

COMPARACIÓN DE EVIDENCIAS GEOLÓGICAS Y GEOQUÍMICAS DE MIGRACIÓN PRIMARIA EN ROCAS FUENTES CARBONÁTICAS Y LUTÍTICAS

Liliana López

Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ciencias
Instituto de Ciencias de la Tierra, Apdo. 3895, Caracas 1010-A, Venezuela

RESUMEN – Se analizaron evidencias geológicas y geoquímicas de migración primaria en calizas de la Formación Querecual y lutitas calcáreas y calizas de la Formación San Antonio. Estas evidencias fueron comparadas para determinar posibles diferencias en el proceso de migración primaria debidas tanto a características de la fracción orgánica (kerógeno, bitumen y sus fracciones) e inorgánicas (composición mineralógica, porosidad, permeabilidad, textura y estructura) de la roca fuente. Las evidencias geológicas se basan en el estudio de muestras de mano, secciones finas y pulidas. A nivel macro y microscópico, se observó que la frecuencia de fracturas rellenas de materia orgánica, paralelas y oblicuas a la laminación, fueron más comunes para las calizas de la Formación Querecual respecto a las lutitas calcáreas y calizas de la Formación San Antonio. Las diferencias en los estilos de acumulación de la materia orgánica para ambas formaciones indican una migración primaria más eficiente a través de las macro y microfracturas para Querecual en comparación a San Antonio. Las evidencias geoquímicas se basan en la concentración del bitumen y sus fracciones (hidrocarburos saturados, hidrocarburos aromáticos, resinas y asfaltenos). La concentración de bitumen y sus fracciones de menor peso molecular y polaridad (hidrocarburos saturados y aromáticos), las cuales corresponden a las fracciones relativamente más móviles durante la migración primaria, resultaron superiores para la Formación San Antonio respecto a Querecual, lo que también se relaciona a una migración y expulsión del bitumen menos eficiente para la Formación San Antonio. Los resultados indican que la calidad de una roca fuente, además de estar relacionada a su concentración de carbono orgánico y al grado de madurez alcanzado por esta, también depende del proceso de migración y expulsión, el cual está determinado por la cantidad y distribución de la materia orgánica (kerógeno y bitumen) y por las características litológicas de la roca.

ABSTRACT – Geological and geochemical evidences of primary migration of limestones of the Querecual Formation and calcareous shale and limestone of the San Antonio Formation were found. These evidences were compared in order to determine possible differences in the primary migration process due to characteristics of the organic fraction (kerogen, bitumen and fractions) and the inorganic fraction (mineralogy, permeability, texture and structure) of the source rock. Geological evidence was based on the study of hand specimens, thin and polished sections. At the macro and microscopic level, the frequency of fractures filled with organic matter, parallel and oblique to the lamination, were more common in limestones from the Querecual Formation than in calcareous shales and limestones from the San Antonio Formation. The differences in the styles of accumulation of the organic matter in both formations, suggest a more effective primary migration through the macro and microfractures for the Querecual than the San Antonio. The geochemical evidence is based on the concentration of bitumen and its fractions (saturated hydrocarbons, aromatic hydrocarbons, resins and asphaltenes). The concentration of bitumen and its fractions with a lower molecular weight and polarity (saturated and aromatic hydrocarbons), which correspond to the relatively more mobile fractions during primary migration, was greater for the San Antonio than the Querecual Formation. This is also being related to less efficient migration and expulsion of bitumen in the San Antonio Formation. Results indicate that, in addition to the quality of the source rock being related to its organic carbon concentration and the degree of maturity it has reached, this quality depends on the migration and expulsion process, which in turn is determined by the quantity and distribution of the organic matter (kerogen and bitumen) and the lithological characteristics of the rock.

INTRODUCCIÓN

La migración primaria, definida como el movimiento del bitumen a través de la roca fuente y su expulsión a una roca más porosa y permeable (Tissot & Welte, 1984) puede considerarse, luego de la generación del bitumen, el proceso más im-

portante para la formación de acumulaciones de petróleo de importancia económica. El tema de la migración primaria ha sido estudiado extensivamente y en la literatura existe un gran número de trabajos relacionados a este, los cuales han permitido obtener mayor información sobre el proceso (Price, 1979; Brukner & Veto, 1983; Durand, 1987;

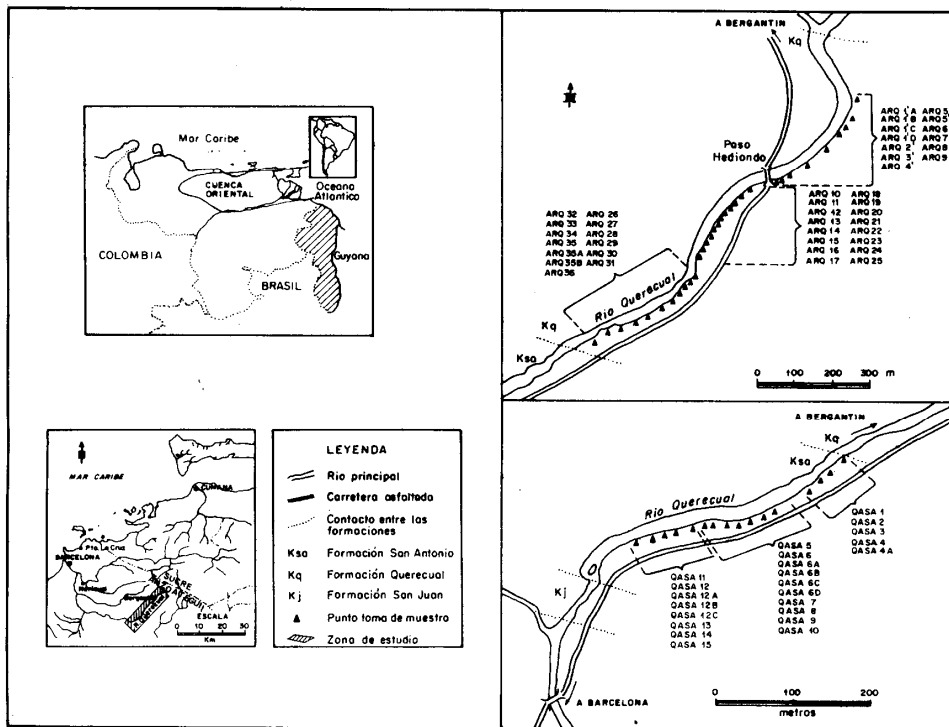


Figura 1. Ubicación del área de estudio y de las muestras analizadas.

Comer & Hinch, 1987; Lewan, 1987; Leythaeuser et al., 1983; 1987; 1988^a; 1988^b; Kross et al., 1991).

En Venezuela, se han realizado investigaciones sobre la migración primaria en las Formaciones Querecual y La Luna (Talukdar et al., 1985; 1988^a; 1988^b; Escobar et al., 1989; López, 1997), consideradas las rocas fuentes principales de la Cuenca Oriental y la Cuenca del Lago de Maracaibo respectivamente (Ailloud et al., 1980; Janezic et al., 1982; Talukdar et al., 1985). Estos trabajos han sido enfocados al reconocimiento de evidencias geológicas y geoquímicas de migración primaria (Talukdar et al., 1985; 1988^b; Escobar et al., 1989; López, 1997), al establecimiento de el o los tipos de mecanismos de transporte que pudieron ocurrir durante la migración (Talukdar et al., 1988^a; López, 1997) y a la cuantificación del bitumen generado y expulsado por estas rocas (Talukdar et al., 1988^b). Sin embargo, es necesario un mayor conocimiento de este tema, basado en el estudio detallado de otras formaciones y la comparación de las evidencias geológicas y geoquímicas de

migración primaria.

Este trabajo presenta un estudio comparativo de la migración primaria en las Formaciones Querecual y San Antonio, Venezuela, con el objeto de reconocer posibles diferencias en el proceso de migración primaria debidas tanto a variaciones en las características de la fracción orgánica (kerógeno, bitumen y sus fracciones) e inorgánicas (composición mineralógica, porosidad, permeabilidad, textura y estructura) de estas rocas.

GEOLOGÍA Y GEOQUÍMICA

Aspectos Generales de la Cuenca Oriental de Venezuela

Durante la evolución geológica de la Cuenca Oriental de Venezuela en el periodo Cretácico, ocurrieron varios eventos transgresivos y regresivos. Durante el periodo de transgresión que abarcó del Cenomaniense al Campaniense, se depositó hacia la parte norte de la cuenca el Grupo

Guayuta (Formaciones Querecual y San Antonio). Inicialmente predominaron condiciones reductoras y ocurrió la sedimentación de calizas ricas en materia orgánica, las cuales conforman a la Formación Querecual. Durante el Santoniense bajo condiciones menos reductoras, existieron aportes de sedimentos clásticos y de sílice biogénica, correspondiente a la sedimentación de la Formación San Antonio (González et al., 1980).

La Formación Querecual en su sección tipo (río Querecual, estado Anzoátegui, Fig. 1) consiste en afloramientos casi continuos de calizas negras laminadas y masivas con concreciones discoidales de caliza (Hedberg, 1937; González et al., 1980). La parte superior de la sección se caracteriza por presentar calizas silíceas y dolomitas (González et al., 1980). El espesor de esta sección es de 700 m (Hedberg, 1937). El contacto basal de la Formación Querecual con la Formación Chimana, no puede ser observado en su sección tipo, mientras que el contacto superior con la Formación San Antonio es fácilmente observable por la aparición de las areniscas típicas de esta última. La edad de esta formación abarca del Cenomaniense al Coniaciense (Hedberg, 1937; Vivas et al., 1988). Geoquímicamente la Formación Querecual se caracteriza por presentar kerógeno tipo II, es una roca sobremadura ($R_o \gg 2\%$ y T_{max} alrededor de $500\text{ }^\circ\text{C}$). Las concentraciones de carbono orgánico total se encuentran en el intervalo de 0,2% a 5,6%. El predominio del isoprenoide fitano sobre pristano indica una sedimentación de materia orgánica en un ambiente reductor, mientras que el predominio del esterano C_{27} sobre el C_{29} indican una fuente de materia orgánica principalmente marina (Ailloud et al., 1980; Janezic et al., 1982; Talukdar et al., 1987).

En la Formación San Antonio se encuentran foraminíferos bentónicos, en contraste con la Formación Querecual donde son ausentes debido a las condiciones más reductoras del ambiente de sedimentación (González et al., 1980). En su sección tipo (río Querecual, estado Anzoátegui, Fig. 1) la litología corresponde a una alternancia de lutitas calcáreas, calizas de color negro y areniscas calcáreas de grano fino, hacia el tope presenta algunas concreciones de calcita de color negro similares a las observadas en la Formación Querecual. El contacto infrayacente es con la Formación Querecual y el suprayacente es concordante con las areniscas de la Formación San Juan del Grupo Santa Anita (González et al., 1980). El espesor de esta sección es de 350 m. Su edad abarca del Cenomaniense Superior al Maestrichtiense

Inferior (Vivas et al., 1988). Las características geoquímicas de la Formación San Antonio indican la presencia de kerógeno tipo II, con concentraciones de carbono orgánico entre 0,5% y 1,7% (Ailloud et al., 1980), con valores de T_{max} alrededor de $450\text{ }^\circ\text{C}$, lo que la clasifica como una roca madura. Ailloud et al. (1980) basados en los análisis por pirólisis Rock-Eval consideran a esta formación con un potencial petrolero de bueno a medio. De la mayor abundancia relativa del isoprenoide pristano sobre el fitano lo relacionan a un carácter menos reductor para las condiciones de sedimentación en comparación a la Formación Querecual (Janezic et al., 1982). Trabajos previos sobre la migración primaria para la sección tipo de la Formación Querecual, indican una migración relativamente mayor para los hidrocarburos saturados y aromáticos respecto a las resinas y los asfaltenos, y variaciones en las distribuciones de *n*-alcanos que pueden ser atribuidas a cambios como consecuencia de la migración primaria (López, 1997). De igual manera, la distribución de biomarcadores, específicamente los esteranos y terpanos, presentan la siguiente tendencia de migración primaria: terpanos tricíclicos > esteranos regulares » esteranos rearrreglados > terpanos pentacíclicos (López et al., 1996). Estos resultados permitieron proponer la tendencia de migración primaria del bitumen en la sección tipo de la Formación Querecual, y concluir que la migración primaria de los diferentes componentes del bitumen fue controlada por la estructura y el peso molecular de estos. Se propone que la migración primaria en la sección tipo de la Formación Querecual ocurrió a través de las fracturas producidas como consecuencia de la sobrepresión creada por la generación del bitumen (López, 1997). A diferencia de la Formación Querecual, para la Formación San Antonio no se han realizado trabajos relacionados al estudio de la migración primaria, siendo uno de los objetivos de este trabajo, presentar evidencias geológicas y geoquímicas de migración primaria en esta formación.

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Muestras: Se recolectaron un total de 55 muestras, 36 de la Formación Querecual y 19 de la Formación San Antonio (Fig. 1). Las muestras fueron recolectadas aproximadamente cada 20 m, tomando en cuenta las diferentes litologías, el grado de meteorización y la presencia de acumulaciones de materia orgánica. En el caso del criterio litológico para la Formación Querecual

se consideró la presencia de calizas masivas y laminadas y para la Formación San Antonio la presencia de calizas, lutitas calcáreas y areniscas calcáreas. Antes de realizar los análisis a las muestras se cortó toda la superficie meteorizada de estas.

Las muestras de mano, las secciones finas y pulidas fueron descritas con el objeto de detectar la presencia de acumulaciones de materia orgánica. Para su descripción se incluyeron características tales como la presencia de acumulaciones de material negro opaco, la dureza de estas acumulaciones en relación al resto de la muestra y su reacción ante la presencia de HCl (10%), la litología y el tipo de estructuras que ocupa la materia orgánica (fracturas paralelas y oblicuas, fósiles, estilolitas). Las muestras de mano fueron descritas con una lupa binocular o a simple vista, para las secciones finas se utilizó un microscopio petrográfico (Zeiss, Orto Lux) y para las secciones pulidas la descripción se realizó utilizando luz fluorescente (microscopio Leitz, MPV II, objetivos de inmersión en aceite).

La composición mineralógica de las muestras fue determinada por difracción de rayos-X, en un difractor Philips (1390), utilizando radiación CoKa a 40Kv y 20 ma.

Análisis Químicos: La concentración de carbono total en las muestras fue realizada en un analizador de carbono (Leco, E-C12). El carbono

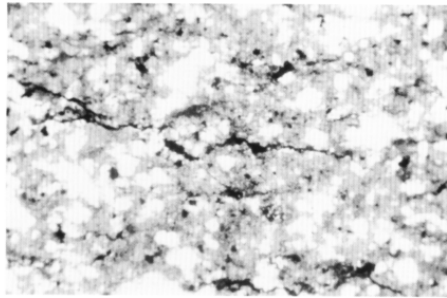
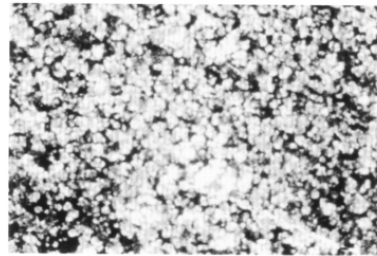
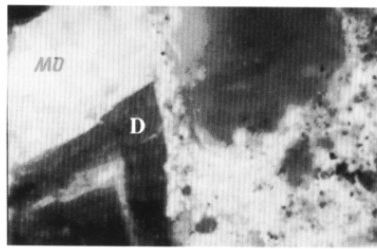


Figura 2. Estilolitas rellenas de materia orgánica en una lutita calcárea de la Formación San Antonio.

inorgánico fue determinado utilizando el calcímetro de Bernard y el carbono orgánico fue calculado por diferencia. La extracción del bitumen (aproximadamente 130 g de muestra) fue realizada con diclorometano, utilizando un equipo de extracción soxhlet (por 40 horas). Los bitúmenes extraídos fueron separados en sus fracciones constituyentes (hidrocarburos saturados, hidrocar-



A



B

Figura 3. Cristales de dolomita rodeados de materia orgánica (A) caliza masiva de la Formación Querecual y (B) la lutita calcárea de la Formación San Antonio. MO = Materia Orgánica, D = Dolomita.

buros aromáticos, resinas y asfaltenos). La fracción de asfaltenos fue separada por precipitación con n-heptano en frío (1:40). La fracción soluble correspondiente a los maltenos fue separada utilizando cromatografía líquida de adsorción en columna, utilizando alúmina como fase estacionaria. La fracción de hidrocarburos saturados fue eluida con n-hexano, la fracción de hidrocarburos aromáticos con tolueno y una mezcla tolueno/metanol (70:30) fue utilizada para eluir las resinas.

Los análisis por cromatografía de gases de la fracción de hidrocarburos saturados fueron realizados en un cromatógrafo Perkin Elmer (8500), equipada con una columna capilar SE-30 de sílica fundida, de 30 m de largo y 0,025 mm de diámetro interno, utilizando un detector de ionización a la llama. Las condiciones de operación fueron las siguientes: temperatura inicial 100 °C (1 min), velocidad de calentamiento 4 °C/min hasta una temperatura final de 200 °C (40 min). Los experimentos de pirólisis fueron realizados en un Rock-Eval (Delsi) utilizando las siguientes condiciones: temperatura inicial 250 °C, durante 5 min, con un gradiente de temperatura de 5 °C/min y una temperatura final de 390 °C.

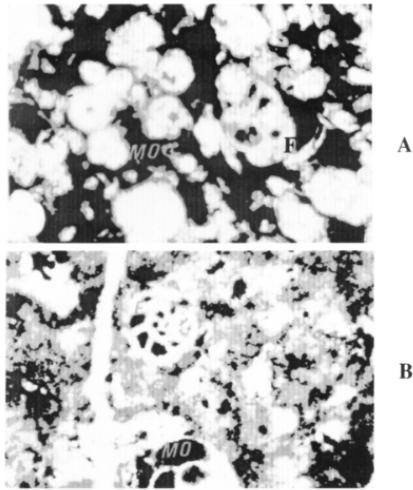


Figura 4. Fósiles rellenos de materia orgánica (A) caliza masiva de la Formación Querecual y (B) caliza de la Formación San Antonio. MO = Materia Orgánica, F = Fósiles.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Evidencias Geológicas: Comparación de las Formaciones Querecual y San Antonio

La comparación de las evidencias geológicas entre ambas formaciones se realizó sobre la base del tipo y cantidad de acumulaciones de materia orgánica observadas a nivel macro y microscópico y su relación con los diferentes tipos de litologías (calizas y lutitas). Del estudio de las muestras de mano, para la Formación Querecual, la materia orgánica se observó en estilolitas, en fracturas en forma continua y discontinua tanto paralelas como oblicuas a la laminación y entre los planos de laminación. Para la Formación San Antonio no se observaron acumulaciones de materia orgánica a nivel macroscópico. A nivel microscópico en las calizas de la Formación Querecual, la materia orgánica se observó en microfracturas paralelas y oblicuas a la laminación o al corte de la muestra (calizas masivas y laminadas), en estilolitas y relleno de cavidades de fósiles. Para la Formación San Antonio, en las lutitas la materia orgánica se observó en fracturas discontinuas y en las calizas en forma dispersa. Al comparar el tipo y abundancia de las acumulaciones de materia orgánica a nivel microscópico, estas fueron más comunes para las calizas de la Formación Querecual respecto a las calizas y

lutitas de la Formación San Antonio. Sin embargo, existen características similares en los estilos de acumulación que se pueden comparar para poder inferir su relación con la migración y expulsión del bitumen en ambas formaciones.

En la figura 2 se presentan estilolitas rellenas de materia orgánica. La presencia de estilolitas rellenas de materia orgánica puede ser explicada por el mecanismo propuesto para la formación de estilolitas de disolución por presión (Pettijohn, 1975). La presencia de materia orgánica en estas estructuras puede ser consecuencia de que el espacio

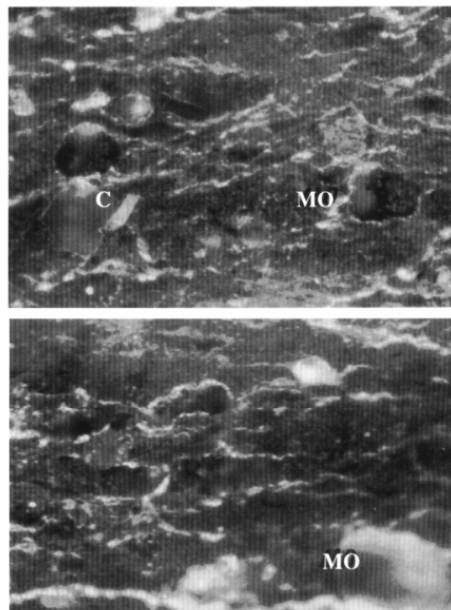


Figura 5. Materia orgánica en fracturas (luz fluorescente), calizas masivas de la Formación Querecual. MO = Materia Orgánica, C = Calcita.

poroso fue ocupado por la materia orgánica expulsada durante la generación del bitumen, o durante la formación de las estilolitas la materia orgánica dispersa fue acumulada en estas estructuras. Leythaeuser et al. (1995) indican la importancia de las estilolitas en la formación de acumulaciones de materia orgánica, considerando que, la materia orgánica dispersa que se encuentra en sedimentos carbonáticos se concentra durante la diagénesis en estilolitas, como consecuencia de la disolución por presión de los carbonatos. Los autores proponen que debido a la redistribución de la materia orgánica por disolución por presión se puede generar una fase continua de migración del bitumen a través de las

estilolitas.

Otro estilo de acumulación de la materia orgánica observada en ambas formaciones fue la distribución de esta alrededor de cristales de dolomita. Lo anterior se observa para la muestra ARQ35 (Fig. 3A) del tope de Querecual y la muestras QASA4 (Fig. 3B) de la base de San Antonio. La presencia de muestras con una alta proporción de dolomita está asociado a una porosidad relativamente mayor. El proceso de dolomitización está asociado a reducción del volumen, lo que lleva a un incremento de la porosidad de las muestras por dolomitización. Esto se evidencia al comparar los valores de porosidad de la muestra ARQ1, rica en calcita, correspondiente a 0,46%, con muestras que presentan una alta proporción de dolomita, correspondiente a ARQ36 y QASA4 con valores de 2,06% y 2,81% respectivamente. Por otra parte, la presencia de materia orgánica alrededor de cristales de dolomita es indicio de que la dolomitización ocurrió previo a la generación del bitumen.

Las acumulaciones de materia orgánica rellenando fósiles se pueden observar para las muestras ARQ28 (Fig. 4A) del tope de la Formación Querecual y QASA6 de la base de San Antonio (Fig. 4B). La presencia de materia orgánica rellenando cavidades de fósiles es otra evidencia de que el bitumen generado, es expulsado hacia las zonas de mayor porosidad de las rocas. Para la Formación San Antonio este tipo de acumulaciones fue menos frecuente en comparación con Querecual.

A nivel microscópico (secciones finas), la materia orgánica que rellena las fracturas (parale-

las y oblicuas a la laminación) fue mas frecuentemente para la Formación Querecual (Fig. 5) y existe conexión entre ambos tipos de fracturas, lo que es otra evidencia de la migración primaria a través de este tipo de estructuras. La menor frecuencia de fracturas rellenas de materia orgánica, observadas para la Formación San Antonio puede estar evidenciando una migración primaria menos eficiente en comparación a la Formación Querecual. Del estudio por petrografía orgánica (secciones pulidas) para la Formación Querecual la materia orgánica fluorescente se observó en fracturas paralelas y oblicuas a la laminación, que en algunos casos están asociadas a calcita y en masas aisladas. En la Formación San Antonio, para las lutitas calcáreas y las calizas, la materia orgánica fluorescente se observó principalmente en masas aisladas y en fracturas. La presencia de materia orgánica fluorescente en rocas sobremaduras como Querecual y San Antonio, con valores de T_{max} alrededor de 500 °C (Tabla 1), es indicio de que esta fluorescencia es causada por el bitumen acumulado en algunas zonas, como consecuencia de la migración primaria del bitumen a través de estas formaciones.

La presencia de estructuras tales como fracturas (paralelas y oblicuas a la laminación), cavidades de fósiles y estilolitas rellenas de materia orgánica son evidencias de que este tipo de estructuras sirvieron como vías para la migración del bitumen a través de la roca fuente. Se propone que para la sección tipo de la Formación Querecual la migración primaria ocurrió a través de las macro y microfracturas presentes en la roca fuente. El origen de estas fracturas se considera consecuencia de la sobrepresión creada por los fluidos durante la generación del bitumen, basado esto en la baja porosidad y permeabilidad de las rocas de esta formación. Se considera que el proceso de generación de las fracturas y el transporte del bitumen a través de estas ocurre en pulsos continuos en el tiempo. Las fracturas pueden generarse y expulsar el bitumen con posterior migración, relacionado esto a diferentes pulsos de generación durante el avance de madurez de la roca fuente. Para el caso de la Formación San Antonio, donde este tipo de estructuras es menos frecuente en comparación a Querecual, se puede considerar consecuencia de las concentraciones de carbono orgánico (Corg), la distribución de la materia orgánica en la roca, la composición mineralógica o la textura de la roca. Ungerer et al. (1983) basados en consideraciones teóricas y trabajos experimentales estiman el incremento del volumen de la materia orgánica bajo

MUESTRA	COT (% p/p)	Tmax (°C)
ARQ3	2,4	541
ARQ7	4,8	544
ARQ15A	3,6	541
ARQ21	2,7	537
ARQ26	2,1	530
ARQ31	1,7	514
ARQ28	1,9	517
AHQ34	1,2	496
ARQ35	1,4	518
QASA2	2,6	539
QASA6C	2,3	507
QASA10	1,9	448
QASA12B	1,6	452
QASA15	2,1	463
QASA16	2,5	506

Tabla 1. Resultados de pirólisis Rock-Eval para las Formaciones Querecual (calizas) y San Antonio (lutitas). COT = Carbono Orgánico Total. Tmax = Máximo de generación de hidrocarburos durante la pirólisis.

FORMACIÓN	TIPO DE ROCA	COMPOSICIÓN MINERALÓGICA
QUERECUAL	Calizas Masivas	calcita, dolomita, cuarzo, piritita y siderita
	Calizas Laminadas	calcita, cuarzo, piritita y siderita
SAN ANTONIO	Calizas	dolomita, calcita, cuarzo y piritita
	Lutitas Calcáreas	cuarzo, calcita, dolomita, y piritita

Tabla 2. Composición mineralógica para las muestras de las secciones tipos de las Formaciones Querecual y San Antonio.

condiciones de presión, temperatura y volumen a las profundidades de generación del bitumen, con énfasis a su importancia durante la migración primaria. Los autores indican que durante la catagénesis el incremento en el volumen de la materia orgánica no excede el 15% del volumen inicial de la materia orgánica, pero durante la metagénesis los gases generados producen una expansión considerable que puede favorecer la formación de fracturas. Se debe esperar, que en rocas fuentes sobremaduras como Querecual y San Antonio, el proceso de generación de fracturas por sobrepresión haya sido importante, y especialmente en las zonas de la roca ricas en materia orgánica o donde la materia orgánica se encontraba acumulada preferencialmente.

Con el objeto de estudiar el efecto de la concentración de Corg y la mineralogía de la roca, con la generación de fracturas y posterior migración del bitumen, se realizó una comparación entre las muestras con mayor frecuencia de fracturas rellenas de materia orgánica y sus concentraciones respectivas de Corg. Para la Formación Querecual, se encontró que no se puede inferir una relación directa entre la frecuencia de fracturas rellenas de materia orgánica y las concentraciones de Corg, ya que para algunas muestras donde la frecuencia de fracturas rellenas de materia orgánica (observado a través del estudio petrográfico) es baja o ausente, sus concentraciones de Corg son superiores en comparación con el grupo de muestras donde las fracturas rellenas de materia orgánica fueron mas comunes. Para las lutitas calcáreas y calizas de la Formación San Antonio las concentraciones de Corg son muy similares a las encon-

tradas para las calizas masivas y laminadas de Querecual. Por otra parte, la composición mineralógica para las rocas de ambas formaciones corresponde a calcita, dolomita, cuarzo, piritita y siderita (Tabla 2), lo que no permite inferir una relación directa entre las concentraciones de Corg y la mineralogía con la frecuencia de fracturas rellenas de materia orgánica observadas en las muestras.

Respecto a la textura de la roca fuente, si se comparan en primer lugar las calizas masivas y laminadas de Querecual, se tiene que para las calizas laminadas tanto a nivel macro como microscópico, la materia orgánica se observó acumulada en fracturas paralelas y oblicuas a la laminación y entre los planos de laminación de la roca, donde estas presentaban una forma continua en la muestra. Para las calizas masivas, también se observó la materia orgánica en fracturas paralelas y oblicuas a la laminación, pero fueron menos frecuentes y de forma discontinua. Se sugiere que la menor frecuencia de fracturamiento observado para las calizas masivas respecto a las laminadas puede ser consecuencia del efecto de la textura de la roca sobre el fenómeno de sobrepresión de los fluidos, donde es mas fácil producir fracturamiento en las calizas laminadas respecto a las masivas, ya que estas últimas son mas compactas. Al comparar las calizas de Querecual con las lutitas calcáreas de San Antonio, donde no se observaron acumulaciones de materia orgánica en las muestras de mano y fueron escasas a nivel microscópico, se puede explicar también por la diferente textura de la roca, ya que las rocas carbonáticas son mas frágiles y mas homogéneas que las lutitas y como conse-

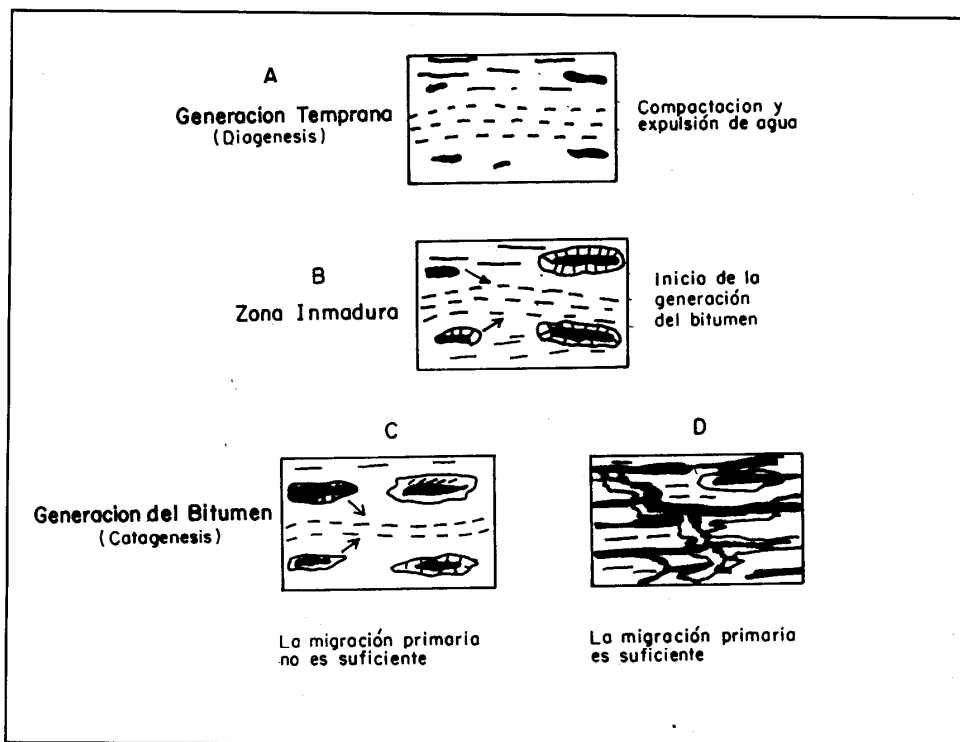


Figura 6. Modelo de generación y expulsión del bitumen en rocas fuentes (modificado de Durand, 1987).

cuencia las calizas son más susceptibles a sufrir fracturamiento que permita la migración del bitumen.

Jones (1984) considera que tanto para rocas fuentes calcáreas como lutíticas, la migración primaria puede ocurrir por mecanismos similares. Sin embargo, el autor expresa que pueden existir diferencias significativas que dependen no solo de las características orgánicas, sino también de las propiedades químicas y en especial de las propiedades físicas de una roca fuente. Jones (1984) considera que las rocas carbonáticas y lutíticas son completamente diferentes en sus propiedades físicas, en particular las rocas carbonáticas son físicamente más frágiles que las lutitas y en consecuencia son más propensas a sufrir fracturamiento en comparación a las lutitas. Lo anterior concuerda con los resultados obtenidos en este estudio y tiene implicaciones directas en la migración y expulsión del bitumen ya que la migración debería haber ocurrido principalmente a través de las fracturas presentes en las rocas de ambas formaciones debido a la baja porosidad y permeabilidad que estas presentan (López, 1997).

La menor frecuencia de fracturamiento observada para la Formación San Antonio es consecuencia de un comportamiento menos frágil de las lutitas respecto a las calizas que trae como consecuencia una migración y expulsión menos efectiva para esta respecto a la Formación Querecual.

Las diferencias observadas en los estilos de acumulación de la materia orgánica y la frecuencia de estos para las Formaciones Querecual y San Antonio es un ejemplo del modelo propuesto por Durand (1987) para la generación, migración y expulsión del bitumen en rocas fuentes. Este modelo se basa en tres etapas sucesivas de evolución por el avance de la madurez y la distribución y cantidad de materia orgánica presente en la roca (Fig. 6). En la primera etapa, la roca fuente es inmadura (etapa de diagenesis) y la materia orgánica consiste principalmente en kerógeno, y no ha ocurrido la generación del bitumen, por lo tanto, la única expulsión corresponde al agua como consecuencia en la compactación (Fig. 6A). En un segundo estado correspondiente a la diagenesis temprana el bitumen generado podría ser muy viscoso y presentar un

CONCENTRACIÓN	FORMACIÓN QUERECUAL			FORMACION SAN ANTONIO		
	Mínimo	Promedio	Máximo	Mínimo	Promedio	Máximo
BITUMEN	18	154	354	67	525	1170
HC. SATURADOS	14	28	66	10	49	86
HC. AROMÁTICOS	9	20	31	3	16	57
RESINAS	15	41	56	4	14	47
ASFALTENOS	4	15	25	1	17	59

(36 MUESTRAS)

(19 MUESTRAS)

Tabla 3. Concentraciones de bitumen (ppm) y de sus fracciones constituyentes (% p/p) para las Formaciones Querecual y San Antonio.

carácter olofílico debido a la pérdida de los grupos funcionales que contienen oxígeno. Por lo tanto, las zonas ricas en materia orgánica podrían formar una red humedecida con bitumen en la roca fuente. En este estado la poca cantidad de bitumen generado podría ser retenido dentro del kerógeno o adsorbido por las fases minerales de la roca fuente, por lo que la expulsión no sería efectiva (Fig. 6B).

El tercer estado corresponde a la catagénesis y puede presentar diferentes características. Un primer caso cuando la roca fuente es rica en kerógeno y este se encuentra distribuido de forma homogénea (Fig. 6C). Bajo estas condiciones una gran proporción de kerógeno ha sido transformada en bitumen y este debería ser menos viscoso, el bitumen puede formar una fase continua dentro de la roca fuente por la ausencia de agua y puede ser expulsado a través de las fracturas generadas. Otra posibilidad es que la roca fuente presente menor cantidad de kerógeno o este se encuentre distribuido de forma heterogénea en la roca (esparcido dentro de la matriz mineral), en este caso las dos primeras etapas serían similares al de la roca rica en kerógeno, pero en esta tercera etapa pueden diferir, ya que la cantidad de bitumen generado no satura la roca fuente y podrían no generar suficientes fracturas como para formar una fase continua del bitumen para la migración y expulsión (Fig. 6D).

Este modelo puede explicar satisfactoriamente las características petrográficas observadas por las Formaciones Querecual y San Antonio, las cuales se caracterizan por presentar el mismo tipo de kerógeno (tipo II), pero difieren en los estilos de acumulación de la materia orgánica, lo que puede ser consecuencia de la diferencia en el contenido y la distribución del kerógeno, y las diferencias en la textura en las rocas fuentes. Para ambas formaciones ubicadas en la tercera etapa del modelo de Durand (1987), ya que se trata de rocas fuentes maduras, la etapa 3C corresponde al caso

de la Formación San Antonio y la 3D a Querecual y se evidencia que la calidad de una roca fuente no solo va a depender de la concentración de carbono orgánico, ya que factores como la distribución de kerógeno y la posibilidad de generar fracturamiento son indispensables para producir una migración y expulsión eficiente y de allí obtener acumulaciones de petróleo de importancia económica.

Evidencias Geoquímicas: Comparación de las Formaciones Querecual y San Antonio

En la tabla 3 se presentan las concentraciones máximas, mínimas y promedio para el bitumen y sus fracciones para ambas formaciones. En esta se puede observar que las concentraciones de bitumen resultan superiores para la Formación San Antonio en comparación a Querecual, esto puede ser consecuencia de una menor eficiencia de expulsión del bitumen de la Formación San Antonio, tal como se evidencia por la poca frecuencia de fracturamiento observado. Al comparar las concentraciones de bitumen en las lutitas calcareas y las calizas de la Formación San Antonio (Tabla 4) con las areniscas, donde estas últimas se consideran rocas receptoras del bitumen migrado y expulsado de las lutitas y calizas, se obtiene una mayor concentración de bitumen para las posibles rocas generadoras (calizas y lutitas). Esto puede ser explicado considerando la menor eficiencia de expulsión desde las lutitas y calizas hacia las areniscas como consecuencia de los factores anteriormente explicados tales como distribución y cantidad de kerógeno, bitumen y litología de la roca fuente. La menor eficiencia de expulsión trae como resultado que las concentraciones de bitumen sean superiores.

Al comparar las concentraciones de hidrocarburos saturados para ambas formaciones (Tabla 3), al igual que para el caso del bitumen, estas son superiores en San Antonio respecto a Querecual, lo que también está evidenciando la menor eficiencia de expulsión del bitumen de San Antonio. Esto último apoyado en que la fracción

CONCENTRACIÓN	ARENISCAS			LUTITAS Y CALIZAS		
	Mínimo	Promedio	Máximo	Mínimo	Promedio	Máximo
BITUMEN	67	293	710	293	660	1170
HC. SATURADOS	10	44	68	15	52	86
HC. AROMÁTICOS	3	8	14	7	20	57
RESINAS	4	21	47	6	9	26
ASFALTENOS	2	27	59	1	10	20

(7 MUESTRAS)

(12 MUESTRAS)

Tabla 4. Concentraciones de bitumen (ppm) y de sus fracciones constituyentes (% p/p) para las diferentes litologías de la Formación San Antonio en su sección tipo.

de hidrocarburos saturados de bajo peso molecular y de menor polaridad, se debería esperar que corresponda a la fracción relativamente más móvil del bitumen (Tissot & Welte, 1984; Leythaeuser et al., 1983; 1987; 1988^a). Esto se evidencia claramente en la sección tipo de la Formación Querecual, donde se observó una migración relativamente mayor de la fracción de hidrocarburos saturados a través de la sección (López, 1997).

Para las fracciones de hidrocarburos aromáticos, resinas y asfaltenos las cuales presentan una menor movilidad relativa durante la migración primaria (Tissot & Welte, 1984; Leythaeuser et al., 1983; Peters & Moldowan, 1993), y deberían ser retenidas preferencialmente en la roca fuente, estas son superiores para la Formación Querecual respecto a San Antonio (Tabla 3). Lo anterior puede ser consecuencia de la expulsión preferencial de los hidrocarburos saturados de Querecual y la retención o menor movilidad de las fracciones de mayor polaridad y peso molecular, durante la migración primaria. Como consecuencia ocurre un enriquecimiento relativo de las fracciones pesadas (hidrocarburos aromáticos, resinas y asfaltenos) que se ve reflejado en una mayor concentración de estas. Para el caso de la Formación San Antonio, donde la expulsión es menos eficiente para la fracción de menor polaridad y peso molecular (hidrocarburos saturados), este enriquecimiento relativo de las fracciones más polares y de mayor peso molecular es menos pronunciado y no se refleja en las concentraciones obtenidas.

Al comparar las concentraciones de hidrocarburos saturados y aromáticos en las diferentes litologías de la Formación San Antonio, como se realizó anteriormente para sus concentraciones de bitumen, se observa que la concentración de hidrocarburos saturados y aromáticos son superiores para las lutitas calcáreas y calizas respecto

a las areniscas (Tabla 4), mientras que las resinas y asfaltenos ocurre lo contrario. La mayor concentración de hidrocarburos saturados y aromáticos en las lutitas y calizas también es consecuencia de la menor eficiencia de expulsión de estas rocas, lo que lleva a que no se observe un enriquecimiento relativo de las fracciones de mayor polaridad y peso molecular del bitumen (resinas y asfaltenos).

El hecho de que las concentraciones de las fracciones de mayor polaridad y peso molecular (resinas y asfaltenos) sean superiores en las areniscas respecto a las concentraciones de hidrocarburos saturados y aromáticos (Tabla 4) se puede explicar considerando que, una vez que el bitumen es expulsado de las calizas y lutitas hacia las areniscas y la migración continúa a través de estas últimas, debido a la migración relativamente mayor de las fracciones de hidrocarburos saturados y aromáticos, ocurre un incremento relativo de las fracciones más polares y de mayor peso molecular en las areniscas.

Las variaciones observadas en las concentraciones de las fracciones constituyentes del bitumen pueden considerarse consecuencia de la migración primaria, y no a una posible biodegradación de las fracciones livianas debido a que se trata de muestras tomadas en afloramientos, ya que tanto para la Formación Querecual como para San Antonio se observaron distribuciones normales de *n*-alcanos (Figs. 7 y 8).

CONCLUSIONES

La mayor abundancia de estructuras rellenas de la materia orgánica para las calizas de la Formación Querecual en comparación a las lutitas y calizas de la Formación San Antonio, al igual que la mayor concentración de bitumen y de las fracciones de menor peso molecular y polaridad (hidrocarburos saturados y aromáticos) respecto a

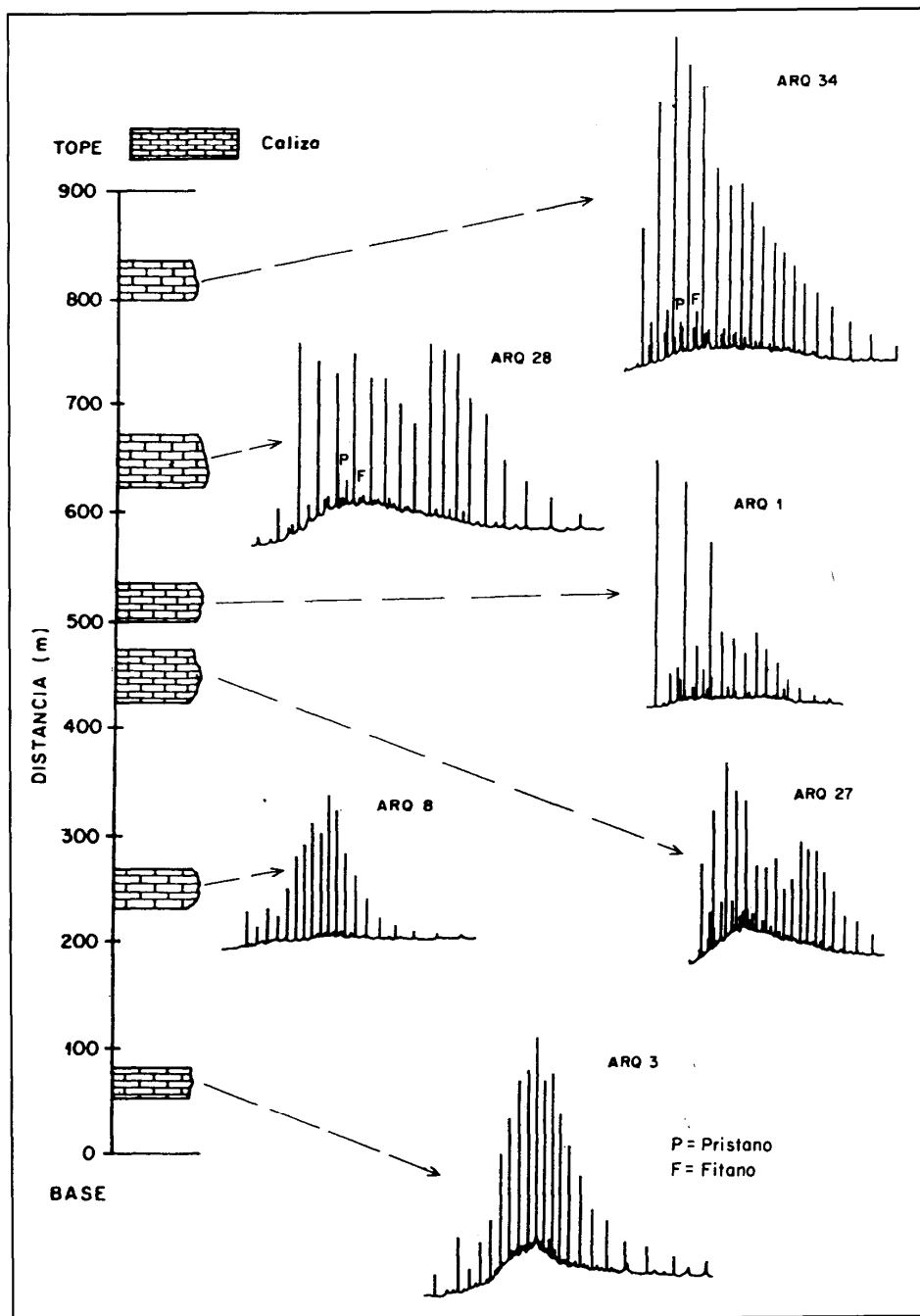


Figura 7. Cromatogramas de la fracción de hidrocarburos saturados para muestras de la sección tipo de la Formación Querecual.

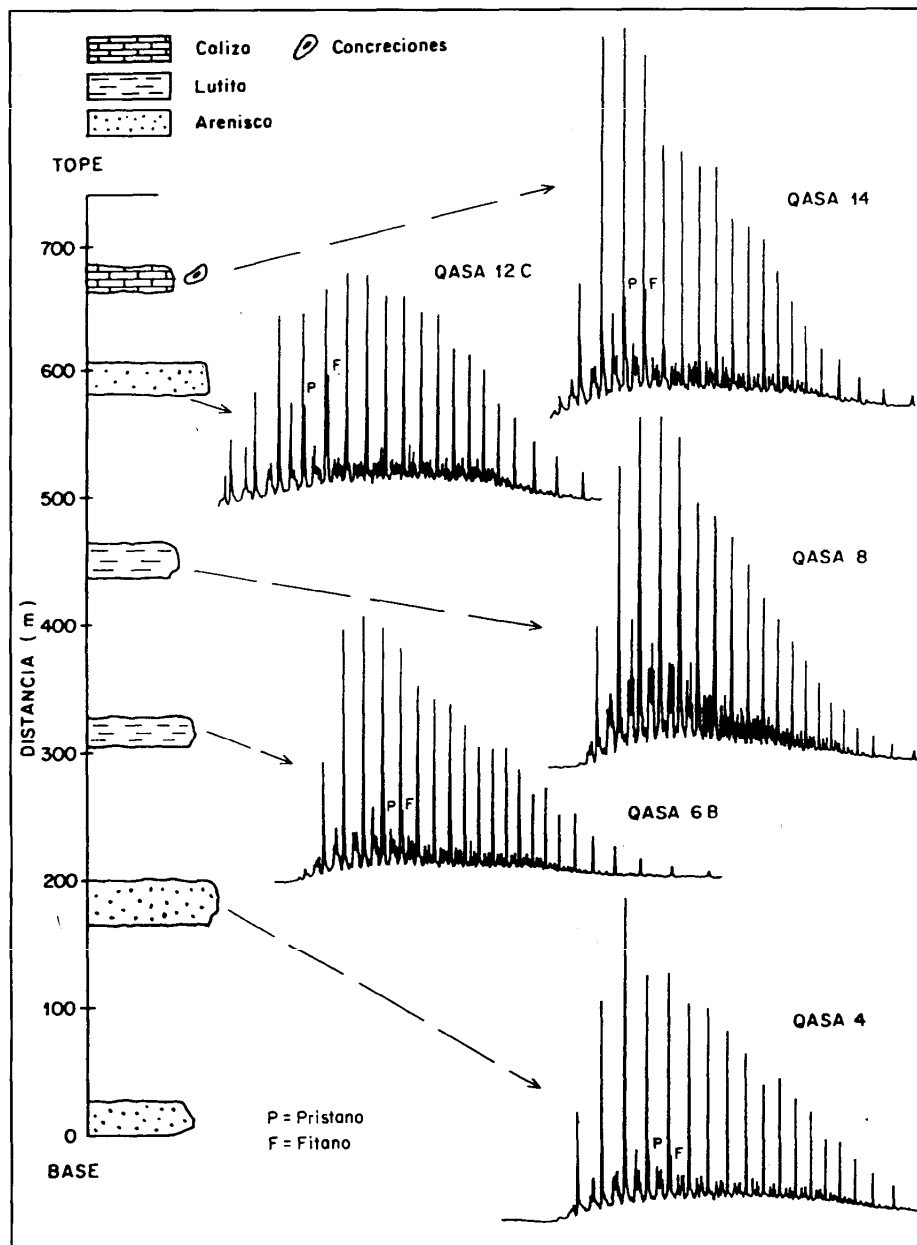


Figura 8. Cromatogramas de la fracción de hidrocarburos saturados para muestras de la sección tipo de la Formación San Antonio.

las fracciones de mayor peso molecular y polaridad (resinas y asfaltenos) obtenidas para la Formación San Antonio en comparación a Querecual, indican que la migración y expulsión del bitumen fue menos eficiente para la Formación San Antonio.

Las evidencias geológicas concuerdan con la proposición de un comportamiento más frágil para las calizas en comparación con las lutitas, y por lo tanto estas últimas son más susceptibles a sufrir fracturamiento como consecuencia de la sobrepresión creada por los fluidos durante la generación del bitumen.

Se evidencia que la calidad de una roca fuente no solo está relacionada a su concentración de carbono orgánico y a su madurez, ya que el proceso de migración y expulsión del bitumen deben ser factores considerados para definir la calidad de una roca fuente. Estos factores están relacionados a la cantidad y distribución de la materia orgánica (bitumen y kerógeno) y a las características litológicas (composición mineralógica, porosidad, permeabilidad, textura, estructura) de la roca fuente.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico de la Universidad Central de Venezuela por el financiamiento otorgado a través de los proyectos N° 03.1846/87 y 03.32.2523/91.

Al Dr. R. di Primio por sus comentarios y sugerencias que colaboraron a mejorar este manuscrito.

Los análisis de pirólisis fueron realizados por Exxon Production Research Company.

REFERENCIAS

- AILLOUD, P.; AROZENA, J.; BAUMANN, P.; CASSANI, F.; DEROO, G.; EURIBE, A.; HERBIN, J.; LAMBERTINI, R. & ROUCACHE, J. 1980 Estudio geoquímico de la Cuenca Oriental de Venezuela y de la Faja Petrolífera del Orinoco: INTEVEP, Informe, 70 p.
- BRUKNER, A. & VETO I. 1983 Extracts from the open and closed pores of Upper Triassic sequences from W. Hungary: A contribution to studies of primary migration. In: BJOROY, M. et al. Eds. *Advances in Organic Geochemistry*, 5:175-182.
- COMER, J.B. & HINCH, H.H. 1987 Recognizing and quantifying expulsion of oil from the Woodford Formation and age-equivalent rocks in Oklahoma and Arkansas. *Bull. Am. Assoc. Pet. Geol.*, 71: 844-858.
- DURAND, B. 1987 Understanding of HC migration in sedimentary basins (present state of knowledge). In: MATTAVELLI, L. & NOVELLI, L. Eds. *Advances in Organic Geochemistry*, 13:445-459.
- ESCOBAR, M.; PASQUALI, J. & TOCCO, R. 1989 Estudio geoquímico de bitúmenes de la Formación La Luna, en el pozo 33F-1X, Campo Alpuf, Edo. Zulia: Evidencias de migración primaria. VII Congreso Geológico Venezolano, *Memorias*, Tomo III, pp. 1498-1519.
- GONZÁLEZ, J. C.; ITURRALDE, J.M. & PICARD, X. 1980 *Geología de Venezuela y de sus Cuencas Petrolíferas*. Caracas, Ediciones Foninves, 1031p.
- HEDBERG, H. 1937 Estratigrafía de la región del río Querecual en el noreste de Anzoátegui, Venezuela. *Bol. Geol. Min.*, Ministerio de Fomento, Tomo I, pp. 253-265.
- JANEZIC, G.G.; TOTH, D. & SCHRAYER, G.J. 1982 Integrated Geological study Eastern of Venezuelan Basin. Part 2: Organic Geochemistry. *Gulf Meneven*, pp 39-62.
- KROSS, B.M.; BROTHERS, L. & ENGEL, M.H. 1991 Geochromatography in petroleum migration: a review. In: ENGLAND, W.A. & FLEET, A.J. Eds. Petroleum migration. *Special Publication*, n. 59. Published by the Geological Society London, pp. 149-163.
- JONES, R.W. 1984 Comparison of carbonate and shale source rock: Petroleum geochemistry and source rock potential of carbonate rocks. In: PALACAS, J.G. Ed., *Am. Assoc. Pet. Geol. Stud. Geol.*, 8(18):163-180.
- LEWAN, B.D. 1987 Petrography study of primary petroleum migration in the Woodford Shale and related rock units: Migration of Hydrocarbons in Sedimentary Basins, *IFP Exploration Research Conferences* Editions Technip, Paris, pp. 113-130.
- LEYTHAEUSER, D.; MACKENZIE, A.S.; SCHAEFER, R.G.; ALTEBAUMER, F.J. & BJOROY, M. 1983 Recognition of migration and its effects within two coreholes in shale/sandstone sequences from Svalbard, Norway. In: BJOROY, M. et.al. Eds. *Advances in Organic Geochemistry*, pp. 136-146.
- LEYTHAEUSER, D.; SCHAEFER, R.G. & RADKE, M. 1987 On the primary migration of petroleum. 12th World Petrol. Cong. *Proceedings*, Houston, 1987. John Wiley and Sons, London, pp. 227-236
- LEYTHAEUSER, D.; SCHAEFER, R.G. &

- RADKE, M. 1988a Geochemical effects of primary migration of petroleum in Kimmeridge source rocks from Brae field area, North Sea I: Gross composition of C15+-soluble organic matter and molecular composition of C15+-saturated hydrocarbons. *Geochim. Cosmochim. Acta.* 52:701-713.
- LEYTHAEUSER, D.; RADKE, M. & WILLSCH, H. 1988b Geochemical effects of primary migration of petroleum in Kimmeridge source rocks from Brae field area, North Sea II: Molecular composition of alkylated naphthalenes, phenantrenes, benzo- and dibenzothiphenes. *Geochim. Cosmochim. Acta.* 52:2879-2891.
- LEYTHAEUSER, D.; BORRAMEO, O.; MOSCA, F.; DI PRIMIO, R.; RADKE, M. & SCHAEFER, R.G. 1995 Pressure solution in carbonate source rocks and its control on petroleum generation and migration. *Marin. and Petrol. Geol.* 12:713-733.
- LÓPEZ, L.; SEQUERA, Z. & GALARRAGA, F. 1996 Primary migration within the Querecual Formation: Distribution of biomarkers. II AAPG International Congress and Exhibition. Caracas, Venezuela, p. A28.
- LÓPEZ, L. 1997 Evidencias de migración primaria del bitumen: Formación Querecual, Venezuela. *Interciencia*, 22:228-237.
- PETERS, K.E. & MOLDOWAN, J.M. 1993 *The biomarker guide: Interpreting molecular fossils in petroleum and ancient sediments*. Prentice Hall, New Jersey, 363 p.
- PETTJOHN, F. J. 1975 *Sedimentary Rocks*, Third edition, Harper and Row, Publishers, New York, 628 p.
- PRICE, L. C. 1979 Primary petroleum migration from shales with oxygen-rich organic matter. *Journal Petrol. Geol.* 12:289-324.
- TALUKDAR, S.; GALLANGO, O.Y. & RUGGERO, A. 1985 Formaciones La Luna y Querecual de Venezuela: Rocas madres de petróleo. VI Congreso Geológico Venezolano, *Memorias*, Tomo VI, pp. 3606-3642.
- TALUKDAR, S.; GALLANGO, O.Y. & RUGGERO, A. 1987 Estudio geoquímico regional de la subcuenca de Maturín. Intevp N°. INT-01543,86.
- TALUKDAR, S.; GALLANGO, O.Y. & RUGGERO, A. 1988a Generation and migration of oil in the Maturín subbasin, Eastern Venezuelan basin. In: MATTAVELLI, L. & NOVELLI, L. Eds. *Advances in Organic Geochemistry*, 13:537-547.
- TALUKDAR S., GALLANGO O.Y., VALLEJOS C. & RUGGERO A. 1988b, Observations on the primary migration in the La Luna source rocks of the Maracaibo Basin, Venezuela. *Revue de l'Institut Français du Pétrole*, 43:357-370.
- TISSOT, B.P. & WELTE, D.H. 1984 *Petroleum Formation and Occurrence*. New York, Springer Verlag, 699p.
- UNGERER, D.; BEHAR, E. & DISCAMPS, D. 1983 Tentative calculation of the overall volume expansion of organic matter during hydrocarbons genesis from geochemical data. Implications for primary migration. In: BJOROY, M. et al. Eds. *Advances in Organic Geochemistry*, pp.129-135.
- VIVAS, V.; MACSOTAY, O.; FURRER, M & ALVAREZ, E. 1988 Inyectitas clásticas asociadas a desplomes en sedimentitas batiales del Cretácico Superior de Venezuela nor-Oriental. *Bol. Soc. Ven. Geol.*, 34:3-33.