7	103,5	0,45	254,3	63,5	3,9	261,1	62,7	2T	
CUS-10				84,978	0,0066	0,81	249,9	117,4	0,47	277,8	366,8	22,7	260,8	50,4	2T	
CUS-10				44,730	0,0044	0,80	651,7	379,9	0,58	742,2	111,2	6,9	198,0	50,5	2T	
CUS-11	-72,656	5,233	746	22,006	0,0039	0,79	976,4	531,6	0,54	1102,9	42,0*	2,6	190,0	48,4	2T	Carbonera
CUS-11				123,003	0,0046	0,79	306,2	262,4	0,86	368,7	561,0	34,8	220,7	46,8	2T	
CUS-11				99,843	0,0038	0,76	937,2	714,8	0,76	1107,3	189,8	11,8	240,8	38,7	2T	
CUS-11				248,711	0,0114	0,84	183,3	136,4	0,74	215,8	767,1	47,6	297,3	63,3	2T	
CUS-11				135,312	0,0085	0,83	213,3	94,7	0,44	235,9	525,1	32,6	255,7	60,5	2T	
CUS-13	-72,675	5,231	865	3,987	0,0022	0,74	245,9	130,9	0,53	277,0	52,6*	3,3	166,9	38,0	2T	Carbonera
CUS-13				7,738	0,0061	0,77	112,1	78,0	0,70	130,7	79,8*	4,9	325,4	40,4	2T	
CUS-13				30,957	0,0063	0,81	88,5	30,4	0,34	95,7	408,8	25,3	247,4	50,9	2T	
CUS-13																

3.3.1 Modelamiento de historias termales mediante termocronología

Las edades de ZHe (CUS-05, CUS-08, CUS-10, CUS-11 y CUS-13) y TFA (FF-G1-24-56) junto con datos de reflectancia de vitrinita se utilizaron para determinar las trayectorias tiempo-temperatura mediante modelización bayesiana inversa transdimensional de Monte Carlo con cadenas de Markov utilizando el programa QTQt 5.8 (Gallagher, 2012; Gallagher *et al.*, 2009). Este software permite calcular historias térmicas a partir de datos termocronológicos de baja temperatura utilizando múltiples muestras a distintas elevaciones. Adicionalmente, QTQt permite modelar episodios de enterramiento y recalentamiento (Fox y Carter, 2020). Aunque el programa arroja distintas historias tiempo-temperatura asumiendo varios modelos estadísticos, sólo consideramos el modelo Esperado o Expected model, que corresponde a la media ponderada de la distribución posterior, esto proporciona curvas y tasas de variación más regulares; en comparación con otras salidas estadísticas (Velandia *et al.*, 2021).

Para la única muestra con datos TFA se utilizan los conteos individuales de trazas de fisión por granos y las longitudes de trazas de fisión confinadas (Tabla 1). Para los datos ZHe se utilizó la edad individual para cada grano (Tabla 2) y rangos de temperatura ($150 \pm 150^\circ\text{C}$) para la priorización general (espacio modelo). La temperatura actual de la superficie se fijó en $20 \pm 2^\circ\text{C}$. Además, se dejó al software la libertad para que modelara la historia térmica predeposicional. QTQt genera trayectorias tiempo-temperatura para dos cadenas de Markov diferentes (nacimiento y muerte), una cadena es una perturbación estadística de la otra (Gallagher, 2012). Para la elección del modelo, las tasas de aceptación de los parámetros de tiempo, temperatura y desviación deben estar normalmente en torno a 0,2-0,5, con valores similares para la difusión de He, mientras que las tasas de aceptación de nacimiento y muerte tienden a ser más cercanas y bajas ($<0,2$).

Dado que la cinética y los modelos de annealing de las trazas de fisión de apatito son bien conocidos (Ketcham *et al.*, 2007a, b), la estrategia de modelamiento consistió en integrar las edades ZHe junto con la única edad TFA (FF-G1-28-58) al interior del sinclinal de Nunchía. Para la muestra FF-G1-28-58, se disponía de conteos

de trazas de fisión inducidas y espontáneas, D_{par} y medidas de longitudes de trazas confinadas. Para los datos TFA seleccionamos el modelo de annealing de Ketcham et al. (2007b), con datos de longitud de trazas de fisión confinadas proyectadas en el eje c (Ketcham *et al.*, 2007a). Para efectos de modelización, cada muestra se restringió a una temperatura subsuperficial entre 140 y 200°C considerando un tiempo mayor a la edad ZHe, y a la temperatura actual de la superficie en la elevación donde se recogió la muestra.

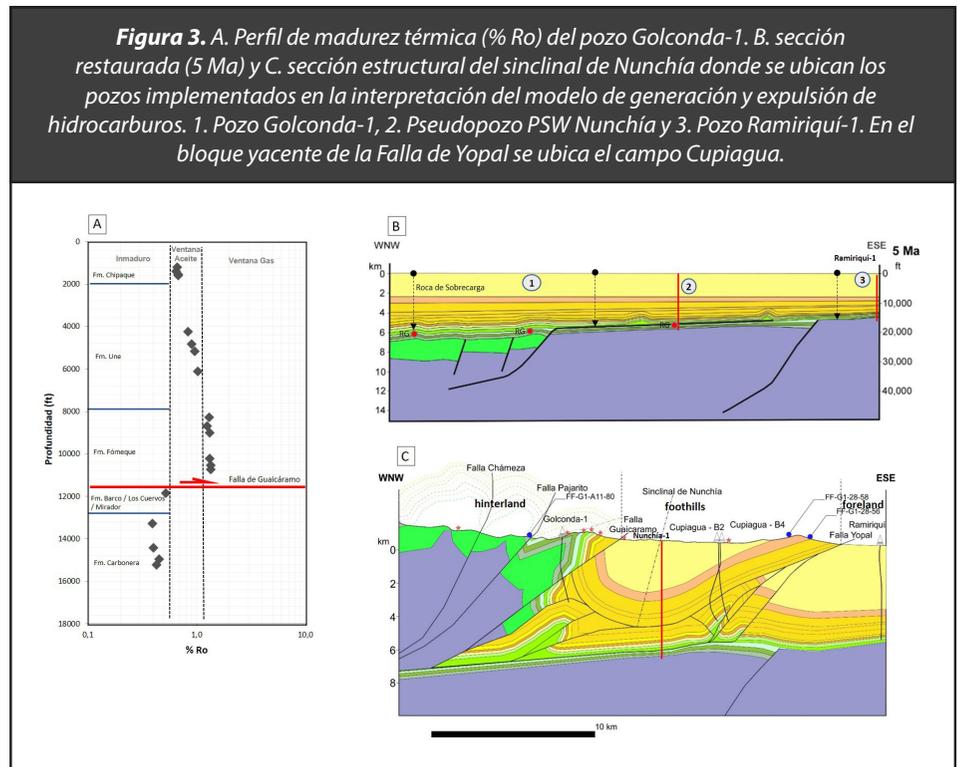
4. Resultados

4.1 Modelamiento 1D de sistemas petrolíferos de forma tradicional

El área se divide en tres zonas: 1) zona “hinterland,” localizada al occidente de la Falla Guaicáramo, 2) zona “foothills,” localizada entre las fallas Guaicáramo y Yopal, y 3) zona “foreland,” localizada desde la Falla Yopal al oriente (Figura 3). El modelo de evolución geológica describe dos principales eventos de deformación, 1) Eoceno tardío a Mioceno temprano (c.35 a 21 Ma) y 2) Plioceno a reciente (c.5 a 0 Ma).

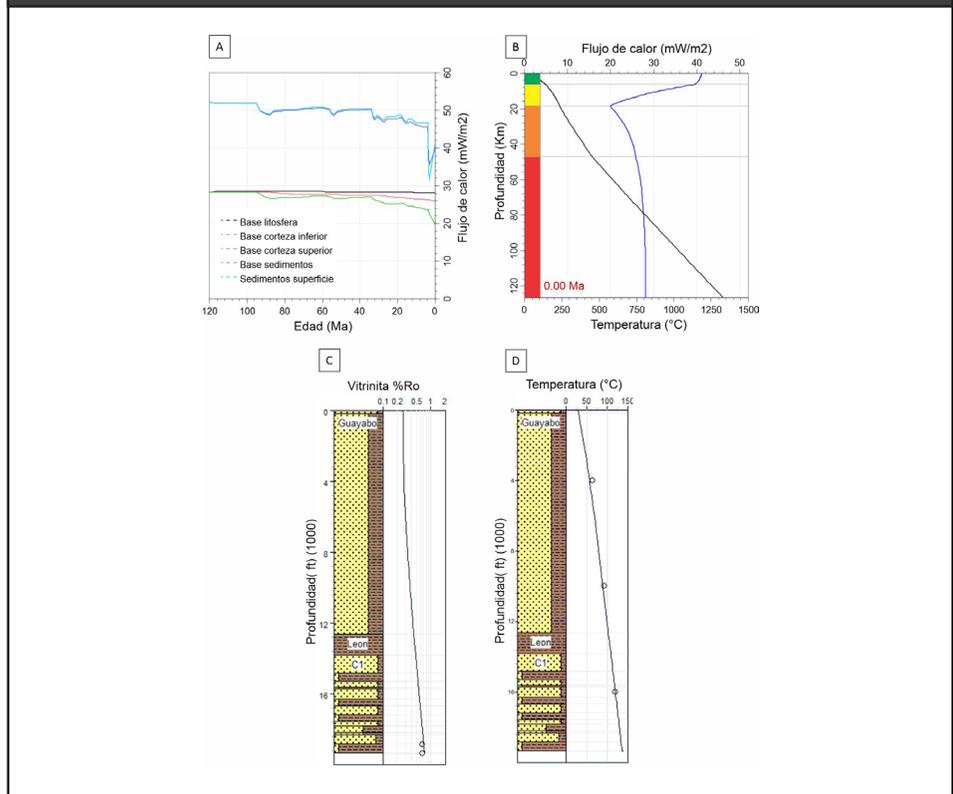
Los datos geoquímicos disponibles en la zona “hinterland” provienen del pozo Golconda-1 y muestran que la secuencia cretácica generadora de la Formación Fómeque se encuentra en un nivel de madurez típico de inicio de la ventana de gas (%Ro de 1,3), mientras que a nivel de la Formación Chipaque la madurez térmica corresponde con la fase de generación temprana de crudo (%Ro de 0,68) (Figura 3A). Teniendo en cuenta que la reflectancia de la vitrinita es un termómetro de la máxima profundidad de enterramiento, se puede establecer de manera conceptual que, en la mayor parte del área, las unidades generadoras del Cretácico inferior variaron su madurez térmica entre final de la ventana de aceite e inicio de la ventana de gas. De acuerdo con el modelo de evolución geológica propuesto en este estudio, la máxima profundidad de enterramiento en la zona “hinterland” mayor a los 20.000 pies, se alcanzó hace 5 Ma (Figura 3B). A partir de ese momento la inversión tectónica positiva levantó el bloque occidental, ocasionando una

interrupción abrupta de los procesos de generación y expulsión en el bloque levantado de la Falla de Guaicáramo (Figura 3C).



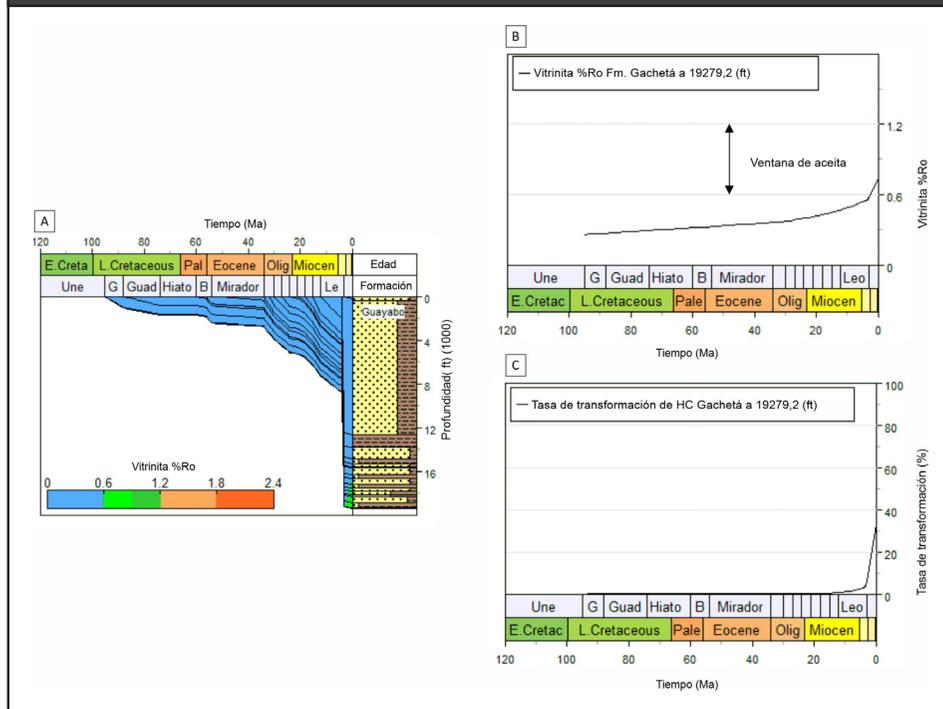
Con el objetivo de contrastar los elementos diagnósticos con los procesos de migración y carga de hidrocarburos en la estructura, se procedió a modelar el pseudopozo PSW Nunchía en la zona “foothills” y el pozo Ramiriquí-1 en la zona “foreland”. Como resultado del modelo térmico para el pseudopozo PSW Nunchía en la zona “foothills”, se obtuvo una historia de flujo de calor variable con valores entre 46 mW/m^2 (Cretácico inferior) y 36 mW/m^2 (Plioceno) (Figura 4A), con un flujo de calor actual de $42,9 \text{ mW/m}^2$ (Figura 4B), reflectancia de vitrinita %Ro de 1,2 (Figura 4C) y una temperatura de $152 \text{ }^\circ\text{C}$ a la profundidad final (Figura 4D).

Figura 4. Resultados de la calibración aplicando un modelo térmico con temperatura constante a la base de la litosfera aplicado en el pseudopozo PSW Nunchía. A. relación del flujo de calor variable y la edad de los sedimentos, B. flujo de calor actual, C. reflectancia de la vitrinita. D. temperatura a la base de la secuencia sedimentaria.



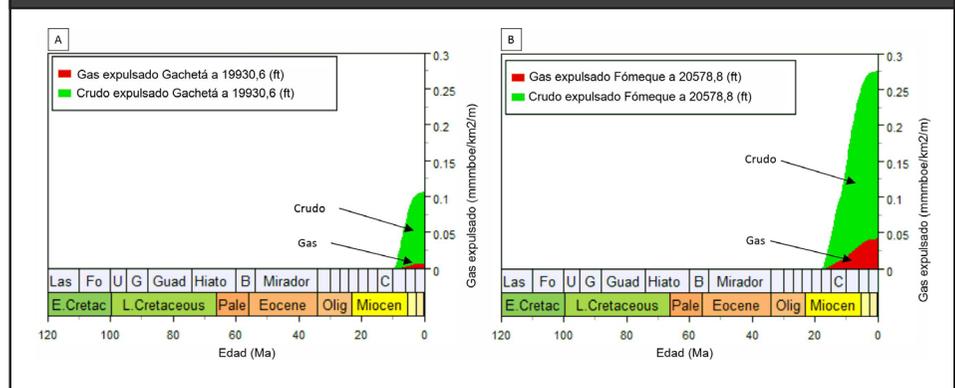
En el modelo se incluyeron dos intervalos generadores asociados a las formaciones Fόμεque y Gachetá. El potencial generador original fue definido con base en datos geoquímicos regionales e incluyeron facies orgánicas de ambientes marinos predominantemente siliciclásticos. Para la Formación Fόμεque se definió un porcentaje de contenido de materia orgánica (TOC) original de 5% y un índice de hidrógeno (IH) de 500 mgH/groca, mientras que para la Formación Gachetá se definió un %TOC original de 4% y un IH de 450 mgH/groca. Los resultados de la simulación en términos de la historia de enterramiento (Figura 5A) ligada a la madurez térmica (Figura 5B) y a la tasa de transformación de la materia orgánica térmica (Figura 5C), muestra que tanto la Formación Fόμεque como la Formación Gachetá, alcanzaron un importante nivel de madurez térmica, ventana de gas para la Formación Fόμεque y final de ventana de aceite para la Formación Gachetá.

Figura 5. A. Historia de enterramiento, B. Madurez térmica (% Ro) y C. Tasa de transformación de las formaciones Fómeque y Gachetá en el pseudopozo PSW Nunchía.



En cuanto al tipo de hidrocarburos expulsados, la simulación indica que se expulsó predominantemente crudo con gas que incluye la fracción molecular de C1 a C5, es decir que incluye gas natural y gases húmedos como posibles fuentes de gas licuado del petróleo (GLP). Debido al rango de madurez térmica de las facies generadoras (final de ventana de aceite e inicio de ventana de gas), los hidrocarburos generados presentan altos contenidos de gas húmedo, altamente prospectivo para la obtención tanto de gas natural como de GLP (Figura 6A). Debido al potencial generador y al alto nivel de madurez térmico, el mayor aporte en cuanto al volumen de gas está asociado a la Formación Fómeque (Figura 6B).

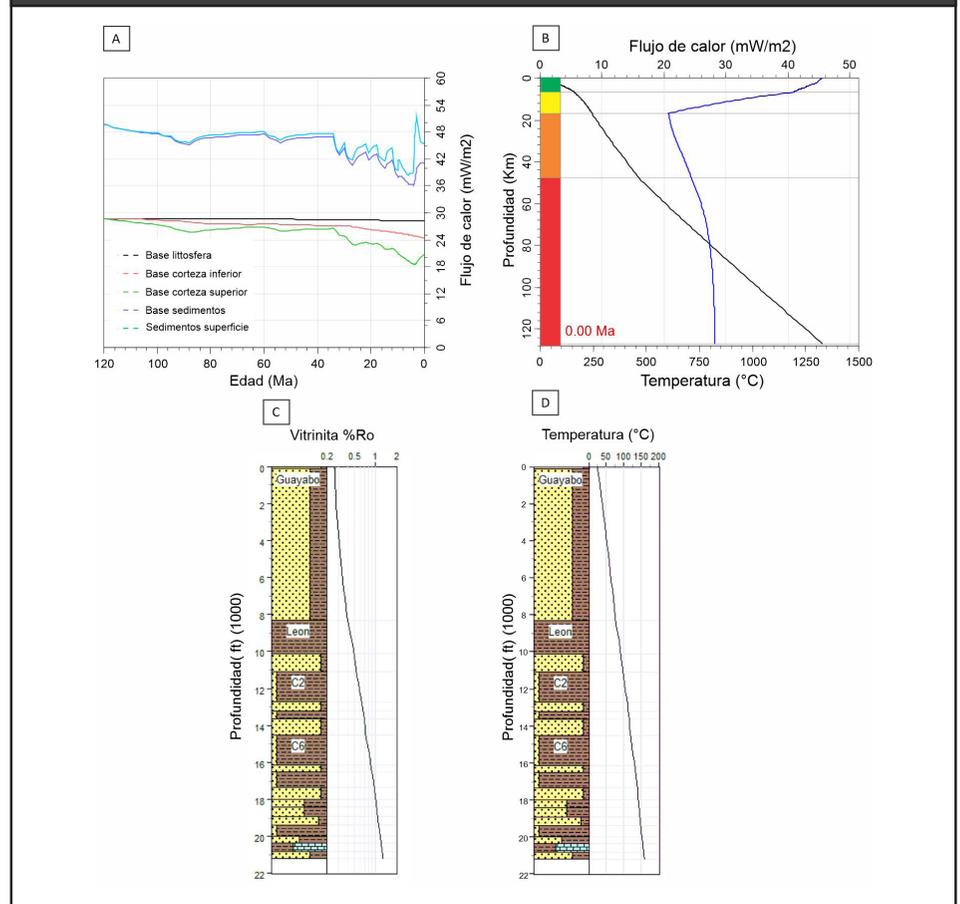
Figura 6. Tipo de hidrocarburos expulsados en el pseudopozo PSW Nunchía a partir de facies generadoras de las formaciones A. Gachetá y B. Fômeque.



Los datos geoquímicos disponibles en la zona “foreland” provienen del pozo Ramiriquí-1 y registran que la secuencia basal del Cretácico a profundidad actual superior a los 19000 pies se encuentra en fase de generación temprana con %Ro de 0,7. Sin embargo, en el pozo se han reportado hidrocarburos que incluyen crudo normal a liviano ($^{\circ}$ API de 30-40) y gas húmedo. Este tipo de hidrocarburos correlacionan con una madurez típica de la fase de generación tardía de crudo e inicio de la ventana de gas la cual es mayor a la registrada. Esto sugiere que estos hidrocarburos pueden ser producto de un proceso de migración desde el oeste, probablemente del sector “foothills” donde se ubica el sinclinal de Nunchía.

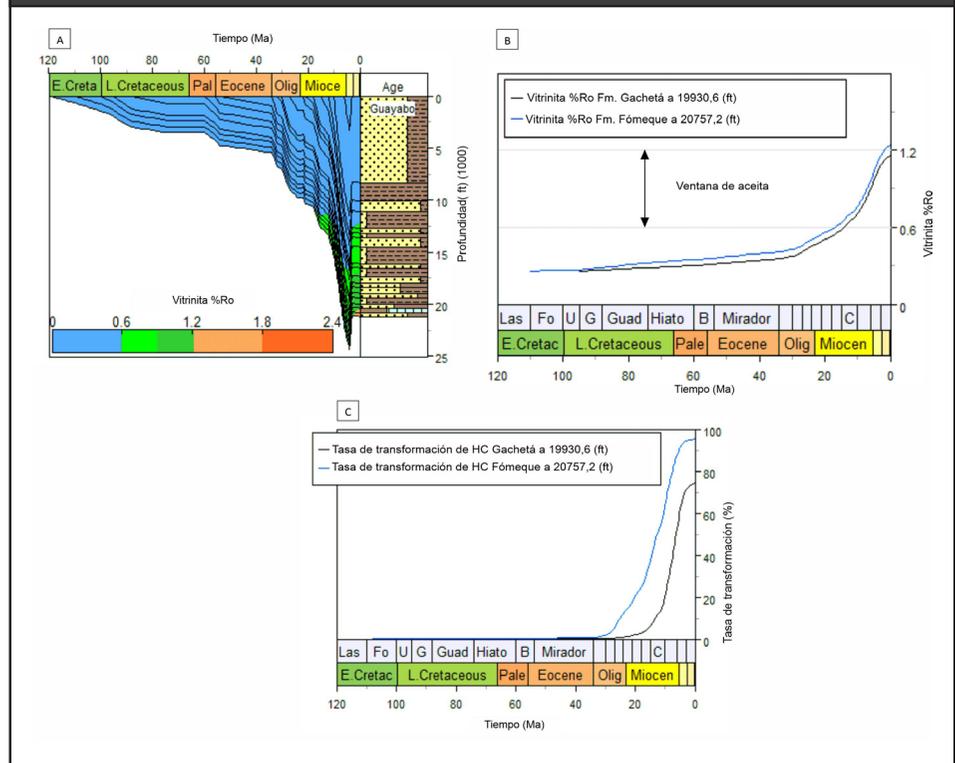
Como resultado del modelo térmico para el pozo Ramiriquí-1 en la zona “foreland”, se obtuvo una historia de flujo de calor variable con valores entre 52 mW/m² (Cretácico inferior) y 32 mW/m² (Plioceno) (Figura 7A), con un flujo de calor actual de 41 mW/m² (Figura 7B), reflectancia de vitrinita %Ro de 0,7 (Figura 7C) y temperatura de 142 $^{\circ}$ C a la profundidad final (Figura 7D).

Figura 7. Modelo térmico con temperatura constante a la base de la litosfera aplicado en el pozo Ramiriquí-1. A. relación del flujo de calor variable y la edad de los sedimentos, B. flujo de calor actual, C. reflectancia de la vitrinita. D. temperatura a la base de la secuencia sedimentaria.



Los resultados de la simulación en términos de la historia de enterramiento (Figura 8A), ligada a la madurez térmica (Figura 8B) y a la tasa de transformación de la materia orgánica (Figura 8C), muestra que la Formación Gachetá, alcanza la fase temprana de la ventana de aceite y tasa de transformación muy baja, menor al 40%. Estos valores en la tasa de transformación reflejan la ocurrencia de un proceso de expulsión de hidrocarburos a partir de estas facies orgánicas y confirma el proceso de migración de los hidrocarburos reportados en el pozo.

Figura 8. A. historia de enterramiento, B. madurez térmica (% Ro) y C. tasa de transformación de la Formación Gachetá en el pozo Ramiriquí-1.

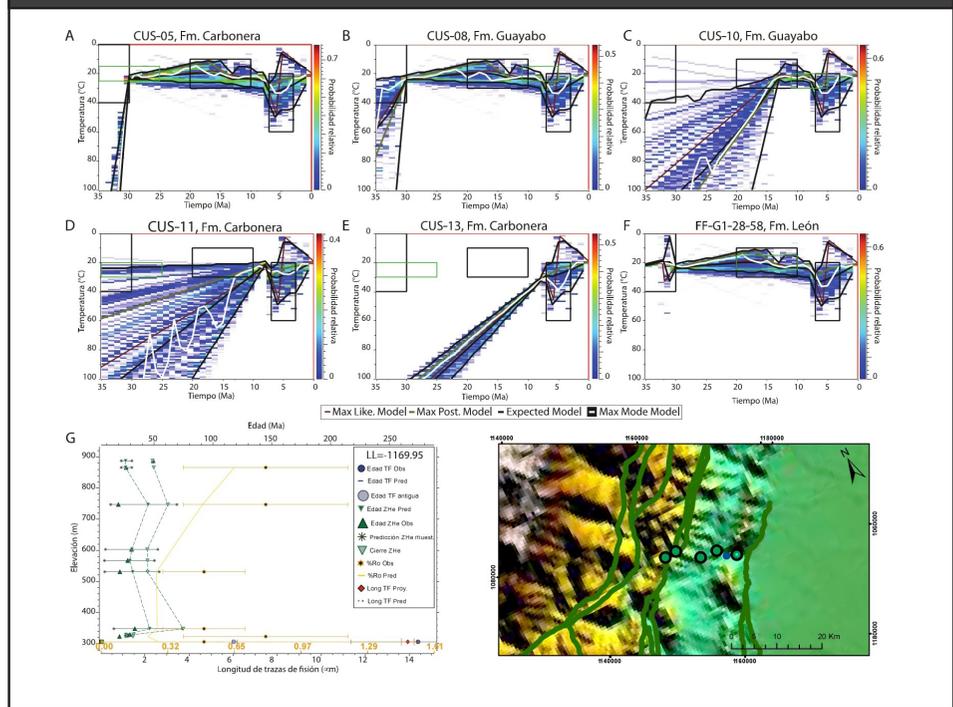


4.2 Modelamiento de historias termales mediante termocronología

Para el modelamiento de historias termales mediante datos termocronológicos se incorporaron todas las muestras en QTQt, para las edades ZHe se tomaron todos los cristales con la menor edad (aquellos denotados con * en la Tabla 2), para la única muestra con edades de trazas de fisión en apatitos se tomó en cuenta las longitudes de trazas de fisión, el Dpar y los conteos individuales de trazas de fisión. Para cada formación sedimentaria se tomó en cuenta la edad estratigráfica reportada en la Tabla 1. Adicionalmente, se colocaron tres constraints (rectángulos en negro en la Figura 9), para la Formación Carbonera se consideró una edad de 30 ± 5 Ma y una temperatura de depositación de 20 ± 20 °C. Para la Formación León, se asumió una edad entre 15 ± 5 Ma y una temperatura de 20 ± 10 °C. Mientras que para la Formación Guayabo se consideró una edad entre 5 ± 3 Ma y una temperatura de 40 ± 20 °C, esto equivale a decir que las unidades estratigráficas más jóvenes entierran a las unidades estratigráficas más antiguas. Se dejó libertad al programa

para que escogiera episodios de recalentamiento e historias termales antes de la depositación de la formación. En la Figura 9, los cuadros en verde corresponden a las edades de depositación de cada formación. La barra de colores situada a la derecha de cada historia tiempo-temperatura representa la probabilidad relativa de que por esos puntos pase la trayectoria tiempo-Temperatura. En todos los gráficos se observa que una vez que la Formación Carbonera se ha depositado en el intervalo entre 30 a 10 Ma la temperatura alcanzada no excede los 40°C a excepción de las muestras CUS-13 y CUS-11 en donde se evidencia un enfriamiento de las muestras. Posteriormente todas las historias termales evidencian un calentamiento entre 10 a 5 Ma que no excede los 60°C y de 5 Ma al presente. Las historias termales indican un pulso de enfriamiento que podría ser asociado a la exhumación del sinclinal de Nunchía. La temperatura alcanzada no es suficiente para resetear los sistemas termocronológicos de ZHe y de TFA, por lo tanto, esto podría explicar porque las edades de los distintos métodos termocronológicos dan mayores a la edad de depositación. Para el caso del método ZHe cada grano individual conserva una herencia con respecto al daño por radiación alfa, lo cual explica la variabilidad de las edades de ese método. El gráfico de la Figura 9G corresponde con las predicciones del modelo en conjunto, se observa que las edades ZHe predichas son muy similares a las observadas, mientras que los valores de %Ro predichos entre 0,32 a 0,8 sugieren que la madurez orgánica de las formaciones se encuentra de inmaduro a maduro, lo cual concuerda con el modelamiento del sistema petrolífero realizado de forma tradicional. En estas figuras el cuadro en rojo equivale a una imposición que hace el programa para seleccionar caminos en cualquier punto de tiempo y de temperatura. Se realizó una comparación entre modelos considerando las tres constraints impuestas (rectángulos negros en la Figura 9) y sin condiciones y no hay diferencias significativas en los modelos de historias termales.

Figura 9. Historias tiempo-Temperatura derivadas de los datos termocronológicos de baja temperatura ZHe y TFA para las formaciones Guayabo, León y Carbonera.



5. Discusión

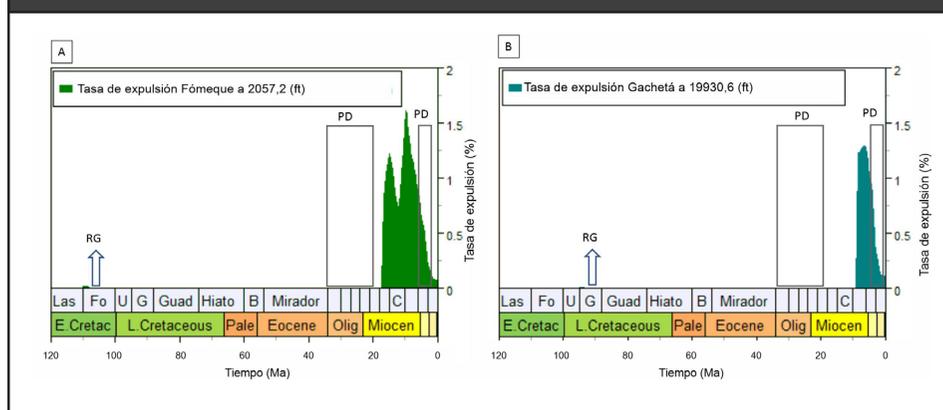
5.1 Modelo de carga para el sinclinal de Nunchía

La integración del modelo estructural, el modelo geológico, la evaluación de la madurez térmica del pozo Golconda-1, los resultados de modelamiento 1D de madurez térmica, generación y expulsión de hidrocarburos del pseudopozo PSW Nunchía y el pozo Ramiriquí-1 y los tipos de hidrocarburos reportados en los campos del sector (Cusiana, Cupiagua, Pauto, Volcanera y Ramiriquí), permiten formular un modelo conceptual que explicaría la presencia de las grandes cantidades de gas húmedo como posible fuente de GLP, principalmente en los campos Cusiana y Cupiagua. A continuación, se resume las características principales del modelo:

De acuerdo con los dos períodos importantes de deformación descritos en los modelos de evolución geológica (Mora *et al.*, 2010; Ramírez-Arias *et al.*, 2012; Martínez *et al.*, 2022;) en el sinclinal de Nunchía, el primero entre el Eoceno tardío a Mioceno temprano y el segundo en el Mioceno tardío a Plioceno. Estos periodos son responsables de la formación de las trampas en la zona, siendo más

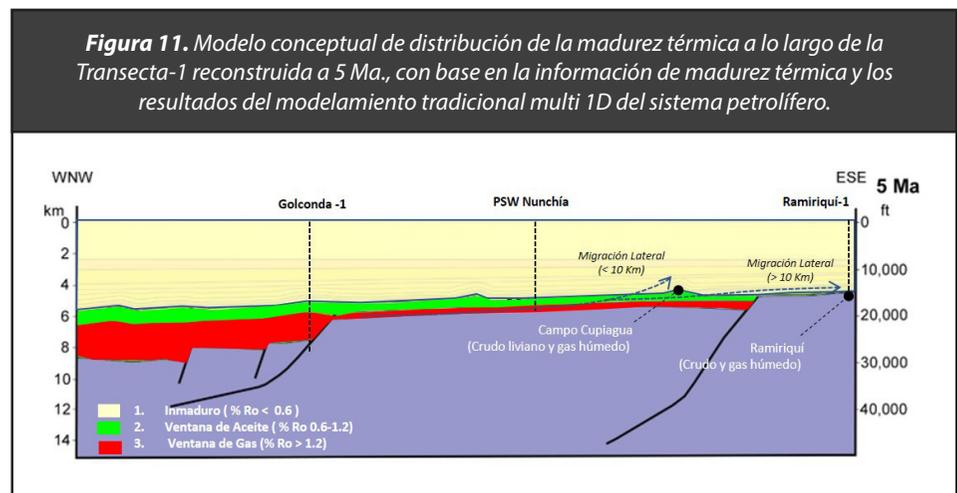
importante el primer periodo ya que presenta un buen sincronismo respecto a los tiempos de expulsión de los hidrocarburos, los cuales se concentraron en el Mioceno medio al Plioceno para la Formación Fόμεque (Figura 10A) y Mioceno tardío-Plioceno para la Formación Gachetá (Figura 10B). Esta relación entre el tiempo de formación de las trampas y el tiempo de los picos de expulsión (momento crítico) favorece las acumulaciones de hidrocarburos en unidades pre Oligoceno como las formaciones Guadalupe, Barco y Los Cuervos.

Figura 10. Tasa de expulsión de hidrocarburos en el pseudopozo PSW Nunchía a partir de facies generadoras de las formaciones A. Gachetá y B. Fόμεque. (RG = roca generadora, PD= periodos de deformación).



De acuerdo con la distribución de la madurez térmica de la sección estratigráfica a lo largo de la Transecta-1 hace 5 Ma (Figura 6B), es posible proponer una fase de generación, expulsión y carga de hidrocarburos que en términos generales explicaría la presencia de los hidrocarburos hasta ahora encontrados. El modelo se resume en una generación y expulsión desde el sector occidental y central (zona “hinterland” y zona “foothills”), con migración de hidrocarburos desde el oeste hacia el este. Este proceso de migración ocurrió durante el Mioceno tardío-Plioceno y fue interrumpido por el último evento de deformación (Plioceno) que terminó de configurar la geometría de trampas como las de Cusiana y Cupiagua (asociadas a la Falla de Yopal). Debido al nivel de madurez térmica predominante en la zona de generación (final de ventana de aceite e inicio de ventana de gas), se entramparon hidrocarburos del tipo crudo liviano y gas húmedo como posible fuente de GLP (Figura 11). De acuerdo con este modelo, que pudiera extrapolarse al norte y al sur

del sinclinal de Nunchía, el borde oriental de la Cuenca Cordillera Oriental y la Cuenca Llanos, estuvieron conectados hasta el Mioceno tardío, permitiendo que hidrocarburos generados al occidente del sistema de fallas de Yopal y Cusiana alcanzaran trampas como la de Ramiriquí-1, ubicadas en la zona “foreland”. Esto es consistente con las observaciones de direcciones de paleoflujo de la Formación Guayabo observadas por Ramírez-Arias et al. (2012) y los estratos de crecimiento propuestos por Rochat et al. (2003).



5.2 Aspectos que favorecieron la acumulación de hidrocarburos

Uno de los puntos que favorecieron la acumulación de grandes cantidades de hidrocarburos en las estructuras de Cusiana y Cupiagua es la combinación entre trampas de gran tamaño, y un modelo de migración y carga de alta impedancia con una distancia de migración muy corta (< 10 Km), un soterramiento poco profundo y la exhumación del sector del sinclinal de Nunchía desde el Plioceno al reciente que genera una amplitud de al menos 4 km por encima del nivel regional no deformado en la adyacente y proximal Cuenca Llanos, al este (Martínez *et al.*, 2022). El núcleo del sinclinal cilíndrico levantado de Nunchía estaría relacionado con al menos tres o potencialmente cuatro láminas de cabalgamiento apiladas, que incluyen los niveles productivos del yacimiento (Mora *et al.*, 2020). Esto aumentó la eficiencia de entrampamiento y las pérdidas de hidrocarburos por dispersión durante la migración. Una vez cargadas

las trampas de Cusiana y Cupiagua, durante los últimos 3 Ma se dieron importantes cambios en las condiciones de presión, volumen y temperatura (PVT) de estos yacimientos debido al movimiento tectónico vertical que formó el sinclinal de Nunchía, este movimiento rompió y levantó los cabalgamientos internos (occidentales) de Monterralo y El Morro de forma no secuencial, y propagaron la deformación de las fallas que delimitan el sinclinal de Nunchía. La variación de los parámetros PVT se han ido modificando en conjunto con la composición inicial de los hidrocarburos en las trampas.

6. Conclusiones

La generación, expulsión y carga de hidrocarburos se producen desde los sectores occidental y central (“hinterland” y “foothills”), con migración de hidrocarburos desde el oeste hacia el este, alcanzando el “foreland”. Este proceso de migración ocurrió durante el Mioceno tardío-Plioceno y fue interrumpido por un proceso de enfriamiento que comenzó hace 5 Ma de acuerdo con el modelamiento de historias termales basados en datos termocronológicos, esto terminó no sólo de configurar la geometría de trampas como las de Cusiana y Cupiagua, sino que impidió que las rocas se soterraran a una temperatura mayor que afectara la madurez termal de las formaciones sedimentarias existentes a lo largo del sinclinal.

El modelo propuesto de migración, expulsión y carga de hidrocarburos para el sinclinal de Nunchía puede ser utilizado como herramienta predictiva para la identificación de áreas poco exploradas con potencial para el descubrimiento de gas húmedo (gas natural y GLP) asociado al crudo.

Agradecimientos

Agradecemos al proyecto “Hábitat geológico, prospectividad, sostenibilidad socio ambiental y económica del gas húmedo (GLP), SGI-3210”, realizado entre MINCIENCIAS, la Agencia Nacional de Hidrocarburos y la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia bajo el código 110987780498 (Contrato 80748-233-2021) por el financiamiento proporcionado para el desarrollo de esta investigación. Agradecemos al EPIS por haber proporcionado la información de los pozos Golconda-1, Cusiana, Cupiagua y Ramiriquí.

Referencias

- Bayona, G.; Jaramillo, C.; Rueda, M.; Harker, A. R.; Torres, V. (2007). Paleocene-middle Miocene flexural-margin migration of the nonmarine Llanos foreland basin of Colombia. *CT&F-Ciencia, Tecnología y Futuro*, 3(3), 51-70. http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S012253832007000100003&script=sci_arttext&tlng=en (artículo de revista)
- Bayona, G.; Cortés, M.; Jaramillo, C.; Ojeda, G.; Aristizabal, J. J.; Reyes-Harker, A. (2008). An integrated analysis of an orogen-sedimentary basin pair: Latest Cretaceous-Cenozoic evolution of the linked Eastern Cordillera orogen and the Llanos foreland basin of Colombia. *Geological Society of America Bulletin*, 120(9-10), 1171-1197. <https://doi.org/10.1130/B26187.1> (artículo de revista)
- Caballero, V. M.; Naranjo, J. F.; Rodriguez, G.; Gomez, P. D.; Mora, A.; Villamizar, C.; Franco, M.; Gélvez, J. (2020). Eocene facies successions and environments in the southern llanos basin, Colombia. *CTyF - Ciencia, Tecnología y Futuro*, 10(1), 107-122. <https://doi.org/10.29047/01225383.141> (artículo de revista)
- Cazier, E.; Hayward, A.; Espinosa, G.; Velandia, J.; Mugniot, J.; Leel, W. (1995). Petroleum geology of the Cusiana Field, Llanos Basin foothills, Colombia. *AAPG bulletin*, 79(10), 1444-1462. <https://doi.org/10.1306/7834D9FE-1721-11D7-8645000102C1865D> (artículo de revista)
- Cooper, M. A.; Addison, F. T.; Alvarez, R.; Coral, M.; Graham, R. H.; Hayward, A. B.; ... Tabor, 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://archives.datapages.com/data/bulletns/1994-96/data/pg/0079/0010/1400/1421.htm> (artículo de revista)

- Cortes, M.; García, D.; Bayona, G.; Blanco, Y. (2009). Timing of oil generation in the Eastern flank of the Eastern Cordillera of Colombia based on kinematic models: implications in the Llanos Foothills and Foreland charge. *X Simposio Bolivariano Exploración Petrolera en Cuencas Subandinas*. Cartagena, Colombia. https://archives.datapages.com/data/colombia_acggp/simp10/99.htm (trabajo publicado en memoria de evento)
- Danišik, M.; McInnes, B. I.; Kirkland, C. L.; McDonald, B. J.; Evans, N. J.; Becker, T. (2017). Seeing is believing: Visualization of He distribution in zircon and implications for thermal history reconstruction on single crystals. *Science advances*, 3(2), e1601121. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1601121> (artículo de revista)
- Dodson, M. H. (1973). Closure temperature in cooling geochronological and petrological systems. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 40(3), 259-274. (capítulo de libro)
- Dueñas, H.; Césari, S. N. (2006). Palynological evidence of Early Carboniferous sedimentation in the Llanos Orientales Basin, Colombia. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 138(1), 31-42. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2005.10.002> (artículo de revista)
- Fox, M.; Carter, A. (2020). Heated topics in thermochronology and paths towards resolution. *Geosciences*, 10(9), 375. <https://doi.org/10.3390/geosciences10090375> (artículo de revista)
- Fulthorpe, C. S.; Hoyanagi, K.; Blum, P.; Expedition, I. O. D. P. (2011). IODP expedition 317: Exploring the record of sea-level change off New Zealand. *Scientific Drilling*, 12, 4-14. <https://doi.org/10.2204/iodp.sd.12.01.2011> (artículo de revista)
- Gallagher, K.; Charvin, K.; Nielsen, S.; Sambridge, M.; Stephenson, J. (2009). Markov chain Monte Carlo (MCMC) sampling methods to determine optimal models, model resolution and model choice for Earth Science problems. *Marine and Petroleum Geology*, 26(4), 525-535. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2009.01.003> (artículo de revista)
- Gallagher, K. (2012). Transdimensional inverse thermal history modeling for quantitative thermochronology. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 117(B2). (artículo de revista)
- García, D. F. (2008). Estudo dos sistemas petrolíferos no setor central da bacia dos "Llanos Orientales", Colômbia. Um modelo para explicar as mudanças na qualidade do petróleo, Ph.D. thesis, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil. (tesis)
- García, D. F.; Vaz dos Santos Neto, E.; Penteadó, H. (2015). Controls on the petroleum composition in the Llanos Basin, Colombia: Implications for exploration. *AAPG Bulletin*, 99 (8), 1503-1535, <https://doi.org/10.1306/102314111111> (artículo de revista)

- Gleadow, A.; Harrison, M.; Kohn, B.; Lugo-Zazueta, R.; Phillips, D. (2015). The Fish Canyon Tuff: A new look at an old low-temperature thermochronology standard. *Earth and Planetary Science Letters*, 424, 95-108. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.05.003> (artículo de revista)
- Guerrero, J. (2002). A proposal on the classification of systems tracts: application to the allostratigraphy and sequence stratigraphy of the Cretaceous Colombian Basin. Part 2: Barremian to Maastrichtian. *Geología Colombiana*, 27, 27-49. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/geocol/article/view/31581> (artículo de revista)
- Guerrero, J.; Sarmiento, G. (1996). Estratigrafía física, palinológica, sedimentológica y secuencial del Cretácico Superior y Paleoceno del Piedemonte Llanero: Implicaciones en exploración petrolera. *Geología Colombiana*, 20, 3-66. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/geocol/article/view/31386> (artículo de revista)
- Guerrero, J.; Sarmiento, G.; Narrete, R. E. (2000). The Stratigraphy of the W Side of the Cretaceous Colombian Basin in the Upper Magdalena Valley. Reevaluation of Selected Areas and Type Localities Including Aipe, Guaduas, Ortega, and Piedras. *Geología Colombiana*, 25(25), 45-110. <https://doi.org/10.15446/gc> (artículo de revista)
- Herngreen, G. F. W.; Jiménez, H. D. (1990). Dating of the Cretaceous Une Formation, Colombia and the relationship with the Albian-Cenomanian African-South American microfloral province. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 66(3-4), 345-359. [https://doi.org/10.1016/0034-6667\(90\)90046-L](https://doi.org/10.1016/0034-6667(90)90046-L) (artículo de revista)
- Horton, B. K.; Parra, M.; Mora, A. (2020). Construction of the Eastern Cordillera of Colombia: Insights from the sedimentary record. *The geology of Colombia*, 3, ca-3. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/feart.2021.636458/full> (artículo de revista)
- Hourigan, J. K.; Reiners, P. W.; Brandon, M. T. (2005). U-Th zonation-dependent alpha-ejection in (U-Th)/He chronometry. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(13), 3349-3365. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2005.01.024> (artículo de revista)
- Hueck, M.; Dunkl, I.; Heller, B.; Stipp Basei, M. A.; Siegesmund, S. (2018). (U-Th)/He thermochronology and zircon radiation damage in the south American passive margin: Thermal overprint of the Paraná LIP?. *Tectonics*, 37(10), 4068-4085. <https://doi.org/10.1029/2018TC005041> (artículo de revista)
- ICP-ECOPETROL (2009). Cronología de la deformación en cuencas Subandinas. ICP-ECOPETROL. (reporte técnico)
- Jaimes, E.; López, M.; Nivia, A.; Montoya, D.; Moreno, G.; Fuquen, J. (2013). Geología De La Plancha 229 Gachalá. 110. (plancha geológica)

- Jaramillo, C. A. (2002). Response of tropical vegetation to Paleogene warming. *Paleobiology*, 28(2), 222–243. [https://doi.org/10.1666/0094-8373\(2002\)028<0222:rotvtp>2.0.co;2](https://doi.org/10.1666/0094-8373(2002)028<0222:rotvtp>2.0.co;2) (artículo de revista)
- Jaramillo, C. A.; Rueda, M.; Torres, V. (2011). A palynological zonation for the Cenozoic of the Llanos and Llanos Foothills of Colombia. *Palynology*, 35(1), 46–84. <https://doi.org/10.1080/01916122.2010.515069> (artículo de revista)
- Jaramillo, C.A.; Muñoz, F.; Cogollo, M.; De La Parra, F. (2005). Quantitative biostratigraphy for the Cuervos Formation (Paleocene) of the Llanos foothills, Colombia: Improving palynological resolution for oil exploration. In: A. J. Powell; J. B. Riding (Ed). *Recent Developments in Applied Biostratigraphy* (pp. 145–159). Geological Society of London. <https://doi.org/10.1144/tms001.9> (capítulo de libro)
- Kohn, B. P.; Ketcham, R. A.; Vermeesch, P.; Boone, S. C.; Hasebe, N.; Chew, D.; Bernet, M.; Ling, C.; Daniščík, M.; Gleadow, A.J.W.; Sobel, E. R. (2024). Interpreting and reporting fission-track chronological data. *GSA Bulletin*, 136(9-10), 3891-3920. doi:10.1130/B37245.1 %J (artículo de revista)
- Ketcham, R. A.; Carter, A.; Donelick, R. A.; Barbarand, J.; Hurford, A. J. (2007a). Improved measurement of fission-track annealing in apatite using c-axis projection. *American Mineralogist*, 92(5-6), 789-798. <https://doi.org/10.2138/am.2007.2280> (artículo de revista)
- Ketcham, R. A.; Carter, A.; Donelick, R. A.; Barbarand, J.; Hurford, A. J. (2007b). Improved modeling of fission-track annealing in apatite. *American Mineralogist*, 92(5-6), 799-810. <https://doi.org/10.2138/am.2007.2281> (artículo de revista)
- Ketcham, R. A.; Gautheron, C.; Tassan-Got, L. (2011). Accounting for long alpha-particle stopping distances in (U–Th–Sm)/He geochronology: Refinement of the baseline case. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75(24), 7779-7791. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2011.10.011> (artículo de revista)
- Martinez, J. A. (2006). Structural evolution of the Llanos foothills, eastern Cordillera, Colombia. *Journal of South American Earth Sciences*, 21(4), 510-520. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2006.07.010> (artículo de revista)
- Martinez, J.; Patiño, M.; Mora, A.; Arias Martínez, J. P.; Tesón, E. (2022). Chapter 13 - Structural styles and evolution of the Colombian Eastern foothills Piedemonte triangle zone. In G. Zamora & A. Mora (Eds.), *Andean Structural Styles* (pp. 181-193): Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85175-6.00013-4> (artículo de revista)
- Mora, A.; Parra, M.; Strecker, M. R.; Kammer, A.; Dimaté, C.; Rodríguez, F. (2006). Cenozoic contractional reactivation of Mesozoic extensional structures in the Eastern Cordillera of Colombia. *Tectonics*, 25(2). <https://doi.org/10.1029/2005TC001854> (artículo de revista)

- Mora, A.; Horton, B. K.; Mesa, A.; Rubiano, J.; Ketcham, R. A.; Parra, M.; ... Stockli, D. F. (2010). Migration of Cenozoic deformation in the Eastern Cordillera of Colombia interpreted from fission track results and structural relationships: Implications for petroleum systems. *AAPG bulletin*, 94(10), 1543-1580. <https://doi.org/10.1306/01051009111> (artículo de revista)
- Mora, A.; García-Bautista, D. F.; Reyes-Harker, A.; Parra, M.; Blanco, V.; Sánchez, N.; Arias-Martínez, J. P. (2019). Tectonic evolution of petroleum systems within the onshore Llanos Basin: Insights on the presence of Orinoco heavy oil analogs in Colombia and a comparison with other heavy oil provinces worldwide. *AAPG Bulletin*, 103(5), 1179-1224, <https://doi.org/10.1306/1003181611417236> (artículo de revista)
- Mora, A.; Téson, E.; Martínez, J.; Parra, M.; Lasso, Á.; Horton, B. K.; ... Arias-Martínez, J. P. (2020). The eastern foothills of Colombia. *The geology of Colombia*, 3, ca-5. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/<https://repositorio.usp.br/directbitstream/4e626176-3776-4318-bf59-949a2f0ef39f/3119965.pdf> (capítulo de libro)
- Morón, S.; Kohn, B. P.; Beucher, R.; Mackintosh, V.; Cawood, P. A.; Moresi, L.; Gallagher, S. J. (2020). Denuding a craton: Thermochronology record of Phanerozoic unroofing from the Pilbara Craton, Australia. *Tectonics*, 39(9), e2019TC005988. <https://doi.org/10.1029/2019TC005988> (artículo de revista)
- Perdomo, A. H. C.; Murillo, J. M. M. (2007). Petrogénesis y geoquímica del cuerpo ígneo de Pajarito, Boyacá-Colombia. *Geología Colombiana*, 32, 111-126. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/geocol/article/download/32031/32053> (artículo de revista)
- Ramírez-Arias, J. C.; Mora, A.; Rubiano, J.; Duddy, I.; Parra, M.; Moreno, N.; Stockli, D.; Casallas, W. (2012). The asymmetric evolution of the Colombian Eastern Cordillera. Tectonic inheritance or climatic forcing? New evidence from thermochronology and sedimentology. *Journal of South American Earth Sciences*, 39, 112-137. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2012.04.008> (artículo de revista)
- Ramón, J. C.; Dzou, L. I.; Hughes, W. B.; Holba, A. G. (2001). Evolution of the Cretaceous organic facies in Colombia: implications for oil composition. *Journal of South American Earth Sciences*, 14(1), 31-50. [https://doi.org/10.1016/S0895-9811\(01\)00010-4](https://doi.org/10.1016/S0895-9811(01)00010-4) (artículo de revista)
- Ramon, J. C.; Fajardo, A. (2006). Sedimentology, sequence stratigraphy, and reservoir architecture of the Eocene Mirador Formation, Cupiagua field, Llanos foothills, Colombia: *AAPG bulletin*. <https://archives.datapages.com/data/specpubs/memoir88/chapter12/CHAPTER12.HTM> (artículo de revista)

- Rangel, A.; Osorno, J. F.; Ramírez, J. C.; De Bedout, J.; González, J. L.; Pabón, J. M. (2017). Geochemical assessment of the Colombian oils based on bulk petroleum properties and biomarker parameters. *Marine and Petroleum Geology*, 86, 1291-1309. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2017.07.010> (artículo de revista)
- Reiners, P. W., Spell, T. L., Nicolescu, S., y Zanetti, K. A. (2004). Zircon (U-Th)/He thermochronometry: He diffusion and comparisons with $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68(8), 1857-1887. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2003.10.021> (artículo de revista)
- Reyes-Harker, A.; Ruiz-Valdivieso, C. F.; Mora, A.; Ramírez-Arias, J. C.; Rodríguez, G.; De La Parra, F.; ...Blanco, V. (2015). Cenozoic paleogeography of the Andean foreland and retroarc hinterland of Colombia. *AAPG Bulletin*, 99(8), 1407-1453. (artículo de revista)
- Rochat, P.; Rosero, A.; Gonzalez, R.; Florez, I.; Lozada, M.; Petton, R. (2003, September). Thrust Kinematics Of The Tangara/Mundo Nuevo Area: New Insight From Apatite Fission Track Analysis. In *8th Simposio Bolivariano- Exploracion Petrolera en las Cuencas Subandinas* (pp. cp-33). European Association of Geoscientists & Engineers. <https://doi.org/10.3997/2214-4609-pdb.33.Paper17> (artículo de revista)
- Rowley, D. B.; Markwick, P. J. (1992). Haq et al. eustatic sea level curve: implications for sequestered water volumes. *The Journal of Geology*, 100(6), 703-715. <https://www.journals.uchicago.edu/doi/abs/10.1086/629623> (artículo de revista)
- Sánchez, N.; Mora, A.; Parra, M.; García, D.; Cortes, M.; Shanahan, T.; Ramírez, R.; Llamasa, O.; Guzmán, M. (2015). Petroleum system modeling in the Eastern Cordillera of Colombia using geochemistry and timing of thrusting and deformation. *AAPG Bulletin*, 99(8), 1537-1556. <https://doi.org/10.1306/04161511107> (artículo de revista)
- Sánchez, N.; Pacheco, J.; Guzman-Vega, M. A.; Mora, A.; Horton, B. (2021). Timing of hydrocarbon entrapment in the eastern foothills of the Eastern Cordillera of Colombia. *Interpretation*, 9(1), T145-T159. <https://doi.org/10.1190/INT-2020-0058.1> (artículo de revista)
- 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> (artículo de revista)
- Tesón, E.; Mora, A.; Silva, A.; Namson, J.; Teixell, A.; Castellanos, J.; ... Valencia, V. A. (2013). Relationship of Mesozoic graben development, stress, shortening magnitude, and structural style in the Eastern Cordillera of the Colombian Andes. *Geological Society, London, Special Publications*, 377(1), 257-283. <https://doi.org/10.1144/SP377.10> (artículo de revista)

- Ulloa, C., Rodríguez, E., & Renzi, G. (1981). Geología De Las Plancha 171 Duitama, 191 Tunja, 211 Tauramena Y 230 Monterrey. Boletín Geológico, 24(1976), 55. <http://recordcenter.sgc.gov.co/B4/13010010024364/documento/pdf/0101243641101000.pdf> (memoria explicativa)
- UPTC-ANH. (2022). Evaluación de la prospectividad del gas en Colombia en las cuencas onshore con producción comercial. Reporte final integrado del contrato 337 de 2021 celebrado entre la ANH y la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. (reporte técnico)
- Velandia, F.; Bermúdez, M. A.; Kohn, B.; Bernet, M.; Zuluaga, C. A.; Brichau, S. (2021). Cenozoic exhumation patterns in the northern Andes: Constraints from the southern Bucaramanga Fault, Eastern Cordillera, Colombia. *Journal of South American Earth Sciences*, 111, 103473. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103473> (artículo de revista)
- ZetaWare. (2003). About ZetaWare. Interactive Petroleum System Tools. <https://zetaware.com/about.html/> (fuente electrónica)
- Zhiyong, He (2018). The most important factors in charge risking and best practices the future of basin and petroleum modelling. AAPG Paper. (documento)