

## **Evaluación termal de 6 pozos de la parte central de la cordillera oriental (Colombia), a partir de paleogeotermas: implicaciones sobre la historia térmica y los hidrocarburos**

GEOLOGICAL ENGINEERING

## **Thermal evaluation of 6 wells of the central part of the eastern cordillera (Colombia), from paleogeotherms: implications on thermal history and hydrocarbons**

**Sandra Pedraza-Fracica\*, Jorge E. Mariño Martínez\*§**

*\*Escuela de Ingeniería Geológica, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Sogamoso, Colombia.*

*sandra.pedraza@uptc.edu.co, jorge.marino@uptc.edu.co*

(Recibido: Noviembre 20 de 2012 Aceptado: Mayo 08 de 2014)

### **Resumen**

Las paleotemperaturas de seis pozos se calcularon a partir de la reflectancia del maceral vitrinita. La paleogeoterma (paleotemperatura vs. profundidad) de cada pozo se comparó con el gradiente geotérmico actual de cada zona. La interpretación se basó en los casos hipotéticos de estimación de gradiente geotérmico y en perfiles térmicos asociados con el flujo de fluidos en sistemas activos de energía geotérmica. En algunos pozos, la paleogeoterma parece indicar que el enterramiento es el factor que causó el cambio del rango de la materia orgánica; en otros pozos, un gradiente de la paleogeoterma mayor a lo normal podría indicar influencia a partir del incremento del flujo basal de calor; en la mayoría de los pozos, la irregularidad de la paleogeoterma se puede explicar a partir de procesos hidrotermales asociados posiblemente con intrusiones y/o paleo flujo regional. El análisis de la paleotemperatura confirma la presencia de anomalías en el rango de la materia orgánica en la parte central de la Cuenca Cordillera Oriental, como resultado probablemente de flujos regionales asociados a efectos topográficos y fenómenos geológicos como, fallas, fluidos hidrotermales, enterramiento y orogenia que aumentaron la madurez de la materia orgánica en las rocas y posiblemente afectaron y transportaron los hidrocarburos.

**Palabras Clave:** *Gradiente geotérmico, hidrocarburos, paleogeoterma, reflectancia de la vitrinita.*

### **Abstract**

The paleotemperatures in six wells were calculated from the reflectance of the maceral vitrinite. The paleogeotherm (paleotemperature vs. depth) for each well was compared with the present geothermal gradient. The interpretation of these comparisons was based on hypothetical cases of estimation of geothermal gradient and thermal profiles associated with the flow of fluids in active geothermal systems. As a result, in some wells, the paleogeotherm seems to indicate that burial was the key factor in changing rank of the organic matter; in other wells, a higher than normal gradient could indicate heat flow at the base of the basin; in most wells, an irregular paleogeotherm could be explained through hydrothermal process associated to intrusions and paleo regional flow. The paleotemperature analyses of the wells confirm the rank anomalies of the organic matter in the central part of the Eastern Cordillera Basin, possible related to regional flow as a result of geological phenomenon such as faults, hydrothermal fluids, burial and orogeny that acted in the past and increased the maturity of the organic matter in the rocks and possibly affected and transported the hydrocarbons.

**Keywords:** *Geothermal gradient, hydrocarbons, paleogeotherm, vitrinite reflectance.*

## 1. Introducción

La maduración de los hidrocarburos en la Cuenca Cordillera Oriental de Colombia generalmente se relaciona con la subsidencia y el enterramiento (Audemard *et al.*, 2009; ANH, 2008), pero no se han hecho mayores investigaciones sobre otras posibilidades de maduración, como la influencia de cuerpos ígneos o de corrientes hidrotermales. Los primeros estudios que se realizaron sobre la evolución de la Cordillera Oriental y los Llanos Orientales muestran influencias de flujos térmicos variables en el tiempo y en el espacio, que se relacionan con la migración de hidrocarburos durante el Cretácico Medio (Fabre, 1985). Guerrero (1993), en su informe sobre el potencial de hidrocarburos en la Cuenca de la Sabana de Bogotá, hace una comparación estratigráfica de unidades depositadas desde el Paleozoico hasta el reciente, mostrando que los hidrocarburos maduraron desde el Cretácico Medio y presentaron migraciones masivas desde el Paleoceno. Estudios recientes de Prada & Quintero (2004), y Calderón & Blanco (2004) sobre inclusiones de fluidos en el piedemonte llanero determinaron el tránsito de paleofluidos a través de las formaciones durante la exhumación de la Orogenia Andina. Dentro de las exploraciones hechas por INGEOMINAS-Servicio Geológico Colombiano (SGC) y la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH), acerca del mapa de gradientes geotérmicos de Colombia, se presenta un informe que muestra anomalías positivas en el gradiente geotérmico de la Cordillera Oriental, debido a la presencia de fuentes magmáticas y fluidos hidrotermales (Alfaro *et al.*, 2009). Teniendo en cuenta que en el municipio de Iza (Boyacá) afloran rocas provenientes de un cuerpo volcánico, Contreras & Jaramillo (2009) presentaron análisis petrográficos, metalográficos y de composición química, que les permitió concluir que las rocas que componen el cuerpo volcánico de Iza han sido afectadas por procesos hidrotermales.

Los estudios anteriores han llevado a que algunos autores consideren la hipótesis de una posible migración regional de hidrocarburos de la Cordillera Oriental hacia los Llanos Orientales

como una forma de explicar el origen de los crudos pesados en el borde llanero y regiones circunvecinas (ANH, 2010; Bachu *et al.*, 1995). Las migraciones de fluidos a nivel regional han sido documentadas en Norteamérica y Europa, como una forma de explicar anomalías geotérmicas en hidrocarburos. Bethke & Marshak (1990) propusieron un modelo de flujo regional, generado por diferencias topográficas, que transportó los fluidos calientes hacia el norte de la Cuenca de Illinois llevando consigo parte del petróleo de la cuenca y generando los depósitos minerales conocidos como MVT. Hower & Gayer (2002), Rowan *et al.* (2002), y Mariño (2007), a partir del análisis de varias cuencas, concluyeron que la maduración del carbón y las anomalías de rango dentro del mismo fueron producto del calentamiento por fluidos hidrotermales.

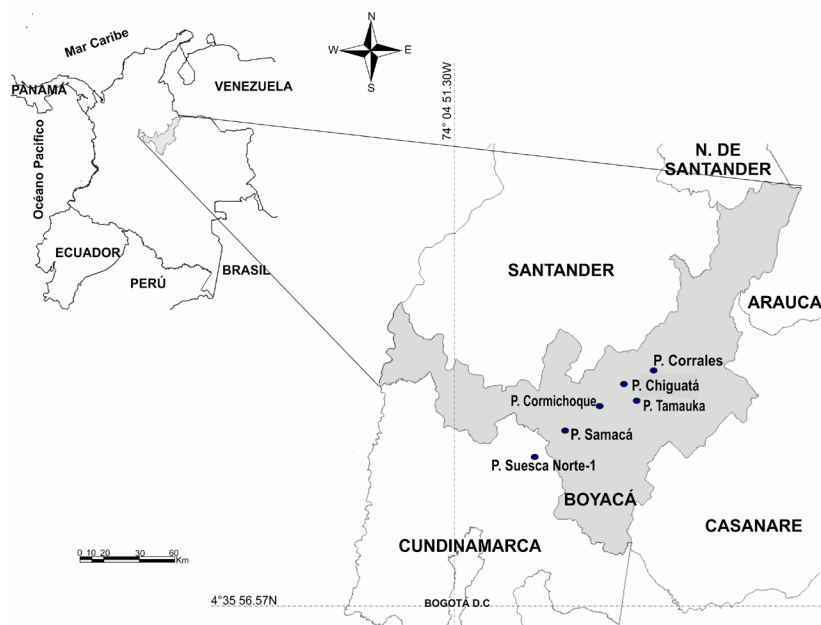
El propósito de esta investigación es analizar la posible influencia de otras fuentes de calor como intrusivo y fluido hidrotermal, adicional al enterramiento, sobre las rocas generadoras de hidrocarburos en la parte central de la Cuenca Cordillera Oriental. Este análisis se realiza a partir de la comparación entre los perfiles de gradiente geotérmico actual y las paleogeotermas obtenidas a partir de la reflectancia de la vitrinita ( $R_o$ ). La comparación se basa en la interpretación de los casos hipotéticos sobre estimación del gradiente paleogeotérmico planteados por Bray *et al.* (1992) y perfiles térmicos asociados con el movimiento de fluidos en sistemas activos de energía geotérmica de Ziagos & Backwell (1986). Los casos hipotéticos que plantean los autores anteriores permiten conocer diferentes eventos que posiblemente transmitieron calor adicional durante la historia térmica de cuencas sedimentarias. Entender el efecto de diferentes fuentes térmicas puede contribuir al entendimiento de la evolución térmica de los hidrocarburos en la Cuenca Cordillera Oriental y su relación con los hidrocarburos de la Cuenca de los Llanos Orientales.

## 2. Aspectos geológicos

Los pozos más superficiales Chiguatá (en Sogamoso) y Samacá fueron perforados en la Formación Guaduas, para exploración de carbones,

y las muestras para vitrinita fueron tomadas directamente de los carbones. Los demás pozos son más profundos y casi todos iniciaron en la Formación Guaduas y terminaron en la Formación Une o en el Cretácico Inferior. En dichos pozos las muestras fueron tomadas en carbones y arcillolitas (Fig. 1. Localización). La estratigrafía corresponde a la establecida por el Servicio Geológico Colombiano para la parte central de la cuenca así: Formación Une, Formación Chipaque (o Conejo-Churuvita), Grupo Guadalupe (Ermitaño), y Formación Guaduas (Barrero *et al.*, 2007; ANH, 2008; Ulloa, 2003) (Fig. 2. Estratigrafía regional).

litolitas fisibles con intercalaciones de areniscas calcáreas; la parte superior está compuesta por shales calcáreos con intercalaciones de areniscas cuarzosas; hacia Cundinamarca, la parte superior se torna más arenosa. La Formación Guaduas está compuesta, en su parte inferior, de arcillolitas fisibles negruzcas con esporádicas zonas arenosas, y en su parte superior por alternancias de arcillolitas, areniscas delgadas y mantos de carbón (Ulloa, 2003, Amaya *et al.*, 2010; Sarmiento, 1994).



**Figura 1.** Localización de los pozos utilizados para análisis de reflectancia de la vitrinita.

La Formación Une está formada por arenitas de cuarzo, de grano fino y medio a conglomerático, hacia el techo, de color gris claro a amarillento, en capas gruesas a muy gruesas, con cemento silíceo, con intercalaciones frecuentes de lodolitas micáceas, grises oscuras. La Formación Chipaque está compuesta de arcillolitas y lodolitas en capas con geometría externa ondulosa no paralela y ondulosa paralela, con colores gris claros a negros y pardos grisáceos. En el Grupo Guadalupe, la parte inferior está compuesta de chert negro y limolitas silíceas, intercaladas con bancos de caliza y rocas fosfáticas; la parte intermedia está formada por arci-

En la zona de las formaciones atravesadas por los pozos analizados, las rocas fuentes por excelencia son las Formaciones Chipaque y sus equivalentes La Luna y Gachetá, y las rocas reservorios son la Formaciones Une y el Grupo Guadalupe. En las rocas fuente los contenidos de carbono orgánico total (TOC) está entre 1,0 y 3,0%, y el kerogeno es de tipo I y II. La porosidad de las rocas reservorio fluctúa entre 5 y 10%, y la permeabilidad, entre 4 y 100 mD (ANH, 2008). Los carbones bituminosos se encuentran en la Formación Guaduas, y su espesor y número de mantos aumentan de norte a sur.

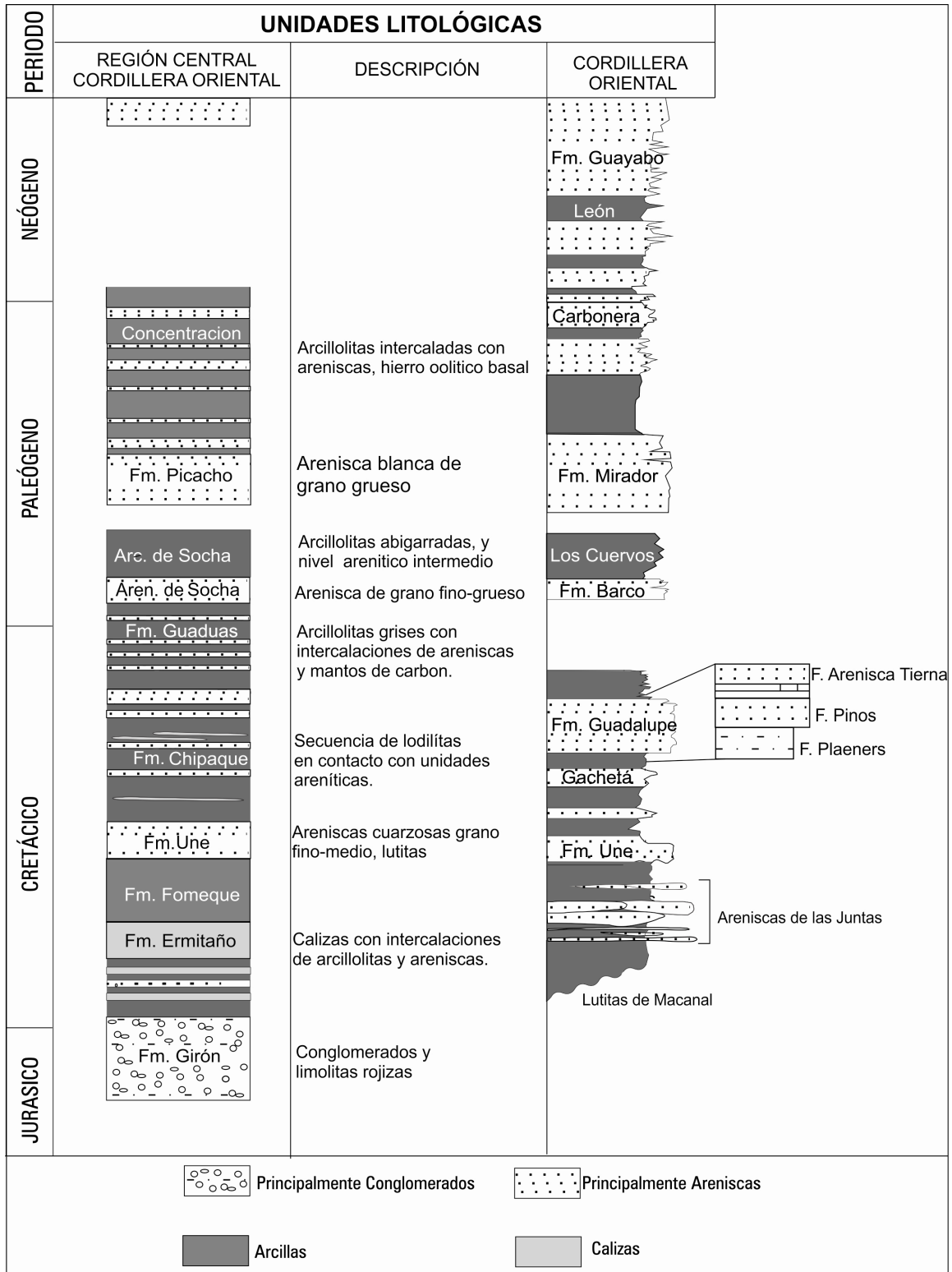


Figura 2. Columna estratigráfica de la parte central de la Cordillera Oriental. (Modificado de ANH, 2008).

### 3. Metodología

Para entender la variación espacial de las condiciones térmicas del área de estudio, se recolectaron muestras de vitrinita en los carbones de los seis pozos ya referenciados en la Fig. 1. En los Pozos Chiguatá y Samacá se recolectaron las muestras en carbón para reflectancia de la vitrinita ( $R_o$ ); en los pozos restantes, se reanalizó la información existente de  $R_o$  a partir de muestras tomadas en carbones y arcillolitas (Audemard *et al.*, 2009; Pedraza, 2010). A partir de la reflectancia de la vitrinita ( $R_o$ ) se construyeron paleogeotermas que muestran la variación de la paleotemperatura, en función de la profundidad. La vitrinita es uno de los grupos de macérales más abundantes en la materia orgánica, y se ha utilizado como paleotermómetro por ser un indicador del grado de maduración térmica de la materia orgánica y, en consecuencia, de los hidrocarburos (Barker & Pawlewicz, 1986; Mariño, 2007).

Barker & Pawlewicz (1986), plantearon una ecuación empírica para calcular paleotemperaturas cuando la variación en la reflectancia de la vitrinita se debe a alteración hidrotermal (Ec. 1); luego, relacionaron el valor de la reflectancia de la vitrinita ( $R_o$ ) con la máxima temperatura ( $T_{max}$ ) de enterramiento a través de la ecuación (Ec. 2) (Barker & Palewlewicz, 1994).

$$T_{max} (^{\circ}C) = \frac{\ln(R_o) 1.19}{0.00782} \quad (1)$$

$$T_{max} (^{\circ}C) = \frac{\ln(R_o) 1.18}{0.00782} \quad (2)$$

Para los pozos y minas más superficiales se obtuvieron muestras representativas de carbón a diferentes profundidades, muestras que se secaron, molieron, trituraron y cuartearon, obteniendo muestras parciales. Las muestras para el análisis de reflectancia de la vitrinita se prepararon según la norma ASTM D2785-D2797 – 8 (ASTM, 2004). El tamaño de las probetas, según la norma, es de 2 mm de diámetro, para lo cual las partículas se redujeron de tamaño hasta que pasaron por el tamiz de 850 micras; las partículas de carbón se unieron con un aglomerante preparado con resina

epóxica, naftenato de cobalto y mekperoxido, mezcla no reactiva que se sometió a presión. Después de aproximadamente 24 horas, la superficie de las probetas fue pulida con lijas de diferentes calibres hasta que no quedarán huecos ni rayas; luego, se brillaron con las pulidoras de baja y alta velocidad y sus respectivos abrasivos. La lectura de reflectancia de la vitrinita se realizó según la norma ASTM D2798 – 99 (ASTM, 2004) utilizando un microscopio Leica DM400P y un fotómetro Tidas MSO.

Con los datos de reflectancia de la vitrinita ( $R_o$ ), se calcularon las paleotemperaturas (Barker & Pawlewicz, 1986 y 1994) y se graficaron las paleogeotermas (perfil de paleotemperatura vs profundidad). Posteriormente, se hicieron las comparaciones de las paleogeotermas con datos de gradientes geotérmicos actuales de cada zona, que se dibujaron a partir de la temperatura de superficie en cada pozo y asumiendo que el gradiente geotérmico actual se comporta linealmente. La información sobre gradientes fue suministrada por Alfaro *et al.* (2009).

### 4. Resultados y discusión

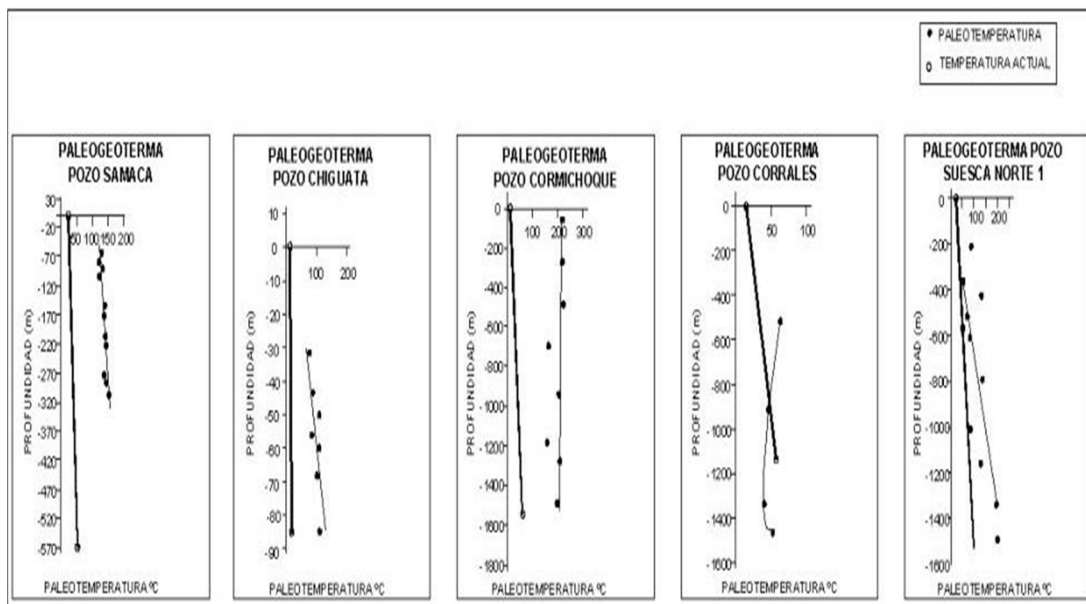
Los resultados de la investigación se presentan en la Tabla 1. En cada pozo se grafican el gradiente de temperatura actual y el paleogradiente calculado a partir de  $R_o$  contra la profundidad (Figs. 3 y 4). Algunos pozos tienen información de cientos de metros de profundidad, producto de la exploración petrolera en la parte central de la Cordillera Oriental (Cormichoque, Corrales, Suesca Norte 1, Tamauka-1). La información de pozos más superficiales se ha tomado de la exploración de carbón y gas asociado al carbón (Samacá y Chiguatá). A continuación, se realiza un análisis individual de cada pozo y posteriormente se analizan los resultados por pozos afines y se hace una discusión de carácter general.

*Pozo Samacá:* este pozo se ubica en el municipio de Samacá, en el Departamento de Boyacá (Fig.1). Al comparar el gradiente geotérmico actual y la paleogeoterma del pozo Samacá (Fig.3), puede notarse un paralelismo entre las geotermas.



**Tabla 1.** Información de los pozos Samacá, Chiguata, Cormichoque, Corrales y Suesca Norte 1 (Pedraza, 2010).

SAMACA		CHIGUATA		CORMICHOQUE		CORRALES		SUESCA NORTE 1	
# Muestras	11	# Muestras	7	# Muestras	8	# Muestras	4	# Muestras	10
Profun. Max	310 m.	Profun. Max	8.5 m.	Profun. Max	1493.5 m.	Profun. Max	1878.4 m.	Profun. Max	1493.5 m.
Ro máxima	1.26%	Ro máxima	0.76%	Ro máxima	2.25%	Ro máxima	2.25%	Ro máxima	2.25%
T° media de Superficie	23.32°C	T° media de Superficie	15.61°C	T° media de Superficie	14.27°C	T° media de Superficie	15.48°C	T° media de Superficie	23.32°C
T° a 568.15m	53°C	T° a 85m	19.9°C	T° a 85m	61.88°C	T° a 85m	57.54°C	T° a 85m	53°C
Gradiente geoter°C/Km	52.23	Gradiente geoter°C/Km	43.08	Gradiente geoter°C/Km	30.71	Gradiente geoter°C/Km	37.29	Gradiente geoter°C/Km	52.23
Prof.	Ro(T°C)	Prof.	Ro(T°C)	Prof.	Ro(T°C)	Prof.	Ro(T°C)	Prof.	Ro(T°C)
65	0.94	32	0.49	61	1.69	518	0.5	213	0.56
80	0.85	44	0.56	274	1.73	914	0.44	366	0.37
92	0.97	50	0.74	488	1.77	1341	0.42	427	0.98
104	0.88	56	0.55	701	1.11	1463	0.46	518	0.45
155	1.07	60	0.75	945	1.55			610	0.53
172	1.02	68	0.68	1189	1.09			792	1.05
208	1.08	85	0.76	1280	1.62			10076	0.54
222	1.12			1494	1.47			1158	0.95
275	1.07							1341	2.13
287	1.13							1494	2.25
310	1.26								



**Figura 3.** Paleogeotermas (paleotemperatura vs profundidad) y gradientes geotérmicos actuales, para los pozos Samacá, Chiguata, Cormichoque, Corrales y Suesca Norte 1.

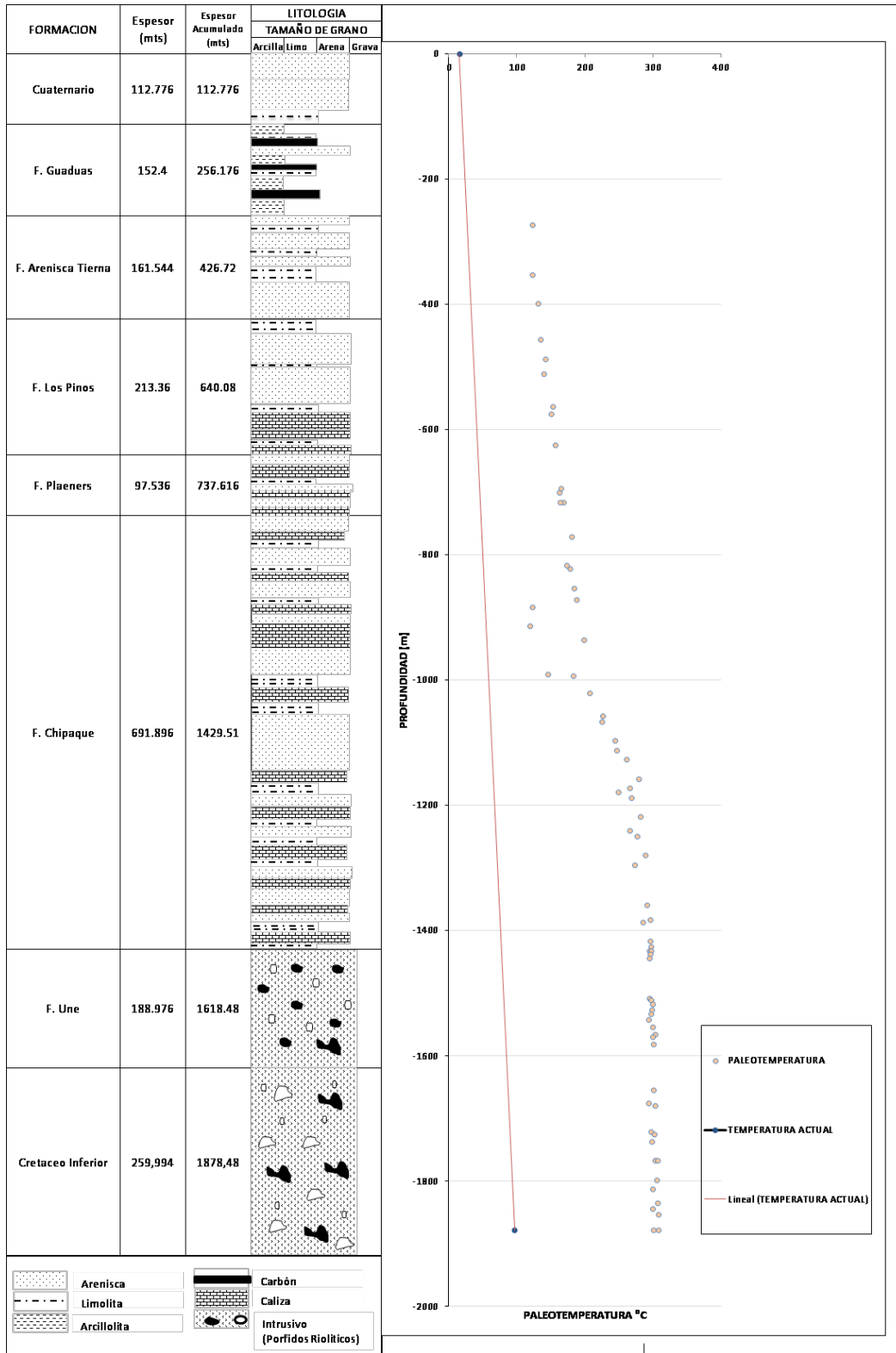


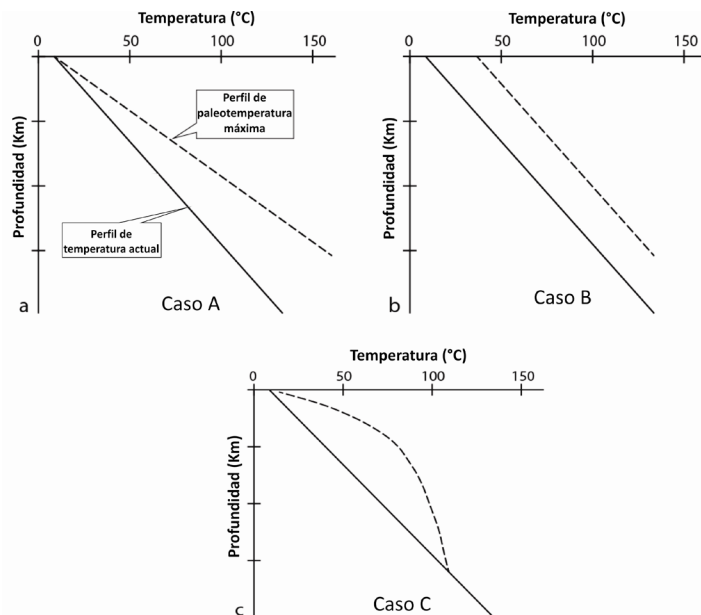
Figura 4. Estratigrafía, gradiente geotérmico actual y Paleogeoterma del pozo Tamauka-1.

*Pozo Tamauka-1*: el pozo Tamauka-1 se ubica en el municipio de Iza, Departamento de Boyacá (Fig. 1). La paleogeoterma de este pozo genera un quiebre entre los 800 y 1000 m, mostrando un incremento en la temperatura de carbonificación a mayores profundidades (Fig. 4). La descripción del pozo permite saber que justo donde se presenta la inflexión en la geoterma, se presentan trazas de espejo de falla, indicando la presencia de una zona fallada. La paleotemperatura también se mantiene alta después de los 1600 m; donde la perforación intercepta un pórfido riolítico asociado con las fuentes termales de Iza (Fig. 4).

En la mayoría de los pozos, las geotermas actuales no presentan paralelismo con las paleogeotermas, por lo que se concluye que en muchos de los pozos el enterramiento no fue la única causa de metamorfismo del carbón y las arcillas. Muchos autores han observado dicha anomalía o falta de paralelismo y han sugerido diferentes explicaciones para su origen (Mariño, 2007; Hower&Gayer, 2002; Oliver, 1986). En términos generales, se han planteado tres hipótesis para explicar las anomalías en la  $R_0$  y en la temperatura:

- En el pasado se presentó una cobertera adicional que ha sido erosionada posteriormente;
- Calentamiento conductivo por intrusiones ígneas
- Calentamiento por advección de aguas subterráneas hidrotermales que pasaron a través de grietas y poros en las rocas.

Bray *et al.* (1992) presentaron tres ejemplos hipotéticos de paleogeotermas representando estos modelos (Fig.5). En el caso A, la máxima temperatura se debe al influjo de calor a la base de la cuenca, tal vez a causa de la presencia de intrusiones ígneas. En el caso B, las temperaturas máximas se obtuvieron durante el máximo enterramiento; posteriormente, los estratos fueron exhumados y enfriados. En el caso C, las máximas temperaturas se obtuvieron por el paso de fluidos calientes a través de acuíferos dentro de la sección estratigráfica. En los casos A y B se producen paleogeotermas que son lineales; la primera resulta en una pendiente mayor que la geoterma actual, mientras que la segunda produce una paleogeoterma que es paralela a la geoterma actual, pero desfasada a mayor temperatura. En el caso C resulta una curva que es cóncava hacia abajo.



**Figura 5.** Casos hipotéticos que ilustran la estimación de gradientes paleogeotérmicos y las causas de las fuentes de calor. (a) Calentamiento fue causado por el incremento de flujo basal. (b) Calentamiento fue causado por enterramiento previo al enfriamiento causado por levantamiento y erosión. (c) Calentamiento fue causado por el paso de fluidos calientes a través de la parte superior de la sección (acuífero). Modificado de Bray *et al.* (1992).



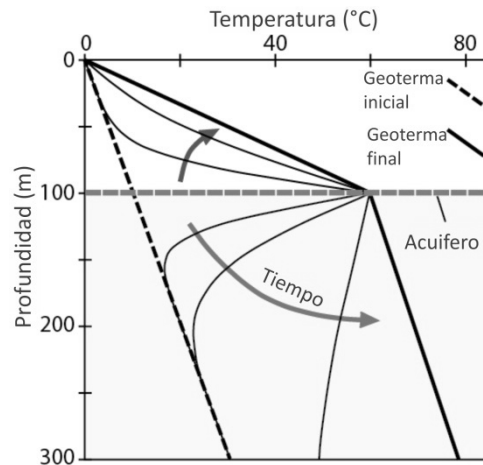
El análisis detallado de los seis pozos estudiados plantea diferentes fenómenos geológicos que ocurrieron durante la evolución de la Cuenca Cordillera Oriental de Colombia. En el pozo Samacá, al comparar el gradiente geotérmico actual y la paleogeoterma (Fig. 3), se puede notar un paralelismo entre ellas, lo que podría explicarse como un fenómeno donde el mayor calentamiento fue normal, causado por el enterramiento; posteriormente, el levantamiento orogénico y la erosión causaron el enfriamiento de las rocas tal, como lo registra la geoterma actual (Fig. 5b).

En los pozos Chiguatá y Suesca Norte 1 se observa que la paleogeoterma tiene una pendiente mayor que la geoterma actual (Fig. 3), el fenómeno que ocurrió en el pasado y generó máximas temperaturas de carbonización en la materia orgánica de este pozo puede relacionarse con el primer caso hipotético planteado por Bray *et al.*, (1992) (Fig. 5a), respecto a que el calentamiento fue causado por un período de flujo de calor de alto gradiente geotérmico, que podría relacionarse con actividad magmática de los plutones de Iza, Paipa, y otros, o de aumento de temperatura a profundidad.

La paleogeoterma del pozo Tamauka-1 muestra una inflexión en una zona fracturada, cerca de la intrusión de un pórfido riolítico, indicando un mayor metamorfismo de la materia orgánica posiblemente relacionada con el flujo de un sistema hidrotermal que aún está presente en la zona. Esto correspondería al tercer caso hipotético planteado por Bray *et al.* (1992) (Fig. 5c), que plantea una inflexión causada por el paso de fluidos a través de un acuífero. La inflexión en la paleogeoterma del Tamauka 1 no se puede explicar por el flujo de calor desde abajo o por enterramiento. Se propone que esta es consecuencia de la advección de fluidos hidrotermales a través de fallas. El calentamiento de los fluidos se generó por el contacto de las aguas con el cuerpo ígneo riolítico detectado en la perforación y aflorante en el área de Iza. La presencia de espejos de falla indica la actividad de una paleofalla, por la que se presentaron movimientos de fluidos hidrotermales que se generaron con el calentamiento de las aguas resi-

duales al contacto con el cuerpo ígneo que se presenta en la zona.

Los pozos Cormichoque y Corrales presentan paleogeotermas casi verticales y diferentes a los modelos planteados por Bray *et al.* (1992). Esa tendencia vertical y aún negativa, como se infiere en el pozo Corrales, se asocia con el flujo de fluidos en sistemas activos de energía geotérmica, planteado por Ziagos & Blackwell (1986) (Fig. 5), por lo que se plantea la hipótesis de que los pozos se encuentran en un estado transitorio, mostrando una etapa de su desarrollo que estuvo próxima a encontrar el equilibrio. Este proceso pudo ser generado por la presencia de un acuífero(s) en la zona, mediante el cual hubo transferencia de calor a las rocas adyacentes, favoreciendo la carbonificación de rocas con contenido de materia orgánica. El hecho de que los gradientes en los pozos Corrales y Cormichoque sean cercanos a la vertical y no alcanzaron el paralelismo con el gradiente actual, sugiere que el flujo que cambió el gradiente fue de corta duración. Ziagos & Blackwell (1986) demostraron que el tiempo necesario para pasar de un estado transitorio a un estado de equilibrio en perfiles térmicos en torno a un acuífero superficial que transporta un fluido caliente es geológicamente corto (menos de 100.000 años), por lo que un gradiente paleogeotermal vertical o negativo por debajo de un acuífero puede ser diagnosticado como producto de efectos térmicos transitorios (Fig.6).



**Figura 6.** Curva de la evolución hipotética de la temperatura a través del tiempo versus la profundidad. Aplica para el caso C de la Fig5. Modificado de Ziagos & Blackweel (1986).

La actividad ígnea de los plutones de Paipa, Iza, y otros, y el flujo regional producto del gradiente hidráulico, causado por la Orogenia Andina, posiblemente calentaron el agua y la hicieron fluir, ayudados por el fracturamiento dentro de las formaciones de la cuenca, causando una metamorfismo o renovación de la maduración de la materia orgánica, más allá de lo que se podría explicar solo con enterramiento.

En el caso de la Cuenca Cordillera Oriental y Llanos, varios estudios sugieren que los valores de Reflectancia de la vitrinita podrían no ser causados exclusivamente por el paleoenterramiento. En la Cuenca de los Llanos, la presencia de un sistema de flujo de aguas subterráneas ha complicado la exploración del petróleo, biodegradando algunos campos de petróleo e impactando la posición del contacto agua-petróleo. El sistema de flujo parece estar causado por las sobrepresiones de las partes elevadas de la cuenca que causan movimiento de fluidos de las partes altas donde reciben recarga hacia las partes más bajas con aumento progresivo del gradiente térmico de 25 a 55 °C/km (Bachu *et al.*, 1995). El paso de paleofluidos en las formaciones del borde llanero, con temperaturas de homogenización que fluctúan entre 170 y 230°C como producto de la expulsión de fluidos intersticiales por carga litostática, ha sido documentado por Prada & Quintero (2004), y Calderón y Blanco (2004) utilizando inclusiones de fluidos. Un fenómeno similar de flujo se pudo haber presentado en la parte central de la Cordillera Oriental en el pasado causando flujo hidrotermal y alterando las paleogeotermas. Person *et al.* (2012) reportan sobrepresión en la parte occidental de la Cuenca de los Llanos y lo explican por influjo de fluidos proveniente del cinturón plegado y fallado de la Cordillera Oriental.

El modelo de flujo regional que se presenta en la Cuenca Llanos y en otras cuencas como Illinois (Bethke & Marshak, 1990, Mariño, 2007) pudo haberse presentado en la Cordillera Oriental por, efectos topográficos de la Orogenia Andina, zonas de fractura y acción de intrusivos, dando lugar a migración de fluidos cambiando el rango de la materia orgánica y, posiblemente, afectando y

transportando los hidrocarburos convencionales y no convencionales. El análisis de las paleogeotermas a partir de Reflectancia de la vitrinita indica anomalías en los gradientes que podrían estar relacionados con paleoflujos que pudieron haber afectado y transportado los hidrocarburos. Más específicamente en pozos petrolíferos localizados en la parte central de la Cordillera Oriental como, Cormichoque, Suesca y Tamauka, donde se encontraron evidencias de flujo de calor adicional al esperado por, enterramiento y por intrusiones solamente (Pedraza, 2010). Estos hallazgos pueden ser un inicio para explicar la hipótesis de que algunos crudos pesados como los de campo Rubiales y regiones circunvecinas a donde han migrado de la Cordillera Oriental hacia los Llanos (Person *et al.*, 2012; Bachu *et al.*, 1995).

Nuestro estudio ha mostrado que el movimiento regional del agua subterránea ha afectado las paleotemperaturas de pozos en diferentes lugares de la Cordillera Oriental, y que el flujo no puede ser desconocido en la búsqueda de hidrocarburos. Nuestro estudio tiene algunas limitaciones en el sentido que, los pozos disponibles no llegan hasta el piedemonte de la Cuenca Llanos, no se hizo un modelamiento matemático para demostrar el movimiento de los fluidos y el comportamiento de las temperaturas desde la Cuenca Cordillera Oriental hacia la Cuenca Llanos. Esta hipótesis podría ser, adicionalmente, puesta a prueba con estudios posteriores utilizando reflectancia de la vitrinita, diagénesis, y otros paleotermómetros como inclusiones de fluidos, isótopos, y modelamiento matemático a través de pozos que tengan la orientación preferencial Este-Oeste, ya que se esperarían flujos regionales hacia la Cuenca Llanos como producto de la orientación tectónica Norte-Sur de la Cordillera Oriental.

## 5. Conclusiones

El análisis de la reflectancia de la vitrinita de los pozos confirma la presencia de anomalías en el rango de la materia orgánica en la parte central de la Cuenca Cordillera Oriental. En los pozos de la parte central del Departamento de Boyacá (Cormichoque,

Corrales y Tamauka 1) la irregularidad de la paleogeoterma se puede explicar a partir de procesos hidrotermales asociados posiblemente con intrusiones y/o paleoflujo regional.

El modelo de flujo regional que se presenta en la Cuenca Llanos pudo haberse presentado en la Cordillera Oriental por efectos topográficos de la Orogenia Andina y por la acción de intrusivos, cambiando el rango de la materia orgánica y, posiblemente, afectando y transportando los hidrocarburos.

La hipótesis de flujo regional podría ser puesta a prueba con estudios posteriores de, diagénesis, y otros paleotermómetros como inclusiones de fluidos, isótopos y modelamiento matemático a través de pozos que tengan la orientación preferencial Este-Oeste.

## 6. Agradecimientos

Se reconoce el apoyo económico de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, de Colciencias y de la ANH (Agencia Nacional de Hidrocarburos) a través del proyecto de Investigación 669 de 2009, titulado “Actualización y ampliación del laboratorio de materiales para análisis de carbón, gas asociado al carbón y Shales gas”, y a través del proyecto 014 de 2014 con el SGC

## 7. Referencias bibliográficas

Alfaro C., Alvarado I., Quintero W., Hamza W., Vargas C. & Briceño L. (2009). *Mapa preliminar de gradientes geotérmicos de Colombia*. Publicaciones especiales INGEOMINAS-ANH. <http://aplicaciones1.ingeminas.gov.co/sicat/html/Metadato.aspx?CID=191728>

Amaya E., Mariño J. & Jaramillo C. (2010). Litofacies y ambientes de acumulación de la formación guaduas en la parte central de la Cordillera Oriental – implicaciones paleogeográficas. *Boletín de Geología*. 32 (1), 13-25.

ANH. (2008). *Cartografía geológica cuenca Cordillera Oriental- sector Soapaga*. Geoestudios.

[http://www.anh.gov.co/media/metodos%20superficie/Petrografia\\_y\\_petrofisica\\_Soapaga\\_2007.pdf](http://www.anh.gov.co/media/metodos%20superficie/Petrografia_y_petrofisica_Soapaga_2007.pdf)

ANH. (2010). *Ronda Colombia*. <http://www.anh.gov.co/es/index.php?id=172>

ASTM Annual Book of Standards, (2004). *Standard practice for preparation of coal samples for microscopical analysis by reflected light*. v. 05.06, designation D2785-D2797 - 85. p. 296-299.

ASTM Annual Book of Standards, (2004), *Standard test method for microscopic determination of the reflectance of vitrinite in a polished specimen of coal*. v. 05.06, designation D2798 – 99, p. 301-304.


Audemard F., Vargas C., Hellweg P., Ordáz M. & Ugalde A. (2009) *Organic geochemistry atlas of Colombia*. E.U. and GEMS Ltda, Atlas Geoquímico. Bogotá: ANH-Universidad Nacional De Colombia, Geología.

Bachu, S., Ramon, J.C., Villegas, M., & Underschultz, J.R (1995). Geothermal regime and thermal history of the Llanos Basin, Colombia. *AAPG Bulletin* 79 (1), 116-129.

Barker, C.E., & M.J. Pawlewicz. (1986). *The correlation of vitrinite reflectance with maximum temperature in humic organic matter*. In: G. Buntebarth and L. Stegena, eds., *Paleogeothermics: Springer Science+Business Media, Lecture Notes in Earth Sciences* 5. Berlin, Germany, p. 79-93.

Barker, C.E. & M.J. Pawlewicz. (1994). *Calculation of vitrinite reflectance from thermal histories and peak temperatures, a comparison of methods*. In: P.K. Mukhopadhyay and W.G. Dow, eds., *Vitrinite reflectance as a maturity parameter, applications and limitations: American Chemical Society, ACS. Symposium Series 570*, Washington, D.C., USA., p. 216-229.

- Barrero, D., Pardo, A., Vargas, C., & Martinez, J.F., (2007), *Colombian Sedimentary Basins: nomenclatura, boundaries and petroleum geology, a new proposal*. 92p. ANH document found at the website [http://www.anh.gov.co/media/salaprensa/Colombian\\_sedimentary\\_basins.pdf](http://www.anh.gov.co/media/salaprensa/Colombian_sedimentary_basins.pdf).
- Bethke, C.M., & Marshak, S., (1990), Brine migrations across North America: the plate tectonics of groundwater. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 18 (1), 287-315.
- Bray, R.J., Green, P.F. & Duddy, I.R. (1992). Thermal history reconstruction using Apatite Fission Track Analysis and vitrinite reflectance: a case study from the UK East Midlands and Southern North Sea. In. Exploration Britain: Geological insights for the next decade. Hardman, R.F.P., (ed), *Geological Society Special Publication* 67, 3-25.
- Calderón, H., & Blanco, R. (2004). *Estudio estructural y petrográfico de inclusiones fluidas y su relación con el flujo de fluidos, en la secuencia sedimentaria del Cretácico y Terciario aflorante en el sector de la vía Recetor-Aguazul* (Dpto. de Casanare). Tesis de pregrado. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia.
- Contreras D.A. & Jaramillo J.M. (2009). *Caracterización mineralógica de las rocas que componen el cuerpo volcánico que aflora en cercanías al municipio de Iza, Boyacá, Colombia Petrografía, metalografía y análisis elemental por medio de un microscopio electrónico de barrido*. Artículo de Memorias del XII Congreso Colombiano de Geología. Paipa-Boyacá, Colombia.
- Fabre, A. (1985). *Subsidencia y maduración de la materia orgánica; un modelo de la evolución de la cordillera oriental y los Llanos Orientales durante el cretáceo y el terciario (Colombia)*. Artículo presentado al VI Congreso Latinoamericano de Geología. Bogotá, Colombia.
- Hower, J.C., & Gayer, R.A., (2002). Mechanism of coal metamorphism: case studies from Paleozoic coalfields. *International Journal of coal geology* 50 (1-4), 215-245.
- Mariño, J. (2007). *Paleogeothermal conditions in the illinois basin during late paleozoic coalification*. Ph.D Thesis, Universidad de Illinois Urbana-Champaign, Illinois, USA.
- Oliver, J., (1986), Fluids expelled tectonically from orogenic belts: their role in hydrocarbon migration and other geologic phenomena. *Geology* 14 (2), 99-102.
- Pedraza S.P. (2010). *Determinación e interpretación de las paleogeotermas de la parte central de la cordillera oriental (implicaciones en la calidad del carbón)*. Tesis de pregrado Escuela de Ingeniería Geológica, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Sogamoso, Colombia.
- Person, M., Butler, D., Gable, Carl., Villamil, T., Wavrek., D., & Schelling, D., (2012). Hydrodynamic stagnation zones: A new play concept for the Llanos Basin, Colombia. *AAPG Bulletin* 96. (1), 23-41.
- Prada, D., y Quintero, I., (2004). *Estudio estructural de fracturas y análisis de inclusiones fluidas en materiales de relleno de venas, en las rocas aflorantes de la transecta Santa María-San Luis de Gaceno (Departamento de Boyacá, borde oriental de la Cordillera oriental): implicaciones paleohidrogeológicas*. Tesis de pregrado. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia.
- Rowan E. L., Goldhaber, M. B., & Hatch, J.R. (2002). Regional fluid as a factor in the thermal history of the Illinois Basin: Constrains from fluid inclusions and the maturity of Pennsylvanian coals. *AAPG Bulletin* 86 (2), 257-277.
- Sarmiento G. (1994). Estratigrafía y medios de depósito de la Formación Guaduas. *Boletín Geológico* 32 (1), 1-3. Servicio Geológico Colombiano.
- Ulloa, C., & Rodríguez, E, (2003). *Memoria plancha 172 Paz de Río*. Ingeominas. Bogotá, Colombia.

Guerrero, A. (1993). Informe sobre  Cuenca Petrolífera de la Sabana de Bogotá, Colombia. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia

Ziagos, J.P., & Blackwell, D.D. (1986). A model for transient temperature geothermal systems. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 27 (3-4), 371-397.



Revista Ingeniería y Competitividad por Universidad del Valle se encuentra bajo una licencia Creative Commons Reconocimiento - Debe reconocer adecuadamente la autoría, proporcionar un enlace a la licencia e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo de cualquier manera razonable, pero no de una manera que sugiera que tiene el apoyo del licenciador o lo recibe por el uso que hace.