

Determinación de kerógenos tipo II y III a partir de la palinología en la Formación San Cayetano, Cuba occidental.

Aliena Flores Nieves¹, Orelvis Delgado López².

¹ *Licenciada en Biología. Máster en Geología Petrolera. Investigador Agregado. Centro de Investigación del Petróleo, Churrucá Nro 481, El Cerro, La Habana, Cuba C.P. 12000. ORCID: 0009-0005-5672-028X. Correo E.: aliena@cein-pet.cupet.cu; alienaf2111@gmail.com.*

² *Ingeniero Geólogo, Master en Ciencias Geológicas, Investigador Agregado, Centro de Investigación del Petróleo, Churrucá No 481, El Cerro, La Habana, Cuba C.P. 12000. ORCID: 0000-0003-2499-1550. Correo E: orelvis@cein-pet.cupet.cu; orelvisdl@gmail.com.*

RESUMEN

El tipo de kerógeno presente en una roca madre determina si la misma es generadora de gas o petróleo, así como la calidad comercial primaria de esos hidrocarburos. Estos datos ayudan a definir el potencial exploratorio de un área dada. En la actualidad, el tipo de kerógeno se determina, en su mayoría, por métodos instrumentales mediante pirólisis Rock Eval, pero estos estudios no siempre son efectivos, pues hay parámetros que el equipo no determina en muestras con alta madurez termal. Bajo el microscopio, el kerógeno se presenta como fragmentos orgánicos diseminados, algunos de ellos son estructurados, es decir, son reconocibles como fragmentos de tejidos de plantas, esporas, algas, etc., conocidos como palinomorfos. El objetivo de la presente investigación fue determinar el tipo de kerógeno en la Formación San Cayetano a partir de muestras de afloramiento en Loma Caraza, provincia Artemisa, Cuba, mediante estudios palinológicos. Se estudiaron un total de 10 muestras. Se identificó el material presente en ellas y a partir de estos, las unidades biológicas denominadas macerales. El estudio cuanti-

tativo permitió determinar tipo y prevalencia de kerógeno (tipo II-III, con prevalencia de uno sobre otro en dependencia del sitio de deposición), en una localidad donde la técnica Rock Eval no funcionó para esta tarea. Se indicó con más precisión el grado de madurez del kerógeno a partir del índice de coloración de esporas (color marrón-negro, sobremaduro y color marrón oscuro, maduro tardío) lo que se traduce en la posibilidad de generación de hidrocarburos líquidos y gaseosos.

Palabras clave: kerógeno, palinología, San Cayetano, macerales, madurez del kerógeno.

ABSTRACT

The type of kerogen present in a source rock determines whether it can generate gas or oil, as well as the primary commercial quality of those hydrocarbons. These data help define the exploratory potential of a given area. Currently the type of kerogen is mainly determined by instrumental methods using Rock Eval pyrolysis, but these studies are not always effective, since there are parameters that the equipment does not

determine in samples with high thermal maturity. Under the microscope, kerogen appears as scattered organic fragments, some of them are structured, that is, they are recognizable as fragments of plant tissues, spores, algae, etc., known as palynomorphs. The objective of this research was to determine the type of kerogen in the San Cayetano Formation from outcrop samples in Loma Caraza, Artemisa province, Cuba, through palynological studies. Ten samples were studied. The material present in them was identified, and from these, the biological units called macerals. The quantitative study made it possible to determine the type and prevalence of kerogen (type II-III, with prevalence of one over the other depending on the deposition site), in a locality where the Rock Eval technique did not work for this task. The degree of maturity of the kerogen was indicated more precisely from the Spore Coloration Index (brown-black color, overmature and dark brown color, late mature) which indicates the possibility of generation of liquid and gaseous hydrocarbons.

Key words: kerogene, palinology, San cayetano, macerals, maturity of kerogene

RESUMO

O tipo de querogênio presente em uma rocha geradora determina se ela pode gerar gás ou óleo, bem como a qualidade comercial primária desses hidrocarbonetos. Esses dados ajudam a definir o potencial exploratório de uma determinada área. Atualmente, o tipo de querogênio é determinado principalmente por métodos instrumentais utilizando pirólise Rock Eval, mas nem sempre esses estudos são eficazes, pois existem parâmetros que o equipamento não determina em amostras com alta maturidade térmica. Ao microscópio, o querogênio aparece como fragmentos orgânicos disseminados, alguns dos quais estruturados, ou seja, reconhecíveis como fragmentos de tecido vegetal, esporos, algas, etc., conhecidos como palinómorfs. O objetivo desta pesquisa foi determinar o tipo de querogênio na Formação San Cayetano a partir de amostras de afloramento em Loma Caraza, província de

Artemisa, Cuba, por meio de estudos palinológicos. Dez amostras foram estudadas. Foi identificado o material neles presente e, a partir destes, as unidades biológicas denominadas macerais. O estudo quantitativo permitiu determinar o tipo e prevalência de querogênio (tipo II-III, com prevalência de um sobre o outro dependendo do local de deposição), em uma localidade onde a técnica de Rock Eval não funcionou para essa tarefa. O grau de maturidade do querogênio foi indicado com maior precisão a partir do índice de coloração dos esporos (cor marrom- preto, sobremaduro e marrom escuro, maduro tardio), que se traduz na possibilidade de geração de hidrocarbonetos líquidos e gasosos.

Palavras chave: querogênio, palinologia, San Cayetano, macerais, maturidade do querogênio.

INTRODUCCIÓN

La Formación San Cayetano aflora en el occidente de Cuba y ha sido atravesada por algunos pozos profundos localizados en esa región. Está compuesta por argilita, arenisca y limolita, al existir intercalaciones de conglomerado y caliza hacia el tope de la formación en la Sierra del Rosario, al rellenar las cuencas de grábenes y semi-grábenes desarrolladas durante la etapa sincrónica a la ruptura de Pangea. Los últimos estudios realizados, la sitúan entre el Jurásico Temprano-Jurásico Medio Calloviano (Flores-Nieves, 2018).

Estudios geoquímicos realizados demuestran la riqueza de materia orgánica que contienen estos sedimentos (Magnier *et al.*, 2004), pero el análisis de Carbono Orgánico Total (COT) no basta para su evaluación como roca madre. Se necesita conocer el tipo de materia orgánica presente y tipo de hidrocarburos que podría generar, por lo que determinar el tipo de kerógeno y la madurez termal es imprescindible para valorizar el potencial generador de hidrocarburos de estos sedimentos.

El kerógeno se define como la materia orgánica en las rocas sedimentarias que es insoluble en solventes orgánicos, a diferencia de la porción soluble de la materia orgánica que se denomina bitumen. Bajo el

microscopio, el kerógeno se presenta como fragmentos orgánicos diseminados. Algo de este material es estructurado, es decir, son reconocibles como fragmentos de tejidos de plantas, esporas, algas, etc. (Rocha-Mello, 1996).

La determinación de tipo de kerógeno, se realiza, generalmente, mediante información de pirólisis obtenida mediante el Rock-Eval, donde el índice de hidrogeno (IH) equivalente a la relación Hidrógeno/Carbono y el índice de oxígeno (IO), equivalente a la relación Oxígeno/Carbono, son graficados en el diagrama de Van Krevelen para determinar el tipo de kerógeno asociado a la roca madre (McCarthy *et al.*, 2011).

Pero existen otros métodos que también se emplean para la clasificación del kerógeno y su madurez termal: La petrografía orgánica y la palinología (Dem-bicki, 2009).

El objetivo de la presente investigación es determinar el tipo de kerógeno en la Formación San Cayetano a partir de muestras de afloramiento tomadas en la localidad de Loma Caraza, provincia Artemisa, Cuba Occidental, mediante estudios palinológicos. Como adición se identificó, a partir del material presente en ella, las unidades biológicas denominadas macerales y se precisó el grado de madurez del kerógeno por métodos ópticos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizó un muestreo detallado en el afloramiento conocido como Loma Caraza ($22^{\circ}46'55''$, $83^{\circ}06'51''$) (X: 282 914; Y: 329 646), donde se tomaron muestras en las litologías supuestamente fértiles con separación entre las muestras de 2 a 10 cm, desde la base del afloramiento hasta 55 cm hacia arriba (**Figura 1**).

Para el procesamiento de las muestras, 10 en total, nombradas LC, se siguió el protocolo expuesto en Flores-Nieves (2018). Fueron estudiadas dos láminas montadas por cada muestra, para un total de 20 láminas.

Se realizó el conteo total de palinomorfos por muestra, para realizar el procesamiento estadístico. Se calculó la frecuencia relativa porcentual de grupos importantes y determinantes para la identificación del tipo de kerógeno y su representatividad: esporomorfos, que agrupa polen y esporas, cutículas, restos leñosos, algas y microplancton marino, que agrupa dinoflagelados y acritarcos. El índice de coloración de esporas se utilizó para conocer el grado de madurez de la materia orgánica (Rull, 1999).

De manera general, en el afloramiento Loma Caraza se aprecia un corte muy plegado, bien estratificado y laminado en capas finas, donde existen intercalaciones de arenisca y argilita de distintos espesores (**Figura 2**).

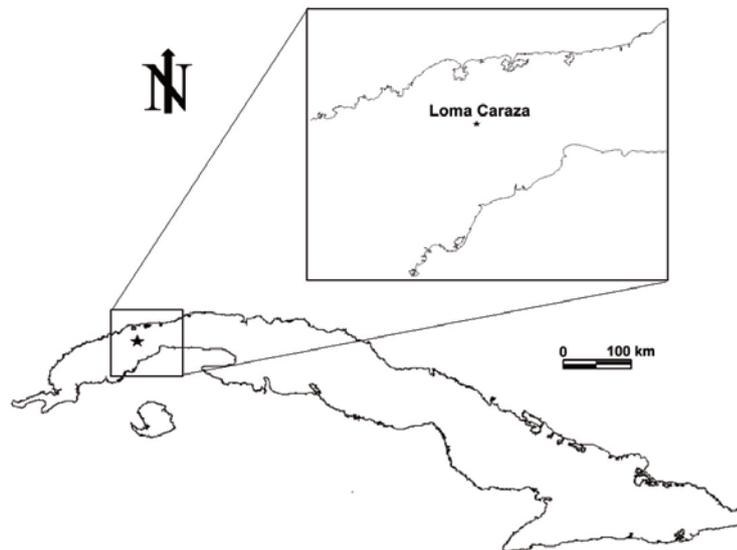


Figura 1. Zona del muestreo detallado en el afloramiento conocido como Loma Caraza



Figura 2. Afloramiento Loma Caraza.

La **Tabla 1** muestra la ubicación de los puntos de toma de las muestras en orden estratigráfico, de abajo a arriba, desde la base del afloramiento, con la indicación de las correspondientes litologías.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El conteo total de palinomorfos en las muestras estudiadas permitió determinar la cantidad presente de los grupos identificados, útiles para la determinación del tipo de kerógeno (**Tabla 2**).

Se aprecia que los esporomorfos y los restos leñosos aparecen en todo el corte y de manera predominante, en todas las muestras estudiadas (**Tabla 2**).

En el grupo de los esporomorfos prevaleció el polen, con mayor representación del género *Classopollis*. Estos fueron agrupados en grupos (I, II, III) al seguir criterios morfológicos, debido a que no se pu-

dieron observar caracteres identificativos para cada especie. Se identificó una gran cantidad de polen monocolpado. Los restos leñosos, son el resultado de la fragmentación mecánica de la madera, producida como consecuencia de su traslado desde la fuente de aporte. En el caso del microplancton marino, su mayor representación está dada por la presencia de Acritarcos, organismos unicelulares eucariotas, de pared orgánica, con afinidad biológica incierta. Muchos son, probablemente, quistes de algas marinas (Armstrong y Brasier, 2005).

Los dinoflagelados, solo reportados en las dos últimas muestras, se corresponden con el tipo cavado. Las algas identificadas corresponden al género *Cymatiosphaera* y otros restos donde no se pudo identificar las especies. En el grupo cutículas, se agruparon todos los tipos de fibrotraqueidas identificadas (**Figura 3**).

Muestras	Ubicación desde la Litología	
	Base del afloramiento [cm]	Descripción
LC10	55	Intercalaciones de arenisca arcillosa cuarzo micácea y argilita gris
LC9	51.5	Argilita gris con numerosas concreciones
LC8	41.5	Argilita gris con numerosas concreciones
LC7	31.5	Argilita gris con numerosas concreciones
LC6	29.5	Arenisca arcillosa laminada con pequeñas concreciones y mucha materia orgánica
LC5	26.5	Argilita gris oscura
LC4	20.5	Arenisca arcillosa micácea con materia orgánica
LC3	16.5	Arenisca arcillosa micácea
LC2	14	Argilita gris oscura

Tabla 1. Muestras tomadas en el afloramiento de Loma Caraza.

Muestras /Grupos	Esporomorfos	Cutículas	Restos leñosos	Algas	Microplancton marino
LC10	955	38	525	0	2
LC9	845	10	478	0	7
LC8	19	11	181	0	0
LC7	1173	25	862	0	13
LC6	300	21	502	0	2
LC5	644	23	619	0	7
LC4	95	21	97	0	1
LC3	65	24	290	0	0
LC2	409	33	630	11	4
LC1	791	3	865	12	23

Tabla 2. Cantidades determinadas de grupos establecidos para la determinación del tipo de kerógeno.

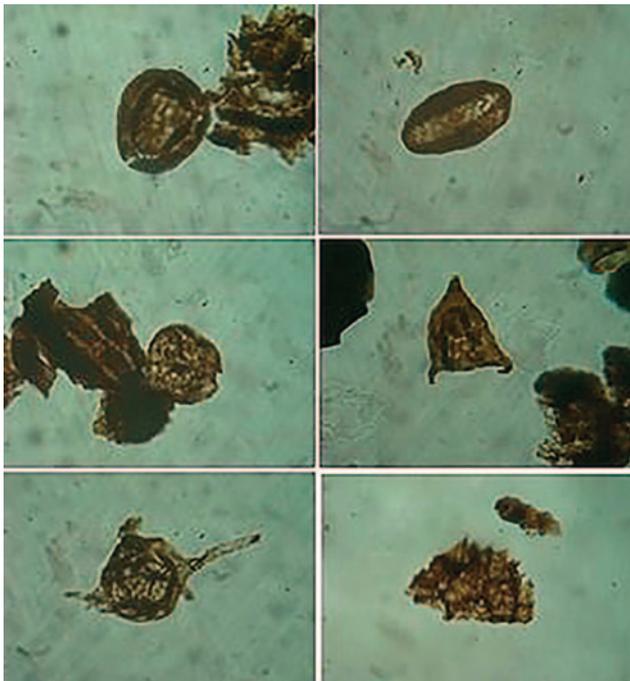


Figura 3. Palinomorfos identificados en las muestras. De izquierda a derecha, de arriba abajo: Classopolis Grupo II (polen de Cheirolepidiaceae), Monosulcites balmei (polen monocarpado), Granulatisporites sp B (espora) junto a resto leñoso, Veryachyum reductum (Acritarco), dinoflagelado cavado y Cymatiosphaera sp, (alga prasinofita).

Desde la base del corte hasta la muestra LC4, se aprecia un predominio de restos leñosos sobre los esporomorfos, con tendencia a la disminución de ambos grupos, al ser mínima la presencia de estos últimos en LC3. De LC4 a LC8, el predominio de uno u otro grupo varía de una muestra a otra, con una tendencia al aumento de la presencia de ambos grupos, con excepción de LC8 con comportamiento similar a LC3, pero con aún, menor representatividad de estos grupos. Al final del corte se observa un predominio de esporomorfos sobre restos leñosos, con una tendencia al aumento de ambos grupos.

Con respecto a los otros grupos identificados, las algas están presentes solo en la base del corte (LC1 y LC2); las cutículas y el microplancton marino están representados en todo el corte, aunque con una pobre presencia. En el caso del microplancton marino, no está presente en las muestras LC 3 y LC8 (**Figura 4**).

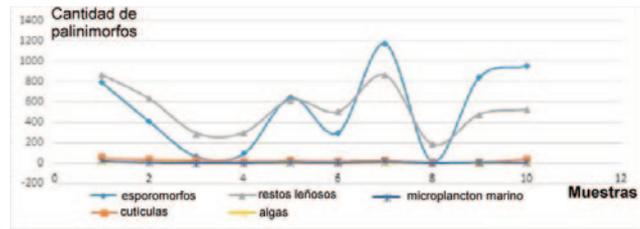


Figura 4. Abundancia de palinomorfos en muestras estudiadas.

En un trabajo previo (Flores-Nieves, 2011), se expuso el análisis detallado, realizado en esta localidad, referente a condiciones ambientales, fuentes de aporte y sitio de deposición, al tener en cuenta las asociaciones microflorísticas determinadas, sus porcentajes relativos y diversidad. La secuencia de LC1 a LC8 parece corresponder a un frente deltaico, con posibles emersiones temporales del área de deposición (LC3 y LC8) y con aumento de la salinidad, lo que se interpreta como profundización del sitio de acumulación, hasta llegar probablemente al prodelta (LC9 y LC10).

Tipo de Kerógenos

De manera general, se reconocen cuatro tipos de kerógeno principales presentes en las rocas madre: Kerógeno Tipo I, alta relación Hidrógeno/Carbono (H/C) inicial y baja relación Oxígeno/Carbono (O/C) inicial, derivado en lo fundamental de materia orgánica algal depositada en ambientes lacustres, productor por lo general de petróleo; Kerógeno Tipo II, moderadamente alta relación H/C inicial y moderada relación O/C inicial, derivado de materia orgánica autóctona (algas marinas, polen, esporas, hojas, ceras, cutículas y resinas), depositada bajo condiciones reductoras en ambientes marinos, productor en lo fundamental de petróleo; Kerógeno Tipo III, baja relación H/C inicial y alta relación O/C inicial, derivado de plantas terrestres y/o materia orgánica acuática, depositadas en ambientes oxidantes, productor principalmente de gas (Tissot *et al.*, 1984 en Dembicki, 2009); Kerógeno tipo IV, producto de alteración u/y oxidación de la materia orgánica en el ambiente de sedimentación, el cual viene a ser en lo esencial, inerte, incapaz de generar

hidrocarburos (Tissot y Welte, 1984). Se ha definido otro tipo de kerógeno, el IIS, donde el azufre sustituye al oxígeno en la estructura del kerógeno lo que resulta en la generación de petróleo con alto contenido de azufre (Orr, 1986 en Dembicki, 2009) (Tabla 3).

Tipos de kerógeno	Origen	Potencial de hidrocarburo
I	Cuerpos de algas, restos de pequeñas estructuras de origen algal	Petróleo
II	Pequeñas estructuras de material planctónico fundamentalmente de origen marino, polen, esporas, cutículas de hojas y plantas herbáceas, resinas	Petróleo
III	Fragmentos y pequeñas estructuras de plantas fibrosas y leñosas	Gas
IV	Restos leñosos retrabajados y oxidados	Nada

Tabla 3. Tipos de kerógeno y origen

Al tener en cuenta los precursores orgánicos del kerógeno, se pudo determinar el tipo que producen, así como los diferentes grupos de palinomorfos identificados en este trabajo.

El cálculo de las frecuencias relativas porcentuales de cada uno de estos grupos en los niveles muestreados, permitió determinar su representatividad a lo largo del corte estudiado (Tabla 4) (Figura 5).

Muestras	Frecuencias relativas porcentuales [%]				
	Esporomorfos	Cutículas	Restos leñosos	Algas	Microplancton marino
LC10	62.8	2.5	34.54	0	0.13
LC9	63	0.75	35.67	0	0.52
LC8	9	5.21	85.78	0	0
LC7	56.4	1.21	41.58	0	0.63
LC6	36.4	2.55	60.85	0	0.24
LC5	49.8	1.78	47.87	0	0.54
LC4	22.9	5.07	71.74	0	0.24
LC3	17.2	6.33	76.52	0	0
LC2	37.6	3.04	57.96	1.01	0.37
LC1	45.4	3.04	49.6	0.69	1.32

Tabla 4. Frecuencias relativas porcentuales de grupos estudiados.

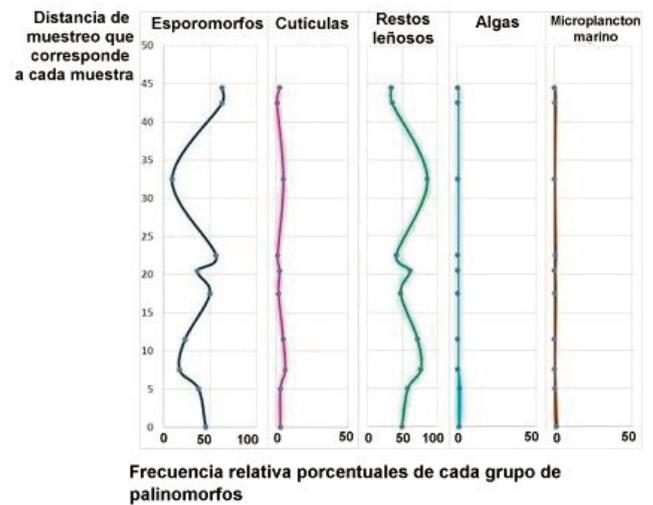


Figura 5. Frecuencias relativas porcentuales de los diferentes grupos.

Las algas (kerógeno tipo I) poseen frecuencias relativas muy bajas, solo presentes en la parte inferior, por lo que no se tienen en cuenta en el análisis. Lo mismo sucede con el microplancton marino (kerógeno tipo II), pero en este caso, al estar presentes otros grupos que producen este tipo de kerógeno, se integra al análisis. Las frecuencias relativas del grupo cutículas (kerógeno tipo II) son mayores que las de los grupos anteriores, aunque su valor máximo es de 6.3 %.

Los grupos de los esporomorfos (kerógeno tipo II) y de los restos leñosos (kerógeno tipo III) están bien representados en cada muestra, con frecuencias variables en todo el corte.

Al realizar un análisis por tipo de kerógeno determinado, se calcularon sus frecuencias relativas, para determinar su prevalencia (Figura 6).

Existe en todo el corte analizado una mezcla de tipo de kerógeno II y III, donde desde la base del corte hasta los 20 cm de altura (LC1-LC4) prevalece el kerógeno tipo III, a continuación, hacia arriba existe una zona donde es variable la prevalencia de uno u otro tipo de kerógeno. Por encima de los 40 cm (LC9-LC10) prevalece el kerógeno tipo II.

Pocas rocas madres contienen un sólo tipo de kerógeno, al ser predominantes los tipos de kerógeno mixtos, en ocasiones, difíciles de interpretar en los diagramas de Van Krevelen (Dembicki, 2009). A menudo

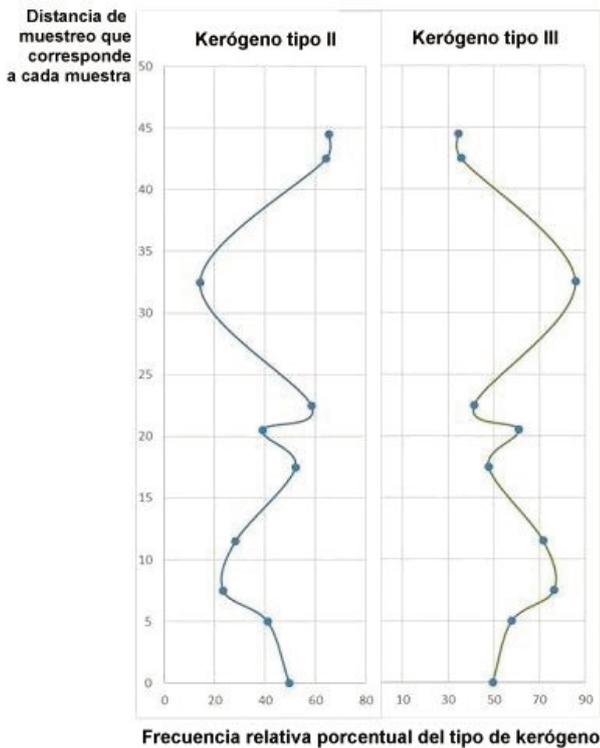


Figura 6. Frecuencia relativa porcentual de tipo de kerógeno.

se encuentran combinaciones de dos o más tipos de kerógenos, como sucede en los sedimentos estudiados en el presente trabajo.

Hasta hace poco tiempo, el kerógeno descrito en esta formación era solo atribuido al tipo III debido a dos causas fundamentales: resultados de análisis de Rock Eval y fuente de aportes de tipo continental, no teniendo en cuenta los constituyentes ricos en hidrogeno (40 % lípidos) de polen, esporas y cutículas (Rocha Mello, 1996).

Estudios de Rock Eval realizados a muestras en Formación San Cayetano

Estudios de Rock Eval realizados con anterioridad en la misma área donde se ubica el afloramiento de estudio, en Cinco Pesos (Delgado-López, 2019) en una sección estratigráfica también perteneciente a la Formación San Cayetano, permitieron determinar el tipo de kerógeno a partir del Índice de Hidrógeno y la Temperatura Máxima de Pirólisis, obtenidos (**Tabla 5, Fi-**

gura. 7). Como se aprecia en el gráfico, el kerógeno determinado es de tipo III solamente, el kerógeno tipo II no se muestra, resultado no coincidente con lo determinado en el presente trabajo.

Identificación	TOC [%]	S1 [mg HC/g roca]	S2 [mg HC/g roca]	HI	Tmax [°C]
n 80	1.41	0.02	0.04	85	432
n 81	1.49	0.03	0.05	68	434
n 82	1.32	0.05	0.04	85	430
n 83	1.4	0.08	0.08	99	429
n 84	1.09	0.03	0.03	60	429
n 85	2.05	0.04	0.08	113	431
n 86	1.51	0.04	0.1	106	432
n 87	1.08	0.05	0.02	61	427
n 88	1.04	0.07	0.03	115	429
n 89	1.82	0.03	0.03	170	430

Tabla 5. Resultados por Rock Eval a muestras en localidad Cinco Pesos, Formación San Cayetano (Delgado-López, 2019).

Al ser estas muestras inmaduras, único sitio encontrado en esta unidad donde la materia orgánica tiene esta condición, se pudo realizar su caracterización cinética.

La caracterización cinética (bulk kinetic) de la muestra procedente de la localidad Cinco Pesos, muestra una distribución de energías de activación unimodal, muy angosta con tendencia hacia valores altos (**Figura 8**), lo cual es indicativo de una homogeneidad en el tipo de enlaces presentes en la materia orgánica (en este caso material orgánico lipídico) y/o alto contenido de azufre (2.4%), que acelera el proceso de craqueo termal.

El valor promedio de energía de activación para esta muestra es 52 kcal/mol y el factor de frecuencia es 5, 43x10¹³ s⁻¹, al indicar la posibilidad de generación de hidrocarburos líquidos (Delgado-López, 2019), al coincidir con el tipo de kerógeno (tipo II), que generan estos hidrocarburos, en lo determinado por palinología en el presente estudio.

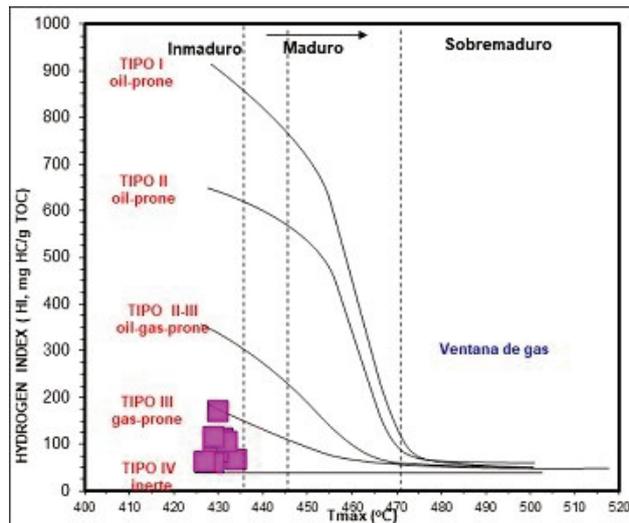


Figura 7. Tipo de kerógeno a partir de IH y Tmax medido por Rock Eval en localidad de Cinco pesos. Fm San Cayetano. (Delgado-López, 2019).

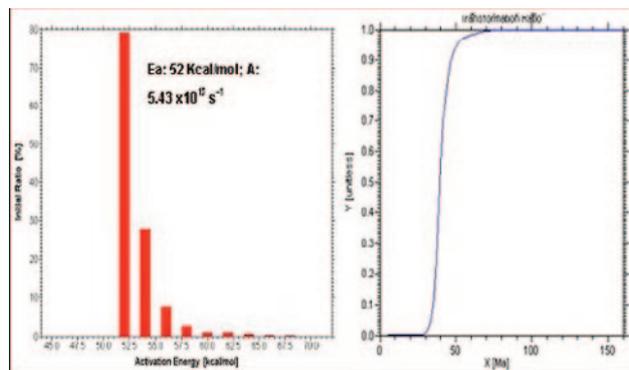


Figura 8. Datos cinéticos de la muestra CCPE-053, localidad Cinco Pesos, Formación San Cayetano. Distribución de energías de activación (Kcal/mol), factor de frecuencia (-1s) y evolución de la tasa de transformación (%) con el tiempo (Ma), asumiendo una tasa de calentamiento constante de 3°C/Ma, para la muestra de roca de la localidad Cinco Pesos (TOC: 2,82%; 2,4% S; S1: 0,33 mgHC/g roca; S2: 2,45 mgHC/g roca; S3 0,11 mgCO2/g roca; Tmax: 425°C) (Delgado-López, 2019).

Debido a la mezcla de tipos de kerógeno y los efectos de la matriz mineral de la roca madre, el análisis Rock Eval es por sí sólo inadecuado para determinar el o los tipos de kerógeno presentes y por lo

tanto, el tipo de hidrocarburo que podría generar la roca madre (Dembicki, 2009). También hay que tener en cuenta, que en rocas sobremaduras el IH es menor, debido a la temperatura a que han sido sometidas; esto conduciría a determinaciones erróneas e incompletas sobre el tipo de kerógeno presente, de ahí la importancia de la utilización de palinomorfos para este tipo de análisis.

Determinación de macerales

Una vez determinado el tipo de kerógeno, se conocerán los macerales presentes, por asociación, sin tener que recurrir a la petrografía orgánica.

Los tres grupos de macerales importantes son: vitrinita, exinita e inertinita. La vitrinita es el dominante en muchos kerógenos y es el componente principal del carbón mineral. Este se deriva casi de forma completa de tejidos leñosos de las plantas terrestres superiores, en lo fundamental ligninas, por lo que es difícil de romper y aparecerán en casi todos los ambientes deposicionales (marinos o no marinos) y es por lo general el tipo más abundante, de partículas estructuradas.

Los macerales de exinita son derivados en su mayoría de algas, esporas, polen y cutículas de hojas cerosas. No es común que existan altos porcentajes de exinita, pero si está presente, esto implica ambiente marino somero o lacustrino.

Los macerales de inertinita provienen de varias fuentes que han sido oxidados de forma intensa, antes de ser depositados y reciclados. La inertinita es un componente que suele ser de menor proporción en el kerógeno (Rocha Mello, 1996).

Algunos componentes del kerógeno son amorfos, los cuales han sido rotos de forma mecánica y/o química alterados por bacterias y hongos, al enmascarar y al destruir su estructura original. Esos componentes no son verdaderos macerales, aunque el término «amorfinita» se ha aplicado a ellos (Pérez-López *et al.*, 2020).

Los macerales presentes en las muestras estudiadas en el presente trabajo (**Tabla 6**) son exinita, vitrinita y kerógeno amorfo.

Tipo de kerógeno	Maceral
I	Alginita
II	Kerógeno amorfo Exinita
III	Vitrinita
IV	Inertinita

Tabla 6. Tipos de kerógenos y macerales (Pérez-López *et al.*, 2020)

Las partículas amorfas con probabilidad representan el material fuente de hidrocarburos más atractivo en el kerógeno, debido a que a temperaturas de modo significativo más bajas que los macerales asociados, se generan hidrocarburos. Además, un volumen de material amorfo producirá una cantidad mucho mayor de hidrocarburos, ya que su volumen ha sido reducido y su densidad incrementada en comparación con los tipos estructurados. El material amorfo tiene una mayor representación de partículas derivadas de exinita, debido a que este grupo está compuesto de partículas blandas con menos moléculas complejas, que son más fáciles de romper que los tejidos leñosos más resistentes del grupo de la vitrinita (Pérez-López *et al.*, 2020).

Madurez del kerógeno

El estudio palinológico, adicionalmente, permite ofrecer criterios de madurez a partir del color del polen y las esporas, utilizándose como un paleotermómetro, ya que cuando éstas han sido calentadas naturalmente, su color cambia progresivamente.

Los palinomorfos inmaduros desde el punto de vista térmico, son amarillos, pero adoptan el color anaranjado o amarillo parduzco durante la etapa de diagénesis. Con el incremento del calor, su color se vuelve marrón durante la etapa de catagénesis y luego, negro durante la etapa de metagénesis (McCarthy *et al.*, 2011).

En el presente caso de estudio, el índice de coloración de esporas para las muestras, con excepción de LC7, LC9 y LC10, es marrón/negro (**Tabla 7**). Esta coloración se relaciona con una temperatura máxima

mayor de 525 °C y valores de Reflectancia de la Vitrinita (Ro) mayores de 2, los cuales indican rocas sobremaduras.

Índice de color de esporas (ICE)	Reflectancia de la Vitrinita (Ro) [%]	Temperatura máxima (Tmax) [°C]	Nivel de madurez
Amarillo	0.2-0.5		
Anaranjado parduzco	0.5-0.6	< 435	Inmaduro
Marrón rojizo	0.6-0.65	435-445	Maduro Temprano
Marrón rojizo medio	0.65-0.9	445 – 450	Maduro Pico
Marrón oscuro	0.9-1.35	450 – 470	Maduro Tardío
	1.35-2	470-525	Sobremaduro
Marrón negro	2-3	>525	Sobremaduro

Tabla 7. Escala de color de los palinomorfos. Nivel de madurez (modificado de Rull, 1999).

En el caso de LC7, LC9 y LC10 el índice de coloración de esporas es marrón oscuro. Se relaciona con una temperatura máxima entre 450 °C y 525 °C y Ro de 0.9 a 2, lo que indica un nivel de madurez de tardío a sobremaduro; al señalar que estas rocas generaron petróleo y gas al tener en cuenta el tipo de kerógeno que contienen (**Figura 8**).

La utilización de palinomorfos ha permitido, con mayor precisión, conocer tipo y madurez del kerógeno en sedimentos de la Formación San Cayetano. El empleo de otros métodos más comúnmente utilizados para estos fines, no exhiben o enmascaran, por las mediciones que realizan, los resultados, pudiendo conllevar a interpretaciones y/o conclusiones incompletas, como hasta el momento, para estos sedimentos. La determinación de macerales, aun cuando se realizó por asociación con el kerógeno determinado y no se realizó estudio de prevalencia, permitió conocer las potencialidades de estos sedimentos para generar hidrocarburos. La integración de estos estudios ha permitido actualizar el potencial generador de estas rocas, de edad Jurásico Temprano-Medio, que constituyen la posible roca madre de sistemas petroleros identificados en la Zona Económica Exclusiva de Cuba en el Golfo de México.

CONCLUSIONES

A partir de la investigación palinológica realizada a las muestras tomadas en el afloramiento Loma Caraza, perteneciente a la Formación San Cayetano, se determinó que existe una mezcla de kerógenos de tipo II y III, cuya prevalencia varía en el intervalo estudiado, a diferencia de lo establecido hasta este momento. Esta información permite considerar a estas secuencias de areniscas arcillosas y argilitas como roca madre, con potencial generador para petróleo y gas.

En la parte inferior del corte se determinó la presencia de kerógeno del tipo I, que no fue tomado en cuenta debido a su escasa representatividad. Sin embargo, en estudios futuros se debe prestar atención a su presencia. El análisis palinológico para la determinación del tipo de kerógeno y su prevalencia, se revela como una herramienta indispensable, que se complementa con los análisis de Rock eval, los cuales no garantizan por sí solos, una correcta determinación de estos. Los macerales presentes en las muestras son Exinita, Vitritina y kerógeno amorfo, al ser estas últimas el material fuente de hidrocarburos más atractivo en el kerógeno. El Índice de Coloración de Esporas permitió precisar la presencia de rocas con materia orgánica sobremadura y de rocas con un nivel de madurez tardío lo que indica que pudieron generar o generaron petróleo y gas, basado en el tipo de kerógeno que contienen.

Los resultados obtenidos avalan el uso de palinomorfos para establecer criterios sobre la calidad comercial de los hidrocarburos generados y el potencial exploratorio de un área en particular, a partir de la determinación de tipo de kerógeno y madurez termal.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Armstrong, H., Brasier., M., 2005, *Microfossils*: Blackwell Publishing, second edition, 296 pp.

Delgado-López, O., 2019, Results of the Petroleum System method in Cuba. In: Pardo, M., Rodríguez, O. Non-seismic and non-conventional exploration methods for oil and gas in

Cuba. Springer, 2019. 1 -42.

Dembicki, H., 2009, Three common source Rock Evaluation errors made by geologist during prospect or play appraisals: AAPG Bulletin, 93(3): 341–356.

Flores-Nieves, A., 2011, Estudio palinológico de la Formación San Cayetano y su vinculación con la exploración de hidrocarburos: Pinar del Río, Cuba, Universidad Hermanos Saiz Montes de Oca Tesis presentada en opción al título Académico de Master, 85 pp.

Flores-Nieves, A., 2018, Estudio palinológico de la Formación San Cayetano y su vinculación con la exploración de hidrocarburos: Anuario de la Sociedad Cubana de Geología, 3, 89-99.

Magnier, C., Moretti, I., López J. O., Gaumet, F., López, J.G., Letouzey, J., 2004, Geoquímica caracterización de source rocks, crude oils and gases of northwest Cuba: Marine and Petroleum Geology, 21, 195-214.

McCarthy, K. Rojas, K., Niemann, M., Palmowski, D., Peters, K., Stankiewicz, A., 2011. La geoquímica básica del petróleo para la evaluación de las rocas generadoras. Oilfield Review, 23(2).

Pérez-López, A., Borrego A. G, Sierra Aragón, M., Martín-Algarra, A., 2020, Petrografía del Carbón. Universidad de Granada. Instituto Nacional del Carbón. CSIC. España. <https://petrografiacarbon.es/macerales/intromacerales/>

Rocha Mello, M., 1996, Geoquímica para bioestratigrafos: Obra Prima Venezolana, 137pp.

Rull, V., 1999, La palinología aplicada a la industria petrolera: PDVSA, Exploración y producción, Nota técnica.

Tissot, P. B., Welte, D., 1984, Petroleum Formation and Occurrence: Springer Verlag Berlin Heidelberg New York. Segunda edición revisada y alargada, 699 pp.