

## Stratigraphy and petroleum possibilities of Los Humocaros-El Tocuyo Region, Lara State, Venezuela

Giuseppe S. Malandrino<sup>1,2</sup> y Marcos E. Escobar<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Post-Grado de Geología Petrolera, Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia,  
Maracaibo, Venezuela. E-mail: malandrino@iamnet.com

<sup>2</sup>Departamento de Geología, Instituto Universitario de Tecnología "Don Rómulo Gallegos",  
Maracaibo, Venezuela.

<sup>3</sup>INZIT-CICASI, Km. 15 vía La Cañada, Apdo. 1114. Maracaibo, Venezuela.  
E-mail: escomar@cantv.net

### Abstract

Geological Mapping of a 900 km<sup>2</sup> area at the Los Humocaros-El Tocuyo region, the State of Lara, Venezuela, leads to the identification of ten outcropping units, together with the anticlinorium of the eastern flank of the Barbacoas Platform and four main regional faults (from east to west, Hato Viejo, Humocaros, Tocuyo and Boconó faults). The heteropic relationship between the Palaeocene and Eocene formations was established; the precise location of the overthrusting of the allochthonous rocks identified (Barquisimeto Formation) and the location of the main underground structures over the central-eastern section of the area under study, including the prediction of potential hydrocarbon traps, were determined. The potential source rocks of the Aguardiente, La Luna and Colón formations outcropping on the Los Humocaros-El Tocuyo sedimentary section was evaluated by means of Rock-Eval pyrolysis. The results indicate overmature source rocks of the units studied. TTI maturity model establishes the beginning of the oil window on Late Palaeocene-Early Eocene age, with the main generation and expulsion at the Late Oligocene-Miocene epoch. As a consequence of a compressive tectonic event which occurred in Late Eocene-Oligo-Miocene, the existence of oil traps with petroleum feeding across great inverse faults was postulated. Recent tectonic episodes reported on the Mio-Pliocene and Quaternary periods, could affect the oil accumulation in terms of their redistribution or their loss by surface migration as oil seeps.

**Key words:** Los Humocaros-El Tocuyo, geology, source rock, Rock-Eval pyrolysis, TTI maturity.

## Estratigrafía y posibilidades petrolíferas de la región de Los Humocaros-El Tocuyo, Edo. Lara, Venezuela

### Resumen

Un levantamiento geológico sobre 900 km<sup>2</sup> (Los Humocaros-El Tocuyo, Estado Lara, Venezuela), permitió identificar diez formaciones aflorantes, el anticlinorio del borde oriental de la plataforma de Barbacoas y cuatro fallas de gran desarrollo regional (de este a oeste, Hato Viejo, Humocaros Bajo, El Tocuyo, y Boconó). Se establecieron las relaciones heterópicas entre las formaciones paleocenas y eocenas; la ubicación del sobrecorrimiento de la masa alóctona allí presente (Formación Barquisimeto); y la definición de las estructuras (trampas potenciales de hidrocarburos) en el subsuelo del sector centro-oriental de la región de estudio. Se evaluaron las rocas madres prospectivas (Aguardiente, La Luna y Colón) utilizando pirólisis Rock-Eval. Los resultados arrojaron un nivel de madurez térmica muy elevado. El modelo TTI de Lopatin estableció que las rocas madres potenciales del Cretáceo entraron en la ventana del petróleo du-

rante el Paleoceno Tardío-Eoceno, alcanzando su máxima producción y expulsión durante el Oligoceno Tardío-Mioceno. Considerando un evento tectónico compresivo entre el Eoceno Tardío y el Oligo-Mioceno, se postula la existencia de trampas capaces de almacenar volúmenes importantes de crudos generados durante el Oligoceno, con alimentación de las trampas a través de las grandes fallas inversas. Acontecimientos tectónicos posteriores (Mio-Plioceno y Cuaternario) pudieron haber favorecido la redistribución de las acumulaciones o su pérdida en superficie.

**Palabras clave:** Los Humocaros-El Tocuyo, geología, roca madre, pirólisis Rock-Eval, madurez TTI.

## Introducción

La región de Los Humocaros-El Tocuyo, en el Estado Lara (Figura 1), representa un área de gran complejidad tectónico-estructural. Se ha mencionado, en la misma, la presencia de dos provincias geodinámicas distintas; la parte autóctona, o borde oriental de la Plataforma de Barbacoas, y una masa alóctona [1-3]. En esta región, se han reportado evidencias de varios eventos de tectónica compresiva y distensiva, sobrepuestos en el tiempo geológico, desde el Eoceno Tardío hasta el Plioceno-Reciente, como consecuencia de la interacción entre las placas tectónicas del Caribe y Sudamérica [1, 2]. Del punto de vista de la geología petrolera, tales eventos pudieron conducir a la formación de estructuras favorables para la acumulación de petróleo. La posibilidad de contar con rocas almacén y rocas sello en la columna estratigráfica de esta zona, así como la presencia en la misma de la Formación La Luna, roca generadora de hidrocarburos [4, 5], impulsó la realización del presente estudio. El objeto es el de reconocer las formaciones geológicas aflorantes y sus relaciones estratigráfico-estructurales, proponer un modelo estructural del subsuelo en el área de interés y, además, establecer el potencial petrolífero de la región, donde se presume la posible generación de crudo, en algún momento de la historia geológica. Esta suposición está soportada por la existencia, en el área de interés, de la Formación La Luna, constituida por calizas y lutitas calcáreas negras, ricas en materia orgánica, de edad Cenomaniense-Coniaciense. Esta unidad ha sido establecida en el occidente del país como la principal roca madre del petróleo presente [4-8]. Como una justificación adicional, no se ha encontrado en la literatura evidencias acerca de la realización de alguna investigación reciente de carácter geológico o petrolífero sobre la zona bajo consideración en el presente estudio.

## Trabajos Geológicos Previos

El interés prevaleciente de la mayoría de los trabajos geológicos realizados en el área de Los Humocaros-El Tocuyo [9-17] se ha concentrado específicamente sobre las rocas autóctonas aflorantes y pertenecientes a la Plataforma de Barbacoas y sus áreas limítrofes; mientras que otros investigadores [18-27] se han preocupado más bien de discutir el origen del aspecto caótico del Surco de Barquisimeto y las relaciones entre autóctono y alóctono presentes en el ámbito geodinámico a nivel de placa tectónica.

Como principales conclusiones alcanzadas por estos estudios, cabe mencionar que la secuencia estratigráfica en el área de interés, se compone de un basamento Precámbrico-Paleozoico cubierto por una secuencia sedimentaria del Mesozoico y Cenozoico. El basamento está constituido por molasas de edad posiblemente Jurásico Temprano a Medio (Fm. La Quinta) y por rocas ígneo-metamórficas paleozoicas o más antiguas. La cobertura sedimentaria comienza con una secuencia marina continua desde el Neocomiense hasta el Eoceno Medio-Tardío.

El espesor del conjunto Cretáceo-Paleoceno en el área de estudio es aproximadamente de 1.600 m; el Eoceno solo, sobrepasa los 2.000 m, y el resto de la cobertura sedimentaria, esta conformada por terrazas con aluviones (Cuaternario-Reciente).

La Plataforma de Barbacoas, ubicada en la Provincia de Surco definida por Zambrano *et al.* [27], supone una probable protuberancia de la plataforma continental durante el Ciclo Terciario Inferior (Paleoceno-Eoceno Tardío) [28].

En el borde oriental de dicha plataforma, correspondiente al área de interés del presente estudio, se desarrollaron ambientes costeros marginales con prominentes arrecifes, que controlaron en parte la depositación de las Formaciones Humocaro y Quebrada Arriba [28].

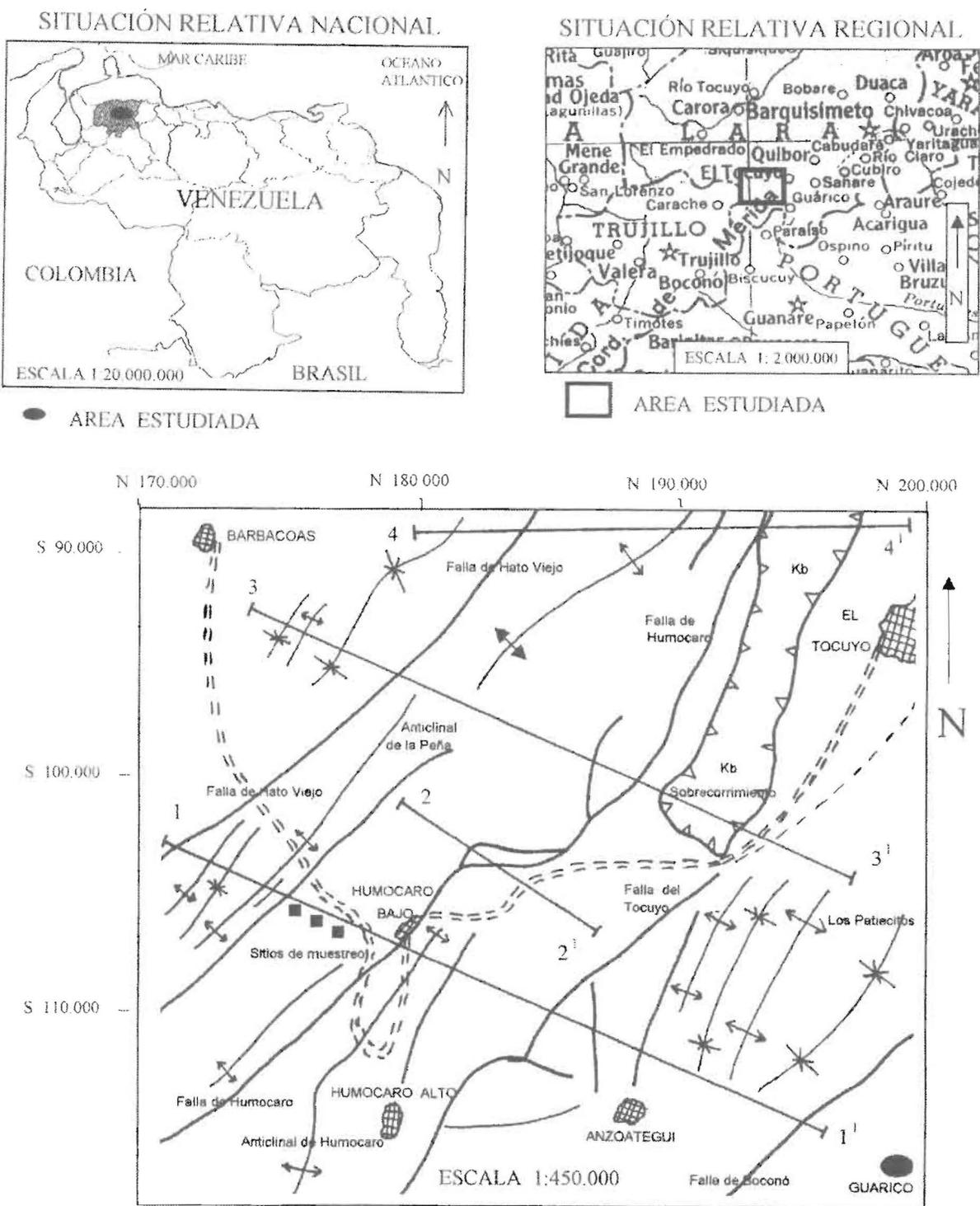


Figura 1. Mapa de la región Los Humocaros-El Tocuyo. Incluye las principales estructuras, localización de los cortes estructurales y ubicaciones de muestras para estudios geoquímicos indicadas con el símbolo ■.

Como estructura principal en la zona de trabajo, ha sido establecido el anticlinorio cerrado de La Peña, ubicado en el borde oriental de la Plataforma de Barbaças con una extensión areal de aproximadamente 500 Km<sup>2</sup>, cuyo eje principal apunta hacia el N-NE, con buzamiento hacia el E-SE; y cuatro fallas de gran desarrollo regional (Hato Viejo, al noroeste; Humocar Bajo, al centro; El Tocuyo, al centro-oeste; y Boconó, en el sector suroccidental del área de estudio) [3].

Con respecto a la tectónica general y a los elementos estructurales presentes, las principales conclusiones alcanzadas por los autores citados en la página precedente son:

- Presencia de tectónica compresiva (fallas inversas, fallas flexurales y sobrecorrimientos), establecida a lo largo de la falla de Humocar Bajo y del Corrimiento de Carora-El Tocuyo, de las masas alóctonas (Fm. Barquisimeto) sobre el autóctono andino [1, 3]. La edad del evento compresivo se ubica entre el Eoceno Tardío y el Oligo-Mioceno, dejando abierta la posibilidad de que el material alóctono (proveniente del norte-noreste) haya comenzado su desplazamiento probablemente durante el Eoceno Temprano [1].
- Presencia de tectónica distensiva (fallas normales) reconocida a lo largo de las fallas de Hato Viejo, Río Tocuyo y Boconó. Durante este episodio, probablemente se formaron depresiones orientadas según una dirección NE-SO, como por ejemplo la depresión de Yaracuy [25]. Estos eventos son de edad Mio-Plioceno.
- Presencia de tectónica compresiva, asociada a fallas transcurrentes dextrales como son las fallas de El Tocuyo y Boconó [23, 26]. Como consecuencia de este tercer evento, se ha propuesto la génesis de la depresión de El Tocuyo, la cual se alinea según una dirección N-S durante más de 15 Km., con ancho de 7 Km. Probablemente, ella corresponda a una cuenca de tracción (pull-apart), desarrollada entre dos fallas de rumbo N-S y tendencia siniestral, ubicadas al norte y sur de la ciudad de El Tocuyo [25]. La falla de Río Tocuyo, subparalela a la falla de Boconó, aflora entre la localidad de Berlín (16 Km al SO de El Tocuyo) y el Km 50 de la carretera

Barquisimeto-El Tocuyo. En Berlín, esta estructura corta un cono de deyección cuaternario [2]. Este episodio de tectónica compresiva ha sido datado como Plio-Cuaternario a Reciente.

## Parte Experimental

Se realizó un levantamiento geológico sobre un área de 900 Km<sup>2</sup> utilizando como mapa base el del Ministerio de Energía y Minas en escala 1:50.000 de la región Carache-Los Humocaros [29]. El trabajo geológico de campo incluyó mediciones de rumbo, buzamiento, espesores y estructuras, recolección de muestras para estudios geoquímicos y definición de las principales relaciones estratigráficas entre las formaciones aflorantes. Como resultado, se construyó un mapa base a escala 1:450.000 (Figura 1), incluyendo cuatro cortes geológicos representativos de las estructuras presentes en superficie y las propuestas a nivel de subsuelo (Figura 2), y la columna estratigráfica generalizada de la región objeto de estudio (Figura 3) con su respectiva leyenda (Tabla 1).

La Figura 1 de este trabajo, por medio del símbolo ■, incluye la localización de las muestras de rocas madres, las cuales fueron analizadas a través de las técnicas de medición de carbono orgánico total (COT) y de pirólisis Rock-Eval [30] en los Laboratorios de la Gerencia de Ciencias de La Tierra en Intevep, S.A. Posteriormente, se utilizó el modelo de madurez térmica TTI [32] para postular la evolución geoquímico-orgánica del área de estudio en términos de la maduración térmica de las rocas madres prospectivas. A continuación, se presenta una breve descripción de las actividades realizadas.

### Carbono Orgánico Total (COT)

Se recolectaron nueve muestras sin evidencias aparentes de meteorización, representativas de los intervalos geológicos con mejores características de rocas madres. Las rocas fueron enviadas a Intevep S.A. para su análisis geoquímico. El procedimiento analítico para la determinación de COT, consistió en una pulverización previa de las rocas a un tamaño inferior a 150 mallas (0,1 mm); un tratamiento previo de una alícuota de roca pulverizada con solución de ácido clorhídrico 2N

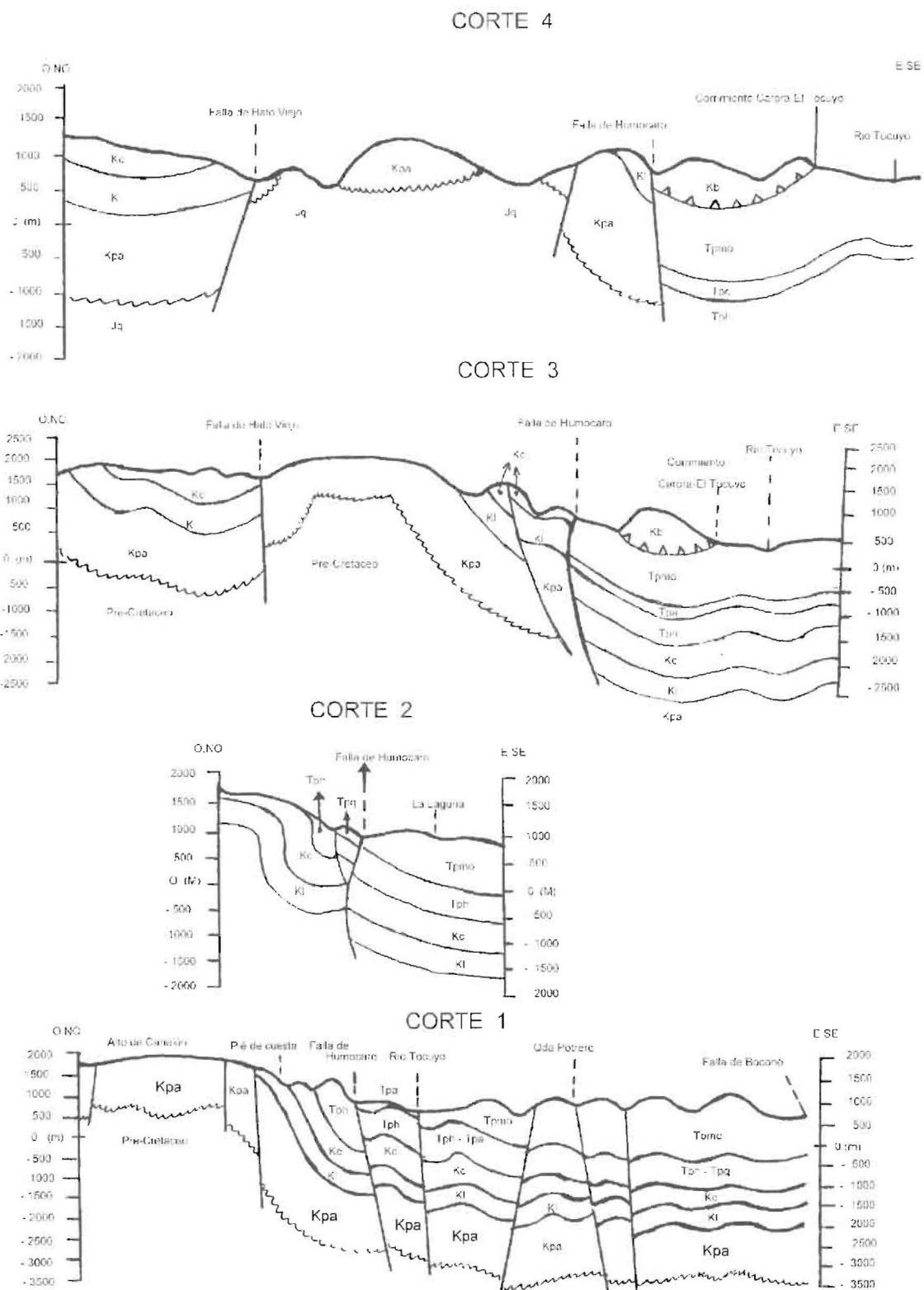


Figura 2. Cortes representativos de las estructuras presentes en superficie y propuestas a nivel de subsuelo en la región Los Humocaros-El Tocuyo, Edo. Lara, Venezuela.

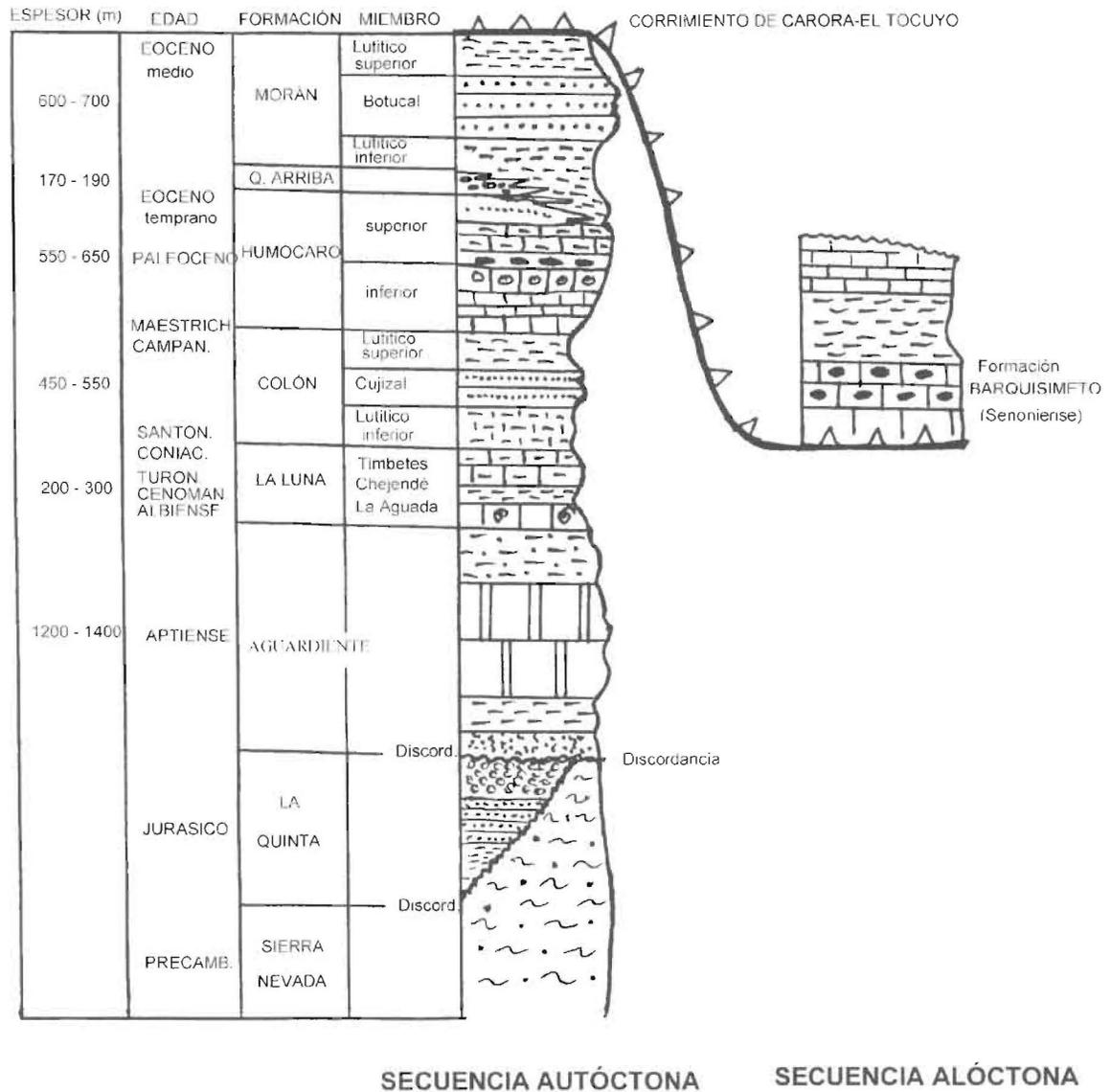


Figura 3. Esquema de las relaciones estratigráficas: Columna estratigráfica generalizada de la región Los Humocaros-El Tucuyo, Edo. Lara, Venezuela.

por tres horas, para la eliminación de carbonatos; y posterior análisis en un determinador de carbono marca Leco, modelo EC-12, el cual consta de un horno de inducción que realiza la combustión de la roca bajo una atmósfera de oxígeno; y detección y cuantificación del CO<sub>2</sub> liberado por medio de una celda de infrarrojo. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 2.

**Pirólisis Rock-Eval**

El calentamiento progresivo de pulverizados de rocas fuentes en una atmósfera inerte, bajo un gradiente seleccionado de temperatu-

ras, en un instrumento que asemeja un cromatógrafo de gases, produce la liberación inicial del bitumen absorbido en la roca, el cual es registrado sobre un detector de ionización a la llama en forma de una sola señal denominada S1, la cual representa los miligramos de hidrocarburos que pueden ser liberados térmicamente a partir del calentamiento de un gramo de roca pulverizada. La segunda señal detectada (S2) en el pirograma, corresponde a los miligramos de hidrocarburos generados por la degradación pirolítica del kerógeno presente en un miligramo de roca.

Tabla 1  
Leyenda estratigráfica de la región Los Humocaros-El Tocuyo, Edo. Lara.

Qal	ALUVION	Conglomerados y Brechas a veces englobados en matriz arenosa y arcillosa.
Qpt	TERRAZA (Cuaternario-Reciente)	
Tpmo	Fm. MORAN (Paleoceno-Eoceno Medio)	<p><b>TpmoLS</b>= Miembro Lutítico Superior (lutitas negras y grises con bioturbaciones).</p> <p><b>TpmoBO</b>= Miembro Botucal (arenisca blanca del tipo ortocuarcita).</p> <p><b>TpmoLI</b>= Miembro Lutítico Inferior (lutitas grises con granos de cuarzo, olistolitos de caliza y foraminíferos bentónicos).</p>
Tpq	Fm. QUEBRADA ARRIBA (Paleoceno-Eoceno Medio)	Chamosita oolítica rojo oscuro y lutitas ricas en equinoides con calizas biohémicas foraminíferas.
Tph	Fm. HUMOCARO (Paleoceno)	Caliza con foraminíferos y algas calcáreas (M.Sup.) y Caliza detritica con ostras, foraminíferos y "Venericardia" (M.Inf.).
Kc	Fm. COLON (Cretáceo Tardío)	Lutitas negras ferruginosas (M. Sup.); Areniscas cuarzosas (M. Cujisal); Lutitas negras (M. Inf.).
Kb	Fm. BARQUISIMETO (Cretáceo Tardío)	Bloques alóctonos cretáceos desplomados en lutitas, margas compactas, fanitas y calizas de color gris oscuro a negro.
Kl	Fm. LA LUNA (Cretáceo Tardío)	<p><b>M. Timbetes</b>= Calizas y lutitas con abundantes láminas de fanita negra, amonitas y foraminíferos pelágicos.</p> <p><b>M. Chejendé</b>= Lutitas con margas y calizas concrecionarias con amonitas.</p> <p><b>M. La Aguada</b>= Calizas concrecionarias con restos de peces y foraminíferos planctónicos, y a la base caliza nerítica con amonitas.</p>
Kpa	Fm. AGUARDIENTE (Cretáceo Temprano-Medio)	Lutitas negras con "Orbitolina" en la parte alta y areniscas con calizas a la base.
Jq	Fm. LA QUINTA (Jurásico)	Limolitas rojas que alternan con capas gruesas de conglomerado con guijarros bien redondeados de cuarzo, cuarcita y caliza del Carbonífero.
Peis	Fm. SIERRA NEVADA (Pre-Cámbrico)	Filitas, esquistos y gneises localmente meteorizados.

La tercera señal (S3), medida a través de un detector de conductividad térmica, indica los miligramos de CO<sub>2</sub> generados a partir de un gramo de roca, y es una medida de la concentración de oxígeno presente en el kerógeno de la roca madre.

Las relaciones S2/COT y S3/COT tienen correlación, respectivamente, con los cocientes atómicos H/C y O/C utilizados en el diagrama de van Krevelen [34] para reconocer el tipo de kerógeno y el nivel de madurez térmica de la roca madre. Este último dato puede ser también estima-

Tabla 2  
Resultados de COT y pirólisis Rock-Eval, para las rocas madres estudiadas

Formación	Muestra	COT %	C <sub>Min</sub> %	T max °C	S1 Kg/ton	S2 Kg/ton	S3 Kg/ton	Hc/COT mg/g	IH mg/g	IO mg/g
Aguardiente	PA-0	1,37	0	n.d.	0	0	0,50	0	0	36,5
	PA-1	0,66	1,65	n.d.	0	0	0	0	0	0
	PA-2	0,35	1,21	n.d.	0	0	0,04	0	0	11,4
La Luna	LL-1	0,81	22,86	n.d.	0	0	0,29	0	0	35,8
	LL-2	0,52	0	n.d.	0,04	0	0,17	7,69	0	32,7
	LC-1	0,18	90,20	n.d.	0	0	0,20	0	0	111,1
	LC-2	0,07	95	n.d.	0	0	0,14	0	0	200,0
	LC-3	0,53	89,94	n.d.	0	0	0,28	0	0	52,8
Colón	CO	1,21	2,89	n.d.	0	0	0,04	0	0	3,3

COT = Carbono orgánico total (% p/p). C<sub>Min</sub> = Carbono mineral. T max = Temperatura en el máximo del pico S2. Hc/COT = Hidrocarburos/COT, en mg Hc/g COT. IH = Índice de Hidrógeno. IO = Índice de Oxígeno. n.d. = no detectada.

do a partir del uso del parámetro Tmax, el cual corresponde a la temperatura a la cual se alcanza el máximo del pico S2 en el pirograma. Se encontraron valores entre 435 y 470°C para los límites superior e inferior de la ventana del petróleo. Los resultados alcanzados son incluidos en la Tabla 2.

#### Modelo TTI

El método TTI [32, 33] considera los efectos combinados de tiempo y temperatura en el establecimiento de la madurez del kerógeno. El modelo de cinética de primer orden predice que la velocidad de reacción para una reacción generalizada de producción de petróleo en un sistema (kerógeno) a 70°C de temperatura y energía de activación en el orden de 17.000 cal/mol [33], se duplicará cada vez que la temperatura se incrementa en 10°C. La utilización del modelo también requiere de la reconstrucción de la historia de soterramiento, junto con perfiles de paleotemperaturas, para cada unidad geológica contentiva de rocas madres potenciales, con el fin de establecer el gradiente geotérmico y sus posibles variaciones a lo largo del tiempo geológico considerado en el modelo. En tal sentido, el método supone un incremento de la velocidad de maduración del kerógeno en un factor de 2,0 para cada 10°C de aumento de la temperatura; así, el factor de temperatura es igual a  $2^n$ , donde  $n = (T_i - 100)/10$ ; y

$T_i$  = temperatura del intervalo considerado. Considerando que los valores de madurez para cada lapso son aditivos, quedará:

$$TTI = \sum_{n(\min)}^{n(\max)} 2^n \Delta T$$

Para la interpretación de los valores de TTI, Waples [31] propone valores de 15, 75 y 160, respectivamente, para el comienzo, máximo y final de la "ventana del petróleo".

#### Discusión de los Resultados Geológicos Estructurales

El levantamiento geológico permitió la identificación de diez unidades estratigráficas aflorantes (Tabla 1). La secuencia comienza con la Formación Sierra Nevada [35] que está constituida por gneises, esquistos y filitas del Pre-Cámbrico. La unidad La Quinta [35, 36], en contacto discordante, contiene limolitas rojas en alternancia con capas gruesas de conglomerados cuarcíticos, de edad Jurásico. La Formación Aguardiente, del Neocomiense-Albiense, fue originalmente definida en el Estado Lara como Formación Peñas Altas por Renz [3]. Esta última unidad fue invalidada, en 1961 [37, 38]. García Jarpa *et al.*, en 1980 [39] han propuesto su revalidación, restringiendo su uso a los Estados Trujillo y Lara, aunque esto último aún no ha sido formalmente aproba-

do [40]. En el área de estudio, esta unidad presenta lutitas negras con presencia de una zona foraminífera a Orbitolinas en su parte superior y un paquete grueso de areniscas y calizas en su sección basal. La Formación La Luna (Albiense Tardío-Coniaciense) [41], depositada de modo concordante con la unidad anterior, puede ser dividida de modo ascendente en los miembros La Aguada, calizas concrecionarias fosilíferas; Chendé, lutitas y margas bituminosas negras en su base y calizas negras con amonites en su parte superior; y Timbetes, calizas concrecionarias con abundantes láminas de ftanita negra [3]. Siguiendo la secuencia estratigráfica, se incluye a continuación un cuerpo alóctono denominado Formación Barquisimeto, del Senoniense [42, 43], el cual está constituido por una serie de bloques alóctonos desplomados, consistentes en lutitas, margas compactas, ftanitas y calizas de color gris oscuro a negro, en posición estratigráfica suprayacente a las unidades Paleo-Eocénicas. La Formación Colón (Campaniense-Maestrichiense) [44] se presenta en contacto concordante con la Formación La Luna y ha sido dividida en tres secuencias, las cuales de base a tope, están formadas por secuencias de lutitas negras, un Miembro Cujizal intermedio [3], constituido por un lente de areniscas cuarzosas y grauvacas, y una sección superior donde aparecen de nuevo las lutitas negras con abundantes concreciones ferruginosas [45]. Durante el Paleoceno, se registró la depositación concordante de las calizas macrofósilíferas del Miembro Inferior de la Formación Humocaró [46,47], seguido de calizas con foraminíferos y algas calcáreas, interestratificadas con areniscas cuarzosas amarillentas y escasas limolitas, del Miembro Superior de esta unidad. La Formación Quebrada Arriba, del Paleoceno Tardío-Eoceno Medio [47], aflora en contacto basal concordante con la Formación Humocaró.

La litología típica consiste de chamosita oolítica rojo-oscuro y lutitas ricas en equinoides con calizas biohémicas foraminíferas. La Formación Morán (Eoceno Temprano-Medio) [9] incluye tres miembros; en orden ascendente, Miembro Lutítico Inferior, Miembro Botucal (ortocuarzitas blancas con escasas lutitas) y Miembro Lutítico Superior. La parte final de la columna estratigráfica presenta terrazas con aluviones constituidos por conglomerados y brechas de matriz arenosa, de edad Cuaternario-Reciente.

El término heteropía o facies heterópica, define facies depositadas de modo simultáneo en formaciones geológicas distintas y con caracteres contrastantes. Evidencias de campo llevan al establecimiento de una relación heterópica entre la Fm. Quebrada Arriba y la Fm. Morán. En un afloramiento, ubicado a 2 Km. al sureste de Humocaró Bajo, a lo largo de la carretera que conduce a Barbacoas, y a 1 Km. del cruce que conduce a Humocaró Alto, se observan interdigitaciones de forma irregular, de lutitas de la Fm. Morán, dentro del intervalo ferruginoso de la Fm. Quebrada Arriba. En esta área, la cual corresponde al borde oriental de un pequeño anticlinal, la Fm. Quebrada Arriba presenta un intervalo ferruginoso constituido por chamosita oolítica con color de meteorización rojo ladrillo y capas delgadas de lutitas ricas en fragmentos de equinoides y moluscos. Las interdigitaciones presentes corresponden a las lutitas grises del Miembro Lutítico Inferior o Lutita del Tocuyo de la Fm. Morán [15], las cuales poseen un color de meteorización amarillo-marrón y un espesor total entre 20 y 30 m. Tal observación corrobora lo mencionado en González de Juana *et al.* [28], donde se escribe que "La Fm. Quebrada Arriba presenta cambios laterales complejos debido a la distribución irregular de los manchones arrecifales, hacia el sureste, los cuales se interdigitan con las areniscas del Miembro Botucal de la Fm. Morán y hacia la Plataforma de Barbacoas se acuña, o está ausente por erosión". Por lo tanto, se puede concluir, en el presente estudio, que la Fm. Quebrada Arriba fue depositada a lo largo del borde noreste de la antigua plataforma continental, aparentemente en lagunas poco profundas entre arrecifes de algas calcáreas, interdigitándose con el sedimento lutítico tipo flysch de la Fm. Morán del surco de Barquisimeto. Otro resultado que se ha obtenido del trabajo de campo, ha sido la ubicación precisa de la masa alóctona (Figura 3); la Fm. Barquisimeto (denotada como Kb en la Figura 1). La localización, el levantamiento y la inclusión de esta unidad en el mapa geológico de la zona, fue realizada con el fin de completar el Mapa Base del Ministerio de Energía y Minas [29], donde no aparece reportada. Para tal fin, se utilizaron criterios geomorfológicos y estratigráficos-estructurales. Un criterio geomorfológico, muy evidente, es el aspecto colinar-montañoso del afloramiento de la masa alóctona, que se destaca por la evidente

ruptura de pendiente a lo largo de sus flancos cuando entra en contacto con las unidades Paleó-Eocénicas subyacentes. Otro criterio hace referencia a las características morfológico-estructurales de la Fm. Barquisimeto, es decir que los tipos litológicos que la constituyen, favorecen el desarrollo de un drenaje con fuertes incisiones a lo largo de las pendientes, las cuales están sujetas a una erosión acelerada que produce quebradas profundas y con derrumbes. Estos últimos se observan claramente desde la carretera El Tocuyo-Humocaro Bajo. El criterio estratigráfico-estructural que se ha utilizado para definir los límites señalados en el mapa (Figura 1), ha sido el seguimiento lateral del contacto basal de la Fm. Barquisimeto. Más específicamente, se ha observado la continuidad lateral del contacto entre la litología caótica de esta unidad y la lutita gris oscura, plástica, del Miembro Lutítico Superior de la Fm. Morán. Sin embargo, localmente, donde no se ha podido realizar el seguimiento lateral del contacto, debido a las coberturas por depósitos de derrumbe, depósitos aluvionales y a la abundante vegetación, se han utilizado los criterios geométricos que ayudan a la extrapolación de la continuidad de los límites. Las complicaciones estructurales en el área de estudio, impiden mediciones precisas del espesor de la Fm. Barquisimeto, el cual se estima debe estar alrededor de los 650 m.

La interpretación de las estructuras presentes en el subsuelo de la región de estudio (Figura 2 y Tabla 1), se ha hecho con la idea de evidenciar la existencia de posibles trampas estructurales para la acumulación de hidrocarburos, y ha sido guiada por:

- La presencia en superficie de anticlinales y sinclinales con buzamiento suave (15-20°), tanto hacia el noroeste como al suroeste, con andamio subparalelo a las directrices de las estructuras anticlinales y sinclinales del Anticlinorio de La Peña (Figura 1).
- Los espesores de las formaciones aflorantes pertenecientes a la secuencia estratigráfica presente en el Anticlinorio de La Peña, los cuales se suponen de desarrollo constante en el subsuelo inmediatamente al oeste de la falla de Humocaro Bajo.

En la Figura 1, el sector que abarca el área al oeste de la falla de Humocaro Bajo, la cual está comprendida entre el poblado de El Tocuyo y la

falla de Boconó, no resultó levantada en el Mapa Geológico Base del Ministerio de Energía y Minas [29]. En adición, autores como Rod [19], Renz [3], Bushman [11] y el mismo Bellizzia *et al.* [29], no han definido alguna estructura concreta en el subsuelo del sector arriba indicado. Esto ha ocurrido debido a que los estudios por ellos llevados a cabo, se han limitado a cubrir hasta el borde de la Plataforma de Barbacoas (autóctono andino), sin detallar las relaciones entre los cuerpos de esta misma plataforma con las unidades paleo-eocénicas (flysch) provenientes del Surco de Barquisimeto. El único autor que, de cierta manera ha intentado definir los rasgos generales del subsuelo del área, ha sido Stephan [1]. En ese trabajo, se presenta un mapa estructural en escala 1:200.000 de las relaciones tectónicas entre las unidades geológicas presentes a lo largo del contacto "Surco de Barquisimeto-Andes Merideños", y el autor proporciona una interpretación muy somera de la geología del área de estudio, con una serie de cortes anexos al mapa estructural. La interpretación propuesta en el presente estudio, recibe el beneficio de un levantamiento geológico en superficie de mayor detalle que el realizado por otros investigadores; sin embargo, no deja de ser especulativo, razón por la cual los suscritos recomiendan realizar un levantamiento sísmico en el área, particularmente sobre aquella en la que se han postulado las principales trampas (Figura 2 y Tabla 1), para confirmar las estructuras geológicas propuestas interpretadas por el levantamiento de superficie, y la presencia de las eventuales estructuras que podrían servir como receptoras de hidrocarburos.

## Discusión de los Resultados Geoquímicos

Los datos geoquímicos obtenidos (Tabla 2) permiten reconocer que los valores más altos de COT (Carbono Orgánico Total) se ubican en las muestras de las Formaciones Aguardiente (1,37% en peso) y Colón (1,21%); mientras que los resultados de las muestras de la Formación La Luna oscilan entre un intervalo de 0,81 y 0,52% en peso. Tissot y Welte [34] establecen valores mínimos de COT para rocas fuentes, de 0,5% en lutitas y 0,3% en calizas. Bajo esta premisa, la mayoría de las muestras seleccionadas pueden considerarse como rocas madres de petróleo.

Los valores más altos de COT, característicos de buenas rocas generadoras, se midieron en las muestras de las formaciones Aguardiente y Colón, con las siglas PA-O (1,37%) y CO (1,21%) respectivamente; mientras que los resultados para las muestras de la Formación La Luna se ubicaron en un intervalo entre 0,81 y 0,53% en peso, exceptuando dos calizas de color negro (LC-1 y -2), donde se presume la posibilidad de meteorización, proceso que contribuye adversamente con la presencia de materia orgánica en las rocas [48]. La literatura de geoquímica orgánica [34, 49] establece valores mínimos de 0,32 en peso de COT para rocas madres efectivas de litología calcárea. Sin embargo, se conoce que la Fm. La Luna presenta generalmente valores de COT superiores a los reportados, típicamente entre 9,2 y 1,4% [7], donde los valores más bajos han sido atribuidos a muestras en un nivel de madurez térmica muy elevado, fuera de la ventana del petróleo [33]. Existen dos alternativas para explicar las bajas concentraciones de COT medidas en rocas de la Fm. La Luna; las rocas están actualmente en un estadio de sobremadurez térmica, es decir, ya produjeron y expulsaron todo el petróleo que estaba dentro de su potencial diagenético inicial, o las rocas fueron colectadas de una región donde la Fm. La Luna presenta bajos tenores de COT, debido a cambios de facies laterales respecto a los intervalos de mayor riqueza orgánica reportados por Talukdar *et al.* [7]. Esta segunda posibilidad no descarta una posible generación de petróleo por parte de esta unidad, ya que los valores de COT aun son suficientes para que este proceso ocurra.

Se evaluaron las rocas madres prospectivas de la secuencia sedimentaria aflorante en la región, utilizando pirólisis Rock-Eval. Los resultados obtenidos sobre nueve muestras de las formaciones Aguardiente, La Luna y la sección basal de la Formación Colón, en términos de resultados iguales a cero para las variables S1, S2 e IH, llevan a concluir que estas unidades están en un nivel de madurez térmica muy elevado, fuera de la ventana del petróleo [34, 49]. Tal hallazgo recibe confirmación de la interpretación anterior respecto de la sobremadurez térmica de la Formación La Luna.

Para la construcción del modelo de madurez termal (TTI) son necesarios (Figura 4) los es-

pesores y edades de las secuencias estratigráficas; las edades de los eventos tectónicos y los gradientes de temperatura a través del tiempo. Los espesores de las formaciones se pueden calcular, en ausencia de otros datos, directamente de los cortes geológicos realizados. Las edades de las secuencias estratigráficas se han obtenido sobre la base de la estratigrafía de las rocas aflorantes del sector occidental. Las dataciones de los eventos tectónicos hacen considerar que la tectónica compresiva que dio lugar al sistema de pliegue y pliegue-falla presentes en el sector oriental (área de surco) ocurrió durante el Eoceno Tardío (38 m.a.) y que el acortamiento y empuje hacia la Plataforma de Barbacoas con su respectivo plegamiento pudo haber continuado en pequeña escala al menos hasta el Mioceno Medio (10 m.a.). Por lo tanto, para la construcción del modelo, se ha considerado una subsidencia constante con un pequeño episodio de levantamiento ubicado entre 55 y 45 millones de años, el cual es un efecto de ajuste isostático. Finalmente, el gradiente de temperatura se ha considerado constante a través del tiempo y se ha usado como valor el de 3°C/100 metros con una temperatura de superficie de 22°C [50].

## Conclusiones

La aplicación del modelo de generación TTI de Lopatin sobre estas secuencias (Figura 4), permitió establecer que las rocas madres potenciales del Cretáceo entraron en la etapa principal de generación del petróleo durante el Paleoceno Tardío-Eoceno Temprano (55-50 millones de años, TTI=5-10), alcanzando su máxima producción y expulsión durante el Oligoceno Tardío-Mioceno (30-20 millones de años, TTI=55-65). Si se considera que entre el Eoceno Tardío y el Oligo-Mioceno se presentó en el área la manifestación del más antiguo evento tectónico compresivo, con la formación de pliegues y fallas inversas, establecidas a lo largo de la falla flexura de Humocaro Bajo (y paralelamente a ella), acompañado del corrimiento de Carora-El Tocuyo de las masas alóctonas (Fm. Barquisimeto) sobre el autóctono andino [1, 9] se puede proponer que, para el Oligoceno, las trampas potenciales ya estaban formadas, de manera que pudieron atrapar el petróleo migrado de las rocas madres del Cretáceo Medio-Tardío subyacentes a los sellos lutíticos del

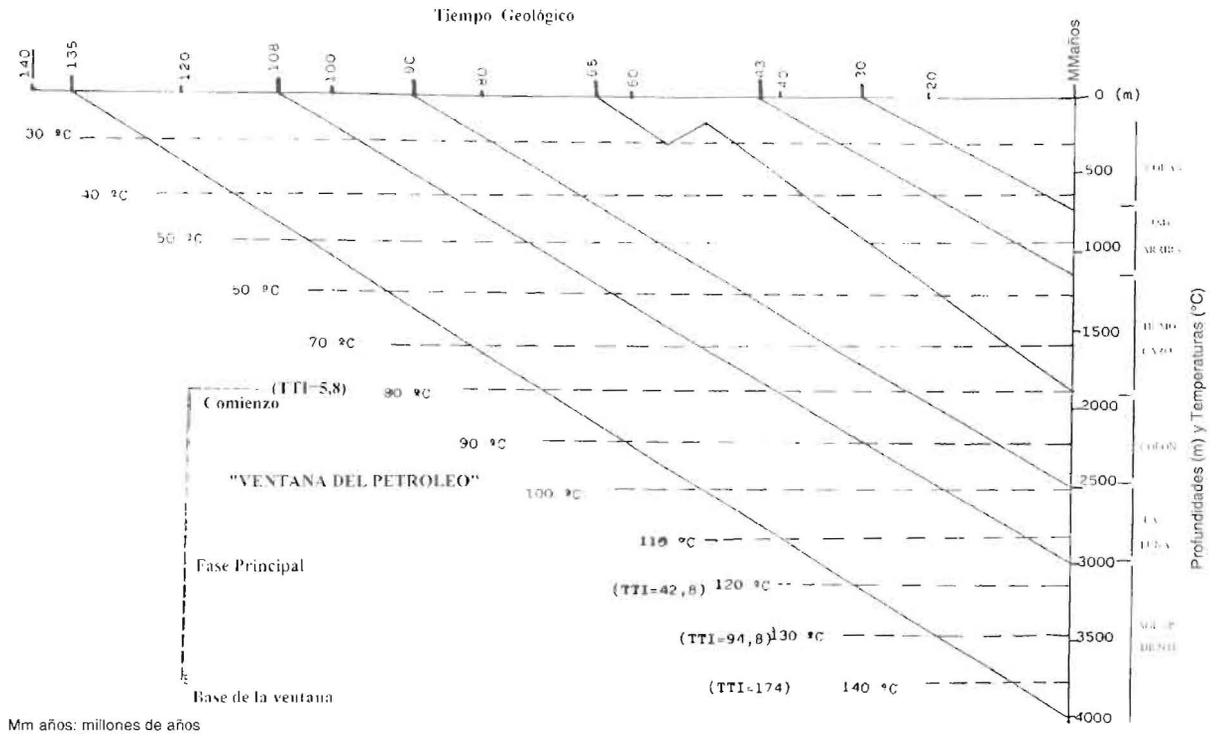


Figura 4. Gráfico que ilustra la construcción del modelo de madurez termal (TTI) para el área de Los Humocaros-El Tocuyo.

Eoceno Medio. Por estas razones, se propone que las acumulaciones de petróleo y/o gas podrían estar restringidas principalmente al sector sur y sureste del área bajo consideración.

Los acontecimientos geodinámicos posteriores (actividad tectónica distensiva del Mioceno junto con la tectónica compresiva de fallas transcurrentes del Cuaternario [1, 2], pudieron haber favorecido tanto la redistribución de las acumulaciones, como su pérdida hacia la superficie. En este estudio se propone, tanto a las areniscas del Miembro Cujizal de la Formación Colón selladas por el Miembro Lutítico Superior de la misma unidad, como a las formaciones Humocaros-Quebrada Arriba selladas por el Miembro Lutítico Inferior de la Formación Morán, como las principales rocas almacén en el área.

### Programa de Exploración y Recomendaciones

Puesto que en esta primera evaluación del potencial petrolífero de la región de Los Humocaros-El Tocuyo existe gran incertidumbre, debido

esencialmente a la falta de pozos exploratorios que podría aprobar o desmentir las hipótesis desarrolladas, se recomienda antes de cualquier propuesta de perforación exploratoria hacer un levantamiento sísmico en el área que ha sido definida de probable acumulación, para confirmar la estructura geológica interpretada por el levantamiento de superficie y la presencia de las eventuales trampas. En tal sentido, se requiere confirmar el nuevo modelo geológico propuesto, mediante la perforación de un pozo estratigráfico, ubicándolo al noroeste de Guarico (Los Patiecitos) o al este del caserío Berlín sobre las alineaciones anticlinálicas. La perforación de los pozos exploratorios tendrá como objetivos:

1. Alcanzar las partes altas de las estructuras anticlinales a distintas profundidades y llegar hasta el basamento Pre-Cretáceo con el fin de averiguar los espesores parciales y el espesor total de las formaciones Cretáceas y si en el área existe la presencia de la Formación La Quinta (información útil para la reconstrucción paleogeográfica).

2. Obtener muestras de canal y núcleos (dependiendo del caso) para proceder con estudios geoquímicos más detallados (cantidad, tipo y estado) de las rocas madres ya propuestas y de los posibles hidrocarburos generados y presentes.
3. Definir las nuevas estrategias de exploración y explotación.

La especial importancia que tiene este modelo geológico, radica en que de confirmarse acumulaciones de hidrocarburos, se abriría un extenso e importante frente para la exploración petrolífera en Venezuela, especialmente en las áreas cubiertas por masas alóctonas. Este frente se extendería desde el oeste de Carora hasta Barcelona (frente de montañas meridionales del Sistema de Montaña del Caribe) y desde el oeste de Carora hasta la Cuenca de Guarumen en dirección sureste, englobando el área de Humocaro Bajo, Humocaro Alto y El Tocuyo, que quedarían en la parte intermedia. La Formación La Luna, excelente roca madre y principal responsable de los grandes volúmenes de hidrocarburos generados y producidos en la Cuenca del Lago de Maracaibo, aflora en el área, lo que es un factor favorable para inferir la presencia de hidrocarburos, tanto en el área como en los frentes de corrimiento antes mencionados, es decir, por debajo de las coberturas Mio-Plioceno-Cuaternaria y dentro del autóctono Cretáceo y Terciario.

La exploración petrolífera en la zona de Humocaro Bajo, Humocaro Alto y El Tocuyo, que hasta la fecha no ha sido de gran interés para las compañías petrolíferas, hoy en día puede ser un área atractiva ya que las interpretaciones y conclusiones alcanzadas en el presente estudio, la hacen altamente prospectiva.

### Agradecimientos

Los autores desean agradecer a la Gerencia de Ciencias de La Tierra de Intevep, S.A., y en especial al M.Sc. Rafael Tocco, por la realización de los análisis geoquímicos.

### Referencias Bibliográficas

1. Stephan J.F. "El contacto Cadena Caribe-Los Andes Merideños entre Carora y el Tocuyo (Edo. Lara): Observaciones sobre el estilo y la edad de las deformaciones cenozoicas en el Occidente Venezolano". Mem. V Cong. Geol. Venez., IV, 789-815 y mapas anexos, 1977.
2. Stephan J.F. "Evolution Geodynamique du Domaine Caraibe. Andes et Chaîne Caraibe sur la transversale de Barquisimeto (Venezuela)". Thèse d'état. Univ. Paris. VI, 532, 1982.
3. Renz, O. "Estratigrafía del Cretáceo en Venezuela Occidental". Bol. Geol., Caracas, 5(10), 3-48, 1959.
4. Blaser, R. "Source rock and hydrocarbon generation in the Maracaibo Basin, Western Venezuela". Internal Report, Ksepl, Shell, Rijswijk, Netherlands, 80, 1979.
5. Stauffer, K.W. y Betoret, C. "Evaluación del potencial petrolífero de la Cuenca de Maracaibo". Reporte interno, Corpoven, S.A., Caracas, 84, 1979.
6. Blaser, R. and White, C. "Source rock and carbonization study, Maracaibo Basin, Venezuela". Mem. Am. Assoc. Pet. Geol., 35, 229-252, 1984.
7. Talukdar, S.; Gallango, O. and Chin-A-Lien, M. "Generation and migration of hydrocarbons in the Maracaibo Basin, Venezuela: An integrated basin study", en *Advances in Organic Geochemistry 1985* (Edited by Leythaeuser, D. and Rullkötter, J.). Org. Geochem., 10, 261-279, 1986.
8. Escobar, M. "Geoquímica orgánica del petróleo en la región nor-central de la costa occidental del Lago de Maracaibo". Tesis Doctoral, Universidad Central de Venezuela, Caracas, 380, 1988.
9. Von Der Osten, E. y Zozaya, D.F. "Geología de la parte sureste del Estado Lara, región de Quibor (Carta 2308)". Bol. Geol., Caracas, 4(9), 3-52, 1957.
10. Evanoff, J., Bushman, J. Y Araujo, E. "Bloques de rocas antiguas incrustados en sedimentos del Terciario Inferior en la Cuenca de Lara". Bol. Geol. Caracas, 5(10), 67-80, 1959.
11. Bushman, J.R. "Geología del área de Barquisimeto, Venezuela". Bol. Geol., Caracas, 6(11), 3-11, 1965.

12. Bellizzia, A. y Rodríguez, G.D. "Guía de la excursión a la región de Duaca-Barquisimeto-Bobare". Bol. Geol., Caracas, 8(16), 289-309, 1967.
13. Bellizzia, A. y Rodríguez, G.D. "Consideraciones sobre la estratigrafía de los Estados Lara, Yaracuy, Cojedes y Carabobo". Bol. Geol., Caracas, 9(18), 515-563, 1968.
14. Bellizzia, A. y Rodríguez, G.D. "Geología de la región de Barquisimeto-Urachiche-Río Tocuyo (Resumen)". Mem. IV Cong. Geol. Venez., I, 93, 1969.
15. Von Der Osten, E. "Stratigraphy of Central Lara". Asoc. Ven. Geol., Min. y Petr., Bol. Inform., 10(11), 309-332, 1967.
16. Bellizzia, A., Rodríguez, G.D. y Zambrano, E. "Mapa geológico de la región de Barquisimeto-Río Tocuyo". Ministerio de Energía y Minas, Dirección de Geología, División de Exploraciones Geológicas, Caracas, 1968.
17. Campos, V., Osuna, S. Y Guedez, V. "Geología de la región al noreste de Acarigua y al sur de la falla de Boconó". Mem. II Cong. Latinoamer. Geol., II, 1669-1680, 1977.
18. Bellizzia, A. "Sistema montañoso del Caribe. Borde sur de la placa Caribe, ¿es una cordillera alóctona?". Mem. VI Conf. Geol. Caribe, 247-258, 1972.
19. Rod, E. "Humocaro fault". Asoc. Ven. Geol., Min. y Petrol., Bol. Inf., 3(6), 164-166, 1959.
20. Rod, E. "Formación Capacho en Trujillo septentrional y en Lara suroccidental". Bol. Geol. Caracas, 5(10), 49-66, 1960.
21. Shagan, R. "Evolución tectónica de Los Andes Venezolanos". Mem. IV Cong. Geol. Venez., II, 1201-1261, 1972.
22. Rondón, F. "Geología de la región de Guanare-Ospino, Estados Lara y Portuguesa". Ministerio de Minas e Hidrocarburos, Informe interno, 36, 1976.
23. Schubert, C. "Morfología neotectónica de una falla rumbo-deslizante e informe preliminar sobre la falla de Boconó, Andes meridionales". Acta Cient. Venez., 31, 98-111, 1980.
24. Schubert, C. y Krause, F. "Fallamiento a lo largo de la costa norte-central de Venezuela: zona de falla de Morón". Mem. III. Cong. Ven. Sismol. e Ing. Sism., Caracas, 1981.
25. Giraldo, C. "Neotectonique et sismotectonique de la region d'El Tocuyo-San Felipe (Venezuela centro-occidentale)". Montpellier, Thèse Dr. Ingenieur, U.S.T.L., 130, 1985.
26. Soulas, J. y Aggarwal, Y. "Les Andes du Venezuela: Exemple de cordillere sur limete de plaque (Résumé)". Symposium Geodynamique des Caraibes. I.F.P., C.N.R.S., Paris, 1985.
27. Zambrano, E., Vásquez, E. E., Duval, B., Latreille, M. y Coffinieres, B. "Síntesis paleogeográfica y petrolera del occidente de Venezuela". Mem. IV Cong. Geol. Venez., I, 483-545, 1969.
28. González de Juana, C., Iturralde, J.M. y Picard, X. "Geología de Venezuela y de sus cuencas petrolíferas". Caracas, Ediciones Foninves, 1031, 1980.
29. Bellizzia A., et al., "Mapa Geológico de la Región de Carache-Los Humocaros (Edo. Trujillo y Lara)". Ministerio de Energía y Minas, Dirección de Geología, División de Exploraciones Geológicas, Caracas, 1981.
30. Espitalié, J.; La Porte, M.L.; Madec, M.; Marquis, F.; Le Plat, P.; Paulet, J. and Boutefeu, A. "Méthode rapide de caractérisation des roches mères de leur potentiel pétrolier et de leur degré d'évolution". Rev. Inst. Français Pétrole, 32(1), 23-42, 1977.
31. Waples, D. "Time and Temperature in petroleum formation: Application of Lopatin's method to petroleum exploration". Am. Assoc. Pet. Geol. Bull., 64, 916-926, 1980.
32. Lopatin, N.V. "Temperature and geologic time as factors in coalification". Akad. Nauk Uzb, SSSR, Izv. Ser. Geol., 3, 95-106, 1971.
33. Connan, J. "Time-temperature relation in oil genesis". Am. Assoc. Pet. Geol. Bull., 58, 2516-2521, 1974.
34. Tissot, B.P. and Welte, D.H. "Petroleum Formation and Occurrence, 2<sup>nd</sup> edn". Berlin, Springer-Verlag, 699, 1984.
35. Kündig, E. "Las rocas pre-Cretáceas de los Andes centrales de Venezuela, con algunas

- observaciones sobre su tectónica". Bol. Geol. y Min., Caracas, 2(2-4), 21-43, 1938.
36. Schubert, C. "Stratigraphy of the Jurassic La Quinta Formation, Mérida Andes, Venezuela: type sections". Z. Deut. Geol. Ges., 137, 391-411, 1986.
37. Salvador, A. "Guidebook to the geology of northeastern Trujillo". Soc. Geol. Venez. Occid., Guidebook 3, 33, 1961.
38. Sociedad Venezolana de Ingenieros de Petróleo "Aspectos de la industria petrolera en Venezuela". Caracas, I Cong. Venez. Petról., 850, 1963.
39. García Jarpa, F.; Ghosh, S.; Rondón, F.; Fierro, I.; Sampol, M.; Benedetto, G.; Medina, C.; Odreman, O.; Sánchez, T. y Useche, A. "Correlación estratigráfica y síntesis paleoambiental del Cretáceo de los Andes venezolanos". Bol. Geol., Ministerio de Energía y Minas., Caracas, XIV(26), 3-88, 1980.
40. Léxico Estratigráfico Venezolano, III Edición, (en preparación), en <http://www.pdvsa.com/lexico>.
41. Hedberg, H.D. and Sass, L. C. "Synopsis of the geologic formations of the western part of the Maracaibo basin, Venezuela". Bol. Geol. y Min., 1(2-4), 73-112, 1937.
42. Bushman, J.R. "Geology of the Barquisimeto area - A summary report". Asoc. Venez. Geol., Min. y Petról, Bol. Inform., 2(4), 65-84, 1959.
43. Macsotay O.; J.F., Stephan, y E. Alvarez, "Grupo Lara: Sedimentitas oceánicas y peninsulares en el Cretáceo alóctono de Venezuela occidental". Bol. Geol., 28, 3-78, 1987.
44. Liddle, R.A. "The geology of Venezuela and Trinidad". Fort Worth, Texas, J.P. MacGowan, 552, 1928.
45. Sutton, F. A. "Geology of Maracaibo basin, Venezuela". Am. Assoc. Petrol. Geol., Bull., 30(10), 1621-1741, 1946.
46. Renz, O. "Guía de la excursión C-8. Andes nororientales. Barquisimeto-Barbacoas (Estado Lara)". Mem. III Cong. Geol. Venez., 1, 93-97, 1960.
47. Muñoz, N.G. "Descripción de las formaciones Humocaro y Quebrada Arriba en sus localidades tipo de Los Andes de Lara". Asoc. Venez. Geol., Min. y Petról, Bol. Inform., 9(5), 137-145, 1966.
48. Clayton, J.L. and Swetland, P.J. "Subaerial weathering of sedimentary organic matter". Geochim. Cosmochim. Acta, 42(3), 305-312, 1979.
49. Hunt, J.M. "Petroleum geochemistry and geology, 2<sup>nd</sup> edn.". New York, W.H. Freeman and Co., 743, 1996.
50. Whitten, D.G.A. y Brooks, J.R.V. "Diccionario de Geología". Madrid, Editorial Alianza, (Versión Española de Juan José Ruiz Olavide), 388, 1980.

Recibido el 29 de Septiembre de 1998

En forma revisada el 14 de Junio de 2000