

**CARACTERIZACIÓN DE FACIES ORGÁNICAS DE LA FORMACIÓN
CANSONA, CUENCA SINÚ-SAN JACINTO A PARTIR DE MUESTRAS DE
AFLORAMIENTO**

JAEL YANINE PACHECO MENDOZA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE GEOLOGÍA
BUCARAMANGA**

2011

**CARACTERIZACIÓN DE FACIES ORGÁNICAS DE LA FORMACIÓN
CANSONA, CUENCA SINÚ-SAN JACINTO A PARTIR DE MUESTRAS DE
AFLORAMIENTO**

JAEL YANINE PACHECO MENDOZA

Trabajo de investigación para optar al título de
Geóloga

DIRECTOR: NELSON SÁNCHEZ RUEDA

Geólogo ECOPETROL-ICP

CODIRECTOR: LEONARDO IVAN MOGOLLÓN GALVIS

Biólogo MSc. ECOPETROL-ICP

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE GEOLOGÍA
BUCARAMANGA**

2011

DEDICATORIA

*A mí mamá,
mi hermanita
y mi papí*

AGRADECIMIENTOS

Haber alcanzado este logro se lo debo en primer lugar a Dios, que siempre ha iluminado mi camino, a mi mami, quien me ha llevado y apoyado en todos y cada uno de los pasos que he dado durante toda mi vida, a mi abuelita Carmen que ha sido un gran apoyo y con sus sabias palabras siempre ha sabido confortarme, a mi hermanita Kari que aunque peleamos mucho siempre está ahí para brindarme un abrazo y a mi papá que aunque no esté hoy conmigo, gracias a él es que ahora me convierto en geóloga.

Agradezco enormemente a Nelson Sánchez por haberme dado la oportunidad de trabajar con él y aprender tantas cosas para mi vida profesional; también a Leonardo Mogollón, a Vladimir Blanco, a Tatiana Juliao, a Diego García; a los integrantes del laboratorio de Geoquímica del ICP; al grupo de Petrografía Orgánica del ICP, Diego, Ángelo y Carlos; a la profesora Astrid Blandón Montes y a Oscar Jaramillo; y a las instrucciones y a los sabios consejos del profe Jorge Luis Rubiano.

A mis amigos de la universidad, a Claudia y a Riki, con quien he compartido muy buenos momentos y han sido muy buenos amigos; a Clarita por haberme soportado tantas veces con los viáticos, las vueltas, los papeles, en fin; a Paola por ser tan buena amiga, a Heber, a Dieguito muy buenos compañeros; a Adri y Pao D, excelentes amigas y compañeras; a Paola F, Ximena, a Karoll, a Anderson y Carlos. A mis amigos del colegio, a Leslie, Yuly, Lore, Nina, Betty, Jessica, Jefuda y La Mona; a Horacio, Migue, Rafa, Santy.

A la Universidad Industrial de Santander, al Grupo de Investigación en Estratigrafía y al Instituto Colombiano del Petróleo (ICP).

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	17
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	25
2. OBJETIVOS.....	26
2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS	26
3. METODOLOGIA	27
4. MARCO CONCEPTUAL	28
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	46
5.1 DISCUSIÓN ACERCA DE LA ESTRATIGRAFÍA DE LA ZONA	46
5.2 EVALUACION DEL POTENCIAL DE GENERACION DE LA FORMACION CANSONA.....	49
5.2.1 CANTIDAD, CALIDAD Y MADUREZ DE LA MATERIA ORGÁNICA.	49
5.2.1.1 Cerro Cansona	49
5.2.1.2 Arroyo Peñitas.	50
5.2.1.3 Arroyo Columbita.....	55
5.2.1.4 Cantera San Carlos.....	58
5.2.1.5 Cantera El Clan.	60
5.2.1.6 Cantera El Purgatorio.....	61
5.3 ORGANOFACIES	65
5.3.1 Facies AB	65
5.3.2 Facies B	66
5.3.3 Facies BC	67
5.3.4 Facies C	70
5.3.5 Facies CD	71
5.4 QUIMIOESTRATIGRAFÍA.....	75
5.4.1 Sección Arroyo Peñitas.....	76
5.4.1.1 Azufre total y orgánico	78

5.4.1.1 Quimiofacies 1.	79
5.4.1.2 Quimiofacies 2.	80
5.4.1.3 Quimiofacies 3.	80
5.4.1.4 Quimiofacies 5.	81
5.4.2 Sección Cantera San Carlos.	84
5.4.2.1 Azufre total y orgánico.	84
5.4.2.2 Quimiofacies 1.	84
5.4.2.3 Quimiofacies 2.	85
5.4.2.4 Quimiofacies 3.	86
5.4.2.5 Quimiofacies 4.	86
5.4.2.6 Quimiofacies 5.	86
5.4.2.7 Quimiofacies 6.	86
5.5 CORRESPONDENCIA ENTRE ORGANOFACIES Y QUIMIOFACIES	89
5.6 DISTRIBUCIÓN DE LOS AMBIENTES DE DEPOSITACIÓN.....	92
CONCLUSIONES	94
RECOMENDACIONES.....	96
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de Colombia con las diferentes provincias y sus respectivos límites tectónicos (Cediel et al, 2003).....	18
Figura 2. Sección geológica de la costa Caribe colombiana, escala 1:500.000. Ingeominas.	18
Figura 3. Mapa de localización de las 6 secciones levantadas en Campo durante la campaña de muestreo y levantamiento estratigráfico. La región sombreada representa el área de la Cuenca Sinú-San Jacinto.....	19
Figura 4. Columna estratigráfica generalizada de las Cuencas Sinú y San Jacinto (ANH, 2007).....	21
Figura 5. Diagrama de flujo seguido para llevar a cabo el presente proyecto de grado.....	27
Figura 6. Diagrama de Van Krevelen para estimar el tipo de kerógeno en las rocas (Tomado de ANH et al, 2009).	31
Figura 7. A) Fotomicroscopio Zeiss PM III. B) Fotomicroscopio v. LOMO Biolam. Tomado de Mastalerz (2009).....	34
Figura 8. Diagrama ternario del kerógeno MOA-Fitoclastos-Palinomorfos de Tyson (1993) basados en la frecuencia numérica relativa. Tomado de Tyson (1995).	37
Figura 9. Diagramas Carbono-Azufre que muestra los campos para azufre singenético formado por reducción bacteriana de sulfatos y reacción de sulfuro con Hierro reactivo. La línea discontinua es la relación 1:1. (Leventhal, 1995).	43
Figura 10. Diagrama esquemático de un espectrómetro de masas inductivamente acoplado (Kellner et al, 2004).	45
Figura 11. Correlación litoestratigráfica entre las distintas secciones levantadas en campo elaborada para este trabajo. Las columnas estratigráficas fueron modificadas con base en la descripción litológica que fue hecha durante la fase de muestreo.....	48
Figura 12. Mapa de distribución promedio del Carbono Orgánico de la Formación [%wt] Cansona en las seis secciones analizadas.	51
Figura 13. Evaluación del potencial de la Formación Cansona con base en la relación %COT vs S2. Las etiquetas en algunas muestras representan el Tmax..	52

Figura 14. Diagrama tipo Van Krevelen para todas las muestras de la sección Cansona en las diferentes secciones levantadas en campo. Las leyendas en algunas muestras reflejan el Tmax.	53
Figura 15. Diagrama de Índice de Hidrógeno vs S2.....	54
Figura 16. Diagrama ternario AFP para las muestras de las secciones Arroyo Peñitas, Arroyo Columbita, Canteras San Carlos, El Clan y El Purgatorio 1 y 2. Ver las características de cada sector en la tabla 6.	57
Figura 17. Mapa de distribución de los promedios de Índice de Hidrógeno [mgHC/gTOC] por sección de la Formación Cansona.	63
Figura 18. Facies orgánicas de la Formación Cansona en la sección Arroyo Columbita. En la columna de %COT 0,5% representa el corte para realizar pirolisis; en la columna de Tmax, la línea azul marca 435°C, mostrando cuales muestras se encuentran maduras y cuáles no.....	67
Figura 19. Facies orgánicas de la Formación Cansona en la sección Cantera San Carlos. En la columna de %COT 0,5% representa el corte para realizar pirolisis; en la columna de Tmax, la línea azul marca 435°C, mostrando cuales muestras se encuentran maduras y cuáles no.	69
Figura 20. Facies orgánicas de la Formación Cansona en la sección Cantera El Purgatorio. En la columna de %COT 0,5% representa el corte para realizar pirolisis; en la columna de Tmax, la línea azul marca 435°C, mostrando cuales muestras se encuentran maduras y cuáles no.....	70
Figura 21. Facies orgánicas de la Formación Cansona en la sección Arroyo Peñitas. En la columna de %COT 0,5% representa el corte para realizar pirolisis; en la columna de Tmax, la línea azul marca 435°C, mostrando cuales muestras se encuentran maduras y cuáles no.	72
Figura 22. Facies orgánicas de la Formación Cansona en la sección Cantera El Clan. En la columna de %COT 0,5% representa el corte para realizar pirolisis; en la columna de Tmax, la línea azul marca 435°C, mostrando cuales muestras se encuentran maduras y cuáles no.	73
Figura 23. Correlación de facies orgánicas de la Formación Cansona.	74
Figura 24. Relación Vanadio-Níquel para las muestras de la sección Arroyo Peñitas. La etiqueta representa el espesor al cual fue tomada la muestra.....	78
Figura 25. Diagrama S/C para la sección Arroyo Peñitas, para evaluar las condiciones redox durante la depositación. El azufre calculado aquí es en roca total.	79

Figura 26. Cluster modo Q de la sección Arroyo Peñitas.....	82
Figura 27. Quimiofacies delimitadas a partir de los elementos traza, %COT, S, Si, Al y Mn de la Formación Cansona en la sección Arroyo Peñitas.....	83
Figura 28. Diagrama S/C para la sección Cantera San Carlos, para evaluar las condiciones redox durante la depositación. El azufre calculado aquí es en roca total.	84
Figura 29. Quimiofacies de la Formación Cansona en la sección Cantera San Carlos, acompañado por los perfiles de los elementos trazas.	87
Figura 30. Quimiofacies de la Formación Cansona en la sección Cantera San Carlos, acompañado por los perfiles de los elementos mayores.	88
Figura 31. Comparación entre las facies orgánicas y las quimiofacies de la Formación Cansona en las secciones Arroyo Peñitas y Cantera San Carlos.....	91
Figura 32. Mapa de ambientes de depositación de la Formación Cansona.....	93

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Estimación del potencial petrolífero de una roca con base en el contenido de carbono orgánico y los parámetros S1 y S2 obtenidos a partir de Pirolisis Rock-Eval (Peters y Cassa, 1994).	30
Tabla 2. Parámetros Geoquímicos obtenidos a partir de pirolisis rock-eval que describen el tipo de kerógeno (<i>Calidad</i>) y el tipo de producto expulsado (Peters y Cassa, 1994).....	31
Tabla 3. Etapas de madurez termal de acuerdo a algunos parámetros geoquímicos (Peters y Cassa, 1994).....	33
Tabla 4. Subdivisiones del grupo maceral vitrinita (tomado de ICCP, 1998).....	33
Tabla 5. Clasificación de la materia orgánica dispersa (Modificado de Ercegovac y Kostic, 2006).....	36
Tabla 6. Características claves para palinofacies marinas distinguidas en los diagramas ternarios AFP en la figura (de Tyson, 1993, after Tyson 1989, p. 163) en Tyson (1995).....	38
Tabla 7. Resumen de las características de las facies orgánicas (after Jones, 1984; 1987; Jones y Demaison, 1982).	40
Tabla 8. Relación entre algunos parámetros seleccionados de palinofacies y facies orgánicas de acuerdo con Jones (1987) en facies idealizadas marinas siliciclásticas (solo tendencias relativas generalizadas).....	41
Tabla 9. Parámetros para la evaluación de la madurez termal en las rocas de la Formación Cansona en la sección Arroyo Peñitas.	56
Tabla 10. Madurez termal en las rocas de la Formación Cansona en la sección Arroyo Columbita.	58
Tabla 11. Parámetros para la evaluación de la madurez termal en las rocas de la Formación Cansona en la sección Cantera San Carlos.	60
Tabla 12. Parámetros para la evaluación de la madurez termal en las rocas de la Formación Cansona en la sección Cantera El Clan.....	61
Tabla 13. Parámetros para la evaluación de la madurez termal en las rocas de la Formación Cansona en la sección Cantera El Purgatorio.	63
Tabla 14. Tabla de las concentraciones promedio de los elementos Mn y Fe y la relación Mn/Fe. Tomado de Li (2000) en Mackenzie (2005).....	77

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. MARCO GEOLOGICO REGIONAL	100
ANEXO B. GEOLOGIA DEL PETROLEO	106
ANEXO C. ANTECEDENTES	108
ANEXO D. LEVANTAMIENTO ESTRATIGRÁFICO DE SEIS SECCIONES ESTRATIGRÁFICAS	123
ANEXO E. ANALISIS VISUAL DEL KEROGENO	128
ANEXO F. HISTOGRAMAS DE REFLECTANCIA DE VITRINITAS PARA TODAS LAS SECCIONES	133
ANEXO G. ESCALA DE INDICE DE COLORACION DE ESPORAS VS. REFLECTANCIA DE VITRINITA.	137

RESUMEN

TITULO: CARACTERIZACIÓN DE FACIES ORGÁNICAS DE LA FORMACIÓN CANSONA, CUENCA SINÚ-SAN JACINTO A PARTIR DE MUESTRAS DE AFLORAMIENTO*

AUTOR: JAEL YANINE PACHECO MENDOZA**

PALABRAS CLAVE: Formación Cansona, organofacies, quimiofacies, kerógeno, plataforma, afloramiento

CONTENIDO:

La Cuenca Sinú-San Jacinto se ubica en el Nororiente colombiano sobre su margen Caribe, en esta Cuenca han sido encontrados abundantes evidencias de hidrocarburos, cuyo origen ha sido atribuido la Formación Cansona (Campaniano-Maastrichtiano). El potencial de la Formación Cansona ha sido estimado en varias oportunidades por diversos autores por medio de geoquímica orgánica, sin embargo, sus facies orgánicas no han sido identificadas, y por lo tanto los intervalos con mejor potencial de generación. Para definir las organofacies fue llevado a cabo un levantamiento de diez secciones estratigráficas en cinco localidades por profesionales contratistas de Ecopetrol, a partir del cual fueron recolectadas 476 muestras; estas muestras fueron evaluadas con geoquímica orgánica y análisis microscópico. Adicionalmente, con el fin de complementar los resultados de las organofacies fueron realizados análisis elementales en las secciones Arroyo Peñitas y Cantera San Carlos con el fin de delimitar quimiofacies y evaluar correspondencias o diferencias entre ambas.

Fueron identificadas en la Formación Cansona cinco facies orgánicas según el modelo de Jones (1987), tales son las AB, B, BC, C y CD, las cuales representan de izquierda a derecha, condiciones subóxicas-anóxicas a condiciones altamente óxicas, representando una variación paleoambiental, desde un ambiente marino de plataforma distal, representado por la organofacies AB, hasta un ambiente marino costero, con alto nivel de oxígeno y suministro de material terrígeno, posiblemente deltaico, representado por la facies CD. La facies BC, encontrada en las canteras San Carlos y Purgatorio, es la que representa el mejor potencial de generación, contando con kerógeno tipo II y II/III con potencial para generar mezcla de aceite y gas. El empleo de las quimiofacies permitió identificar el paleoambiente de depositación de la sección San Carlos, donde mostró un cambio de un ambiente marino de plataforma externa (0 a 22,5m) a uno de plataforma interna a partir de 22,5 metros.

*Proyecto de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Geología. Director: Nelson Sánchez Rueda
Geólogo Codirector: Leonardo Ivan Mogollón Galvis Biólogo MSc.

ABSTRACT

TITLE: CARACTERIZACIÓN DE FACIES ORGÁNICAS DE LA FORMACIÓN CANSONA, CUENCA SINÚ-SAN JACINTO A PARTIR DE MUESTRAS DE AFLORAMIENTO

AUTHOR: Jael Yanine Pacheco Mendoza

KEY WORDS: Cansona Formation, organic facies, chemofacies, kerogen,

CONTENT:

The Sinú-san Jacinto basin is located in the Northwestern part of Colombia on the Caribbean margin. Many oil and gas seeps have been found in this basin and have been attributed to the Cansona Formation (Campanian to Maastrichtian) as its source rock. The source rock potential of the Cansona Formation has been assessed several times by many researchers using organic geochemistry, however, its organic facies have not been identified, neither the intervals with the best source rock potential. In order to identify its organic facies, eleven stratigraphic sections were studied and 476 samples collected; the samples were investigated with organic geochemistry and microscopic analysis. Additionally, in order to improve the organic facies yield, an elemental analysis was performed in Peñitas Creek and San Carlos Quarry sections to define and evaluate similarities and differences.

Five organic facies were identified for the Cansona Formation according to the model of Jones (1987), those are AB, B, BC, C and CD, which describes a variation from suboxic-anoxic to very oxic conditions, showing a palaeoenvironmental variation, from a distal shelf marine environment, represented by organic facies AB to a shoreline environment where oxygen and terrigenous material supply is high, which is represented by organic facies CD. The organic facies BC, found in San Carlos and Purgatorio Quarry, is the one which represents the best source rock potential; it has type II and II/III kerogen, for oil and gas mixture. Usage of chemofacies helped to identify the sedimentary environment in San Carlos section, which showed a shift in 22,5 meters of thickness from external marine shelf to inner shelf environment.

*Degree Project, Research Modality.

** Faculty of Physicochemical Engineering, Geology School. Director: Nelson Sánchez Rueda
Geólogo Codirector: Leonardo Ivan Mogollón Galvis Biólogo MSc.

INTRODUCCIÓN

La región del norte de Suramérica es altamente compleja debido a los eventos deformativos ocurridos desde el Paleozoico hasta el Mioceno. El norte de Colombia se encuentra ocupado por un complejo acrecionario muy amplio que se extiende a lo largo del mar Caribe. Tal prisma, denominado como la Cuenca Sinú-San Jacinto, es asociado con la subducción de la placa Caribe por debajo de la suramericana y su estratigrafía es controlada por dicho proceso (Haffer, 1963; Duque-Caro, 1980; Chevron, 1986; Bowland, 1993; ESRI-ILEX, 1995; Laverde, 2000; Caro and Spratt, 2003 en Sánchez y Permanyer, 2006). El cinturón de San Jacinto está conformado por una serie de pliegues con dirección noroeste, así como fallas inversas y normales. Sus límites tectónicos son: al norte la falla de Oca; al este la falla de Romeral; al Oeste el lineamiento del Sinú; y al Suroeste, terminación de la Cordillera Occidental (figuras 1 y 2) (Caro, 2003). Es en el cinturón de San Jacinto donde se encuentra la zona de estudio (figura 3).

La Cuenca Sinú-San Jacinto se encuentra constituida por dos cinturones plegados adyacentes: (1) El cinturón de San Jacinto del Paleógeno con una extensión hacia el Norte y (2) el cinturón del Sinú del Neógeno localizado al margen oeste del cinturón de San Jacinto (figura 2). Cada cinturón tiene sus propias características estratigráficas (Duque-Caro, 1980; Ecopetrol-ICP, 2000, 2003).

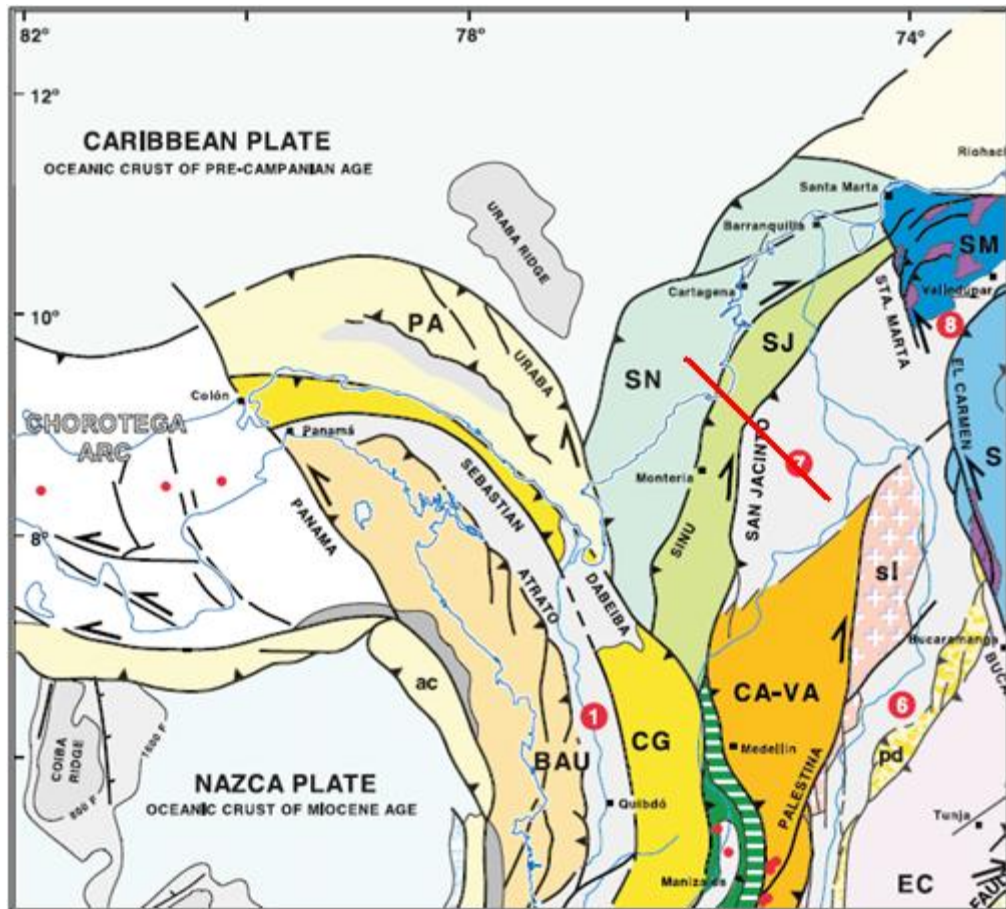


Figura 1. Mapa de Colombia con las diferentes provincias y sus respectivos límites tectónicos (Cediél et al, 2003).

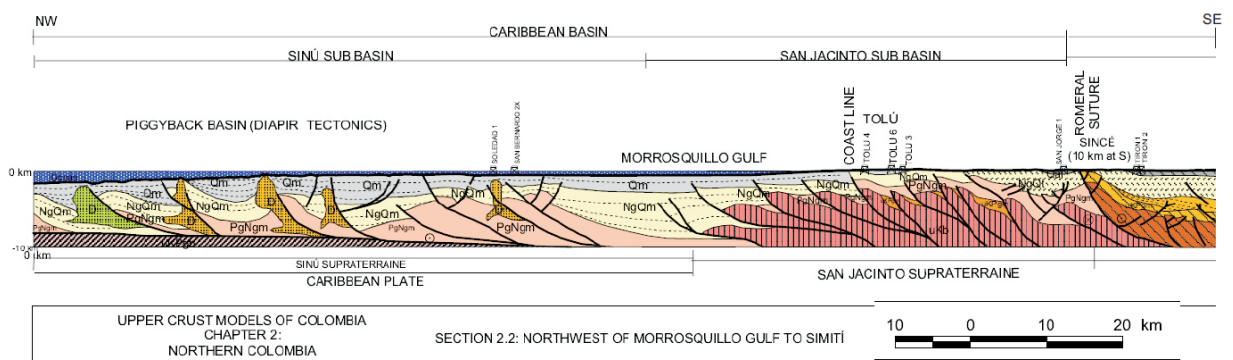


Figura 2. Sección geológica de la costa Caribe colombiana, escala 1:500.000. Ingeominas.



Figura 3. Mapa de localización de las 6 secciones levantadas en Campo durante la campaña de muestreo y levantamiento estratigráfico. La región sombreada representa el área de la Cuenca Sinú-San Jacinto.

En el cinturón plegado de Sinú-San Jacinto afloran rocas de edad Cretácico hasta Cuaternario, la sedimentación de tales rocas estuvo controlada por la tectónica reinante durante este periodo, por lo tanto, la estratigrafía del cinturón del Sinú difiere del cinturón de San Jacinto. La unidad sedimentaria más antigua del cinturón de San Jacinto corresponde a la Formación Cansona, la cual suprayace discordantemente el basamento cristalino (figura 4) de las *Peridotitas de Planeta Rica* (Guzmán et al, 2004). Esta última es definida por Dueñas y Duque-Caro (1981) como un cuerpo peridotítico compuesto por harzburgitas y en menor proporción dunitas, asociado localmente con serpentinitas y gabros. En su mayor

parte, se reporta que las rocas se encuentran muy meteorizadas, encontrándose roca saprolítica de color verde oscuro y manchas amarillentas con concentraciones locales de ferro-níquel. “La edad absoluta de esta unidad no ha sido definida debido a la carencia de dataciones radiométricas, pero se estima que es anterior al Santoniano, ya que estas peridotitas infrayacen a la Formación Cansona de edad Cenomaniano-Maastrichtiano” (Guzmán et al, 2004).

La Formación Cansona (*K2c*), de acuerdo con la actual definición de INGEOMINAS, consiste de chert estratificado de color gris oscuro, pardo y rojizo en capas delgadas, tal chert se encuentra interestratificado con limolitas silíceas con restos fosfatizados de vértebras y escamas de peces y microfósiles, también lilitas, conglomerados y arenitas de grano fino y cuenta con un espesor promedio de 100 m (Guzmán et al, 2004) (Ver Anexo B para más información).

En la Cuenca Sinú-San Jacinto, unidades desde el Cretácico hasta el Mioceno, han sido catalogadas como posibles generadoras de hidrocarburos, tales son los shale de la Formación Ciénaga de Oro de edad Oligoceno, Porquero, de edad Mioceno y la Formación Cansona, de edad Cretácico. “La roca generadora más prospera en la Cuenca Sinú-San Jacinto es la Formación Cansona de edad Campaniano, la cual se encuentra exclusivamente en el prisma acrecionario del Cinturón de San Jacinto. El miembro shale de Finca Vieja, parte de esta unidad reporta un %COT entre 2,0 y 11,3% y valores altísimos de pirolisis (2,9 a 78mg/g). El kerógeno es tipo I y II” (ESRI-ILEX, 1995).

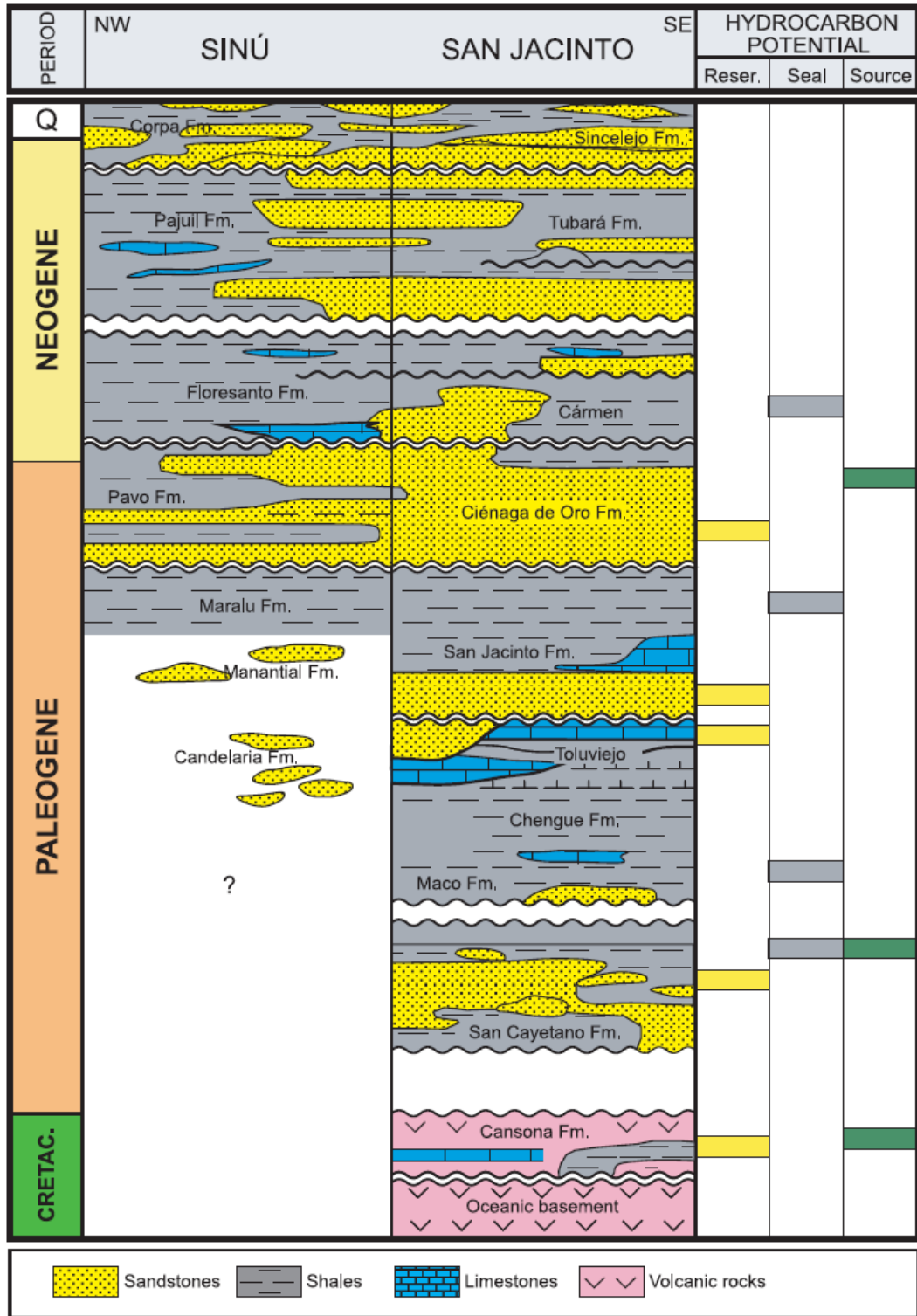


Figura 4. Columna estratigráfica generalizada de las Cuencas Sinú y San Jacinto (ANH, 2007).

Desde 1983 se han realizado varias campañas de campo con el fin de evaluar las rocas con potencial de generación en la Cuenca Sinú-San Jacinto (Ver Anexo C para más información). Compañías como Gulf (1983), Chevron (1986), y ESRI-ILEX (1995) entre otros, han evaluado el potencial de generación de varias unidades desde el Cretácico al Mioceno, las dos primeras campañas fueron enfocadas únicamente en la Formación Cansona, mientras que las últimas evaluaron el potencial de unidades tanto del Cretácico como del Paleógeno-Neógeno. En estas campañas se concluyó que la Formación Cansona tiene el mejor potencial de generación, presentando %COT de 0,5 y 21,2%wt e IH de 64 hasta 1164 mgHC/gCOT (ESRI-ILEX, 1995), dando como resultado kerógeno tipo I y II. Siendo más prolífica en las secciones Cantera Golf, San Sebastián y Purgatorio (Chevron, 1986; Ecopetrol, 2003).

En cuanto a las posibles rocas almacenadoras de la Cuenca, las rocas depositadas durante el Eoceno-Mioceno, incluyendo depósitos continentales fluvio-deltaicos a marinos y también depósitos de aguas carbonatadas someras (ANH, 2007) son las que tienen las mejores cualidades. Tales unidades son las areniscas basales de la Formación Pajuil/Tubará, las areniscas de las Formaciones Floresanto/Porquero, Ciénaga de Oro/Pavo y a algunas areniscas de la Formación San Cayetano” (Ecopetrol, 2005).

La metodología llevada a cabo para la determinación de las facies orgánicas de la Formación Cansona consistió en la evaluación de tres parámetros, estos son *Cantidad*, *Calidad* y *Madurez*. La *cantidad* de materia orgánica se evalúa para determinar los intervalos de roca cuyo contenido de materia orgánica es más alto, y por lo tanto pueden generar mayor cantidad de hidrocarburos, esta cuantificación es realizada a través de una técnica conocida como Carbono Orgánico Total (COT) o sus siglas en inglés TOC. Esta técnica consiste en determinar el Carbono en forma de CO₂ de una muestra de roca seca, la cual ha sido acidificada previamente. Este parámetro, expresado en porcentaje en peso, describe el Carbono orgánico (incluyendo kerógeno y bitumen) (Peters y Cassa, 1994), y es la

primera estimación del potencial de generación de una roca, de la cual se siguen una serie de técnicas como la Pirolisis Rock-Eval. Esta técnica describe la *calidad* de la materia orgánica; cuantificando los hidrocarburos presentes en la roca (S1), los que puede generar (S2) y el CO₂ (S3), tales parámetros se traducen en Índice de Hidrógeno (IH) e Índice de Oxígeno (IO) y son estos los que definen la calidad de la materia orgánica en términos del tipo de kerógeno presente en las rocas. Adicionalmente, el análisis visual del kerógeno describe el tipo de kerógeno a través del estudio con luz transmitida de láminas palinológicas donde este se encuentra aislado de la materia sedimentaria por medio del ataque ácido (HCl y HF), tal análisis da como resultado el agrupamiento de la materia orgánica en tres grandes grupos, los fitoclastos, la Materia Orgánica Amorfa (MOA) y Palinomorfos (tanto polen y esporas como fitoplancton); estos grupos se considera que representan los tipos de kerógeno, por lo tanto son una medida de la calidad de la materia orgánica. La *madurez*, por su parte, es estimada por ayuda también de la pirolisis rock-eval, con el Tmax, así como de la reflectancia de la vitrinita y de la coloración de esporas (Ver Anexo E para más información).

Adicional a la identificación de las organofacies, fueron evaluados ciertos parámetros brindados por la geoquímica inorgánica en dos secciones estratigráficas (Arroyo Peñitas y Cantera San Carlos) con el fin de identificar las quimiofacies características de las secuencias, esto en primer lugar, para evaluar condiciones redox, suministro de materia orgánica y ambiente de depositación; y por otra parte, para establecer relaciones de correspondencia y diferencias entre las quimiofacies y las organofacies, además como complemento en secuencias donde existe carencia de datos de pirolisis. Tales parámetros inorgánicos son las concentraciones de elementos mayores, menores, traza y Azufre en roca total en las secciones estudiadas. La cuantificación de dichos elementos fue llevada a cabo por medio de las técnicas ICP-MS para los elementos menores y traza e ICP-OES para los elementos mayores; mientras que para la determinación del Azufre fue empleado un equipo determinador de carbono de la marca LECO®. Las concentraciones obtenidas de los elementos, mas el COT fueron representadas

mediante agrupaciones cluster, dando como resultado la identificación de una serie de quimiofacies definidas verticalmente a lo largo de las columnas estratigráficas.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la Cuenca Sinú-San Jacinto existe un sistema petrolífero conocido, de acuerdo con la definición de Magoon y Dow (1994), conformado por la Formación Cansona (K2c), de edad Cretácico superior, como roca generadora y areniscas de edad terciario como unidades reservorio¹. Sin embargo, las facies orgánicas de la Formación Cansona no han sido aun identificadas, y por lo tanto, los intervalos que representan la mayor prospectividad en cuanto a generación de hidrocarburos en la Formación Cansona.

Adicionalmente, la mayoría de los datos que se tienen acerca de la madurez termal de dicha unidad han sido obtenidos a partir de pirolisis rock-eval, en algunos casos, cuando el contenido de COT no es suficiente, menor de 1%, el pirograma no se desarrolla completamente, dando lugar a resultados no confiables, por lo tanto, se hace necesario obtener medidas directas de la madurez de la Formación Cansona, lo cual puede ser logrado con medidas de reflectancia de vitrinita. Con base en esta carencia de información sobre la materia orgánica, madurez termal y composición de la Formación Cansona, se plantea la siguiente pregunta: ¿la Formación Cansona cuenta con la suficiente cantidad de materia orgánica para generar hidrocarburos y esta cuenta con la calidad y madurez para ser una roca generadora efectiva de dichos hidrocarburos?

En este trabajo se propone identificar las organofacies por medio del empleo de la geoquímica orgánica, es decir, Carbono orgánico total y los resultados obtenidos a partir de pirolisis rock-eval; las herramientas de la petrografía orgánica; y adicionalmente algunos rasgos inorgánicos como Azufre y elementos mayores, menores y traza con el fin de evaluar correspondencia entre las organofacies y complementar su interpretación paleoambiental.

¹ ANH (2007), Colombian Sedimentary Basins.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Caracterizar y describir a través de las herramientas de la geoquímica orgánica e inorgánica las diferentes facies orgánicas de la Formación Cansona en la Cuenca Sinú-San Jacinto a partir de muestras de afloramiento de 6 secciones estratigráficas.

2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

El cumplimiento del objetivo general del trabajo de grado comprende:

- Determinar por medio de las técnicas petrográficas el tipo de materia orgánica existente en la Formación Cansona y el grado de madurez termal.
- Determinar las facies orgánicas de la Formación Cansona y evaluar sus variaciones laterales y verticales de facies.
- Interpretar el ambiente de depositación de la Formación Cansona a partir de las organofacies identificadas.
- Determinar el potencial de generación de la materia orgánica a partir del análisis visual del kerógeno.
- Identificar las quimiofacies características de la Formación Cansona en dos secciones estratigráficas y evaluar su correspondencia con las organofacies.

3. METODOLOGIA

El procedimiento empleado en el desarrollo de este proyecto de investigación es presentado en el siguiente diagrama de flujo (figura 5).

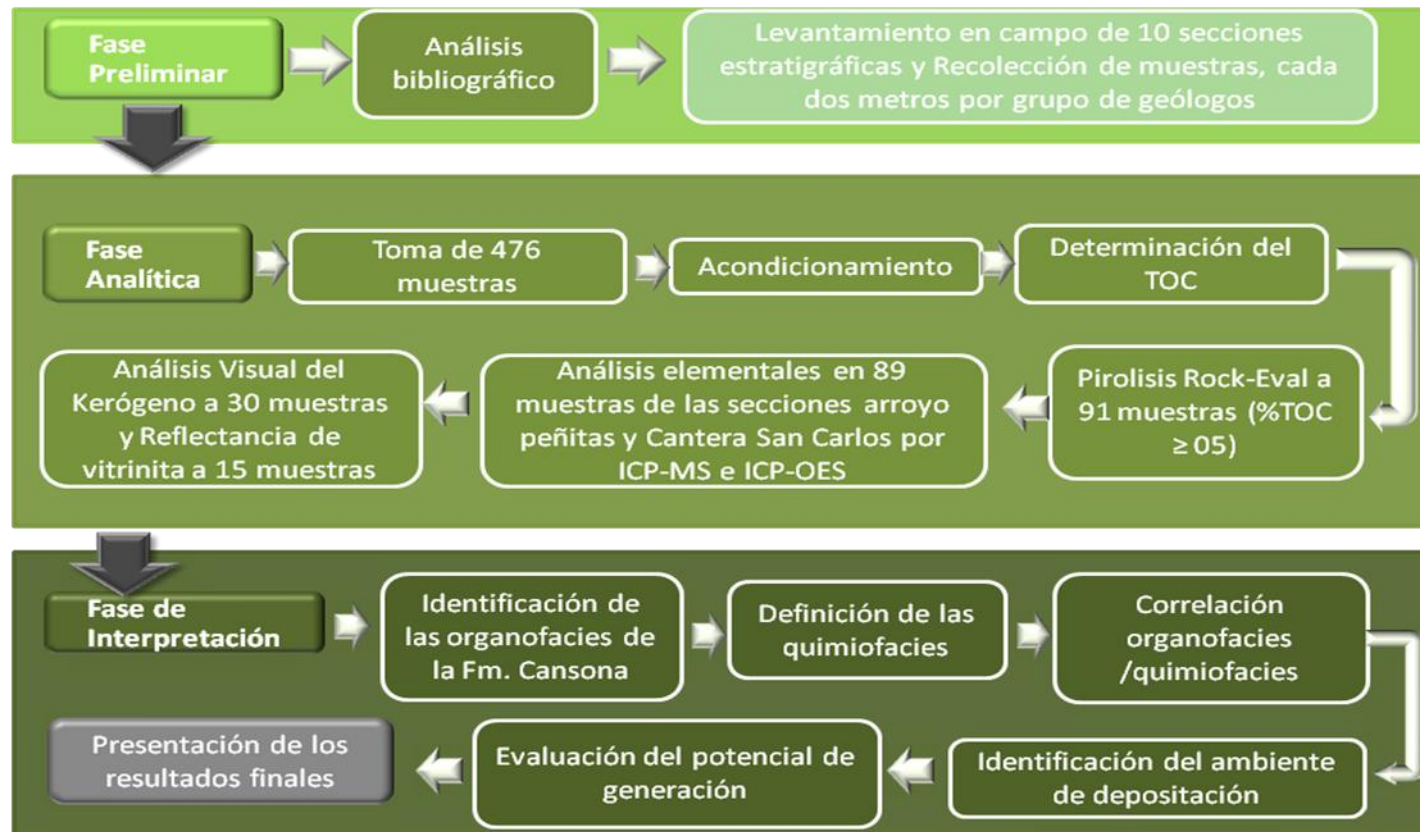


Figura 5. Diagrama de flujo seguido para llevar a cabo el presente proyecto de grado.

4. MARCO CONCEPTUAL

El término facies orgánicas u “organofacies” es definido por Tyson (1995) como “un cuerpo de sedimentos que contienen una asociación distintiva de constituyentes orgánicos, los cuales pueden ser reconocidos por microscopia, o está asociado con la composición característica geoquímicas de un cuerpo de roca”. El término organofacies fue introducido por Rogers (1980) para referirse al contenido orgánico en los sedimentos, fuente de la materia orgánica y el ambiente de depositación. Las facies orgánicas son definidas por las características de la materia orgánica total y son estimadas con ciertas características litoestratigráficas. Ellas son definidas de la misma manera como se definen otras facies (Ercegovac y Kostić, 2006). A través de la identificación de las organofacies en las rocas sedimentarias es posible la determinación de la cantidad y tipo de hidrocarburos que puedan ser generados a partir de una roca; por otra parte, refleja las condiciones durante la sedimentación (por ejemplo, la salinidad, oxigenación, profundidad de la columna de agua, distancia de la zona de aporte fluvial, el estado trófico, entre otras) (Tyson, 1995).

Los parámetros empleados regularmente para evaluar la calidad, cantidad y madurez de la materia orgánica contenida en una roca son obtenidos a partir de algunas técnicas analíticas como son la cuantificación del Carbono Orgánico Total (COT); la determinación de los parámetros de calidad y madurez a través de la técnica Pirolisis Rock-Eval; la determinación del contenido de azufre en roca total y en el kerógeno; y la determinación directa de la calidad del kerógeno y la madurez de la roca, a través del análisis visual del kerógeno (AVK) y la reflectancia de la vitrinita, respectivamente.

Carbono Orgánico Total (%COT). El carbono orgánico total describe la cantidad de carbono orgánico en una muestra de roca e incluye kerógeno y bitumen (Peters y Cassa, 1994). La abundancia de materia orgánica en los sedimentos se expresa generalmente como el porcentaje en peso seco del carbono orgánico (Jarvie, 1991

en Tyson, 1995). El contenido de materia orgánica en los sedimentos puede ser derivado a partir de la ecuación 1 si se conoce el contenido de Carbono del kerógeno total (Littke, 1993, p. 8 en Tyson, 1995).

$$\text{OM wt\%} = \text{COT}^* \frac{100}{\%C \text{ contenido de kerógeno total}} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Esta medida de COT por sí solo no es un indicador del potencial de generación de una roca (Peters y Cassa, 1994), pero es una primera estimación con base en la cual se continúan los análisis posteriores para evaluar el tipo de kerógeno. Existen algunos parámetros de referencia con base en los cuales se cualifica el contenido de materia orgánica en una roca (tabla 1).

Pirolisis Rock-Eval. Esta técnica introducida por Espitalié et al. (1977) es considerada frecuentemente como un medio más efectivo de clasificar el kerógeno que los análisis elementales porque no es necesario la separación previa del kerógeno para realizar el análisis (Tyson, 1995), como si lo es en el método propuesto por el Instituto Francés del Petróleo (IFP), en el cual “los tipos de kerógeno son definidos con base en las relaciones atómicas de hidrogeno y carbono y oxigeno y carbono” (Durand and Monin, 1990 en Tyson, 1995). Lo que hace más confiable la técnica del IFP es el análisis del kerógeno aislado, sin embargo, la aproximación de la pirolisis rock-eval es buena pero se sugieren estudios más detallados debido a que se pueden presentar imprecisiones debido a la matriz de las rocas analizadas.

“Los parámetros más confiables obtenidos a partir de pirolisis son el Índice de Hidrógeno (mg de hidrocarburos liberados durante el rompimiento del kerógeno, dividido en el COT wt% x 100, es decir, mgHC/gCOT; el T_{max} (temperatura de máxima evolución del kerógeno, °C); el valor S1 (mg de hidrocarburos libres presentes en la muestra inicialmente) y el valor S2 (mg de hidrocarburos que evolucionaron por la alteración termal del kerógeno, normalizados al peso de la muestra). El parámetro menos confiable S3 es teóricamente la cantidad de CO_2

(mg) derivado de la alteración termal de *compuestos orgánicos oxigenados*” (Tyson, 1995), esto es debido a que este pico puede ser afectado por la liberación de dióxido de carbono a partir de carbonatos aun presentes en las rocas analizadas (Katz, 1983; Dean et al, 1984; Peters, 1986 en Tyson, 1995).

Potencial petrolífero	Materia orgánica		
	COT (wt%)	Pirolisis Rock-Eval	
		S1 (mgHC/g COT)	S2 (mgHC/g COT)
Pobre	0,0-0,5	0,0-0,5	0,0-2,5
Regular	0,5-1,0	0,5-1,0	2,5-5,0
Bueno	1,0-2,0	1,0-2,0	5,0-10,0
Muy Bueno	2,0-4,0	2,0-4,0	10,0-20,0
Excelente	>4,0	>4,0	>20,0

Tabla 1. Estimación del potencial petrolífero de una roca con base en el contenido de carbono orgánico y los parámetros S1 y S2 obtenidos a partir de Pirolisis Rock-Eval (Peters y Cassa, 1994).

Con base en el análisis de TOC, las 91 muestras con contenido de %COT mayor a 0,5%wt fueron sometidas a pirólisis por medio del equipo Rock-Eval 6® turbo (figura 10B). A partir de este análisis se establecieron los parámetros de madurez y calidad de la materia orgánica de la Formación Cansona.

Calidad de la materia orgánica. La calidad de la materia orgánica es definida con respecto al tipo de kerógeno contenido en las rocas sedimentarias. Se define kerógeno como “el constituyente de las rocas sedimentarias que no es soluble en solventes alcalinos acuosos ni en solventes orgánicos comunes” (Tissot, 1984). El kerógeno se clasifica en cuatro grupos (figura 6) y esta dado por una serie de parámetros obtenidos a partir de pirolisis rock-eval (tabla 2), definidos por Durand et al., (1972), Espitalié et al., (1973), Durand & Espitalié, (1976) y refinados por Tissot y Welte, (1974), los cuales son:

Kerógeno Tipo I, tiene altas relaciones H/C y relativamente bajas relaciones O/C, IH de 700 a 900 mgHC/gCOT y es rico en estructuras alifáticas: este kerógeno

posee excelente potencial para generar aceite y está asociado a sedimentos ricos en algas, en particular los derivados de Botryococcus de origen lacustre (Bogheads), y sus equivalentes marinos (Tasmanites) (Durand et al., (1972), Espitalié et al., (1973), Durand & Espitalié, (1976) en Tyson, 1995).

Tipo de kerógeno	IH (mg Hc/g COT)	S2/S3	H/C	Producto expulsado al pico de madurez
I	> 600	> 15	> 1,5	Aceite
II	300-600	10-15	1,2-1,5	Aceite
II/III	200-300	5-10	1,0-2,0	Aceite y Gas
III	50-200	1-5	0,7-1,0	Gas
IV	<50	< 1	< 0,7	Ninguno

Tabla 2. Parámetros Geoquímicos obtenidos a partir de pirolisis rock-eval que describen el tipo de kerógeno (*Calidad*) y el tipo de producto expulsado (Peters y Cassa, 1994).

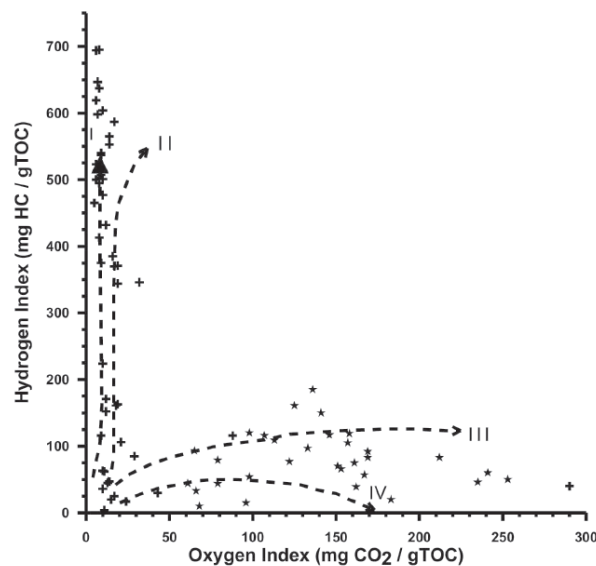


Figura 6. Diagrama de Van Krevelen para estimar el tipo de kerógeno en las rocas (Tomado de ANH et al, 2009).

Kerógeno Tipo II, posee relativamente altas cantidades de H/C y baja relación O/C. Este kerógeno posee potencial para generar aceite/gas. Está asociado a

granos de polen y esporas con material de los otros tipos de kerógeno. Entre el 40 y 60% de este kerógeno puede ser transformado en hidrocarburos (Durand et al., (1972), Espitalié et al., (1973), Durand & Espitalié, (1976) en Tyson, 1995).

Kerógeno Tipo III, tiene bajas relaciones H/C y relativamente altas relaciones O/C con estructuras aromáticas predominantes. Este kerógeno no posee buen potencial para generar aceite, pero si para generar hidrocarburos gaseosos. Está asociado a abundantes contribuciones de plantas superiores y material húmico terrestre, acumulado en ambientes no marinos o en ambientes parálidos (Durand et al., (1972), Espitalié et al., (1973), Durand & Espitalié, (1976) en Tyson, 1995).

Kerógeno tipo IV, está caracterizado por una relación atómica O/C anormalmente alta (0.25 ó más) asociada con una baja relación H/C (0.5 o 0.6). Este material algunas veces llamado Kerógeno Tipo IV puede ser reciclado de sedimentos más antiguos por erosión o profundamente alterado por meteorización sub-aérea, combustión u oxidación biológica en pantanos y suelos antes de la redepositación (Durand et al., (1972), Espitalié et al., (1973), Durand & Espitalié, (1976) en Tyson, 1995).

Madurez termal de la materia orgánica. A partir de Pirolisis Rock-Eval se obtiene una aproximación a la madurez de la materia orgánica contenida en las rocas conocido como Tmax (tabla 3).

Reflectancia de vitrinita (Ro). La vitrinita hace parte del grupo de los macerales, estos son los restos de materia orgánica (animal y vegetal) que puede ser distinguida por su química, por su morfología y reflectancia usando un microscopio petrográfico. Los grupos de macerales son la liptinita (exinita), vitrinita (huminita) e inertinita. La liptinita es posible encontrarla en kerógeno tipo I y II. Por su parte la vitrinita se origina a partir de plantas terrestres y se puede encontrar en Kerógeno tipo III (Mora, 2009), sin embargo, se puede encontrar también en mezclas de kerógeno. La vitrinita consta de polímeros de celulosa y lignina derivados de las paredes de las células de tejido vegetal de las plantas, ella es encontrada más comúnmente en carbones, aunque se encuentra también en rocas sedimentarias

de grano muy fino con mezclas de kerógeno. Este maceral aumenta su reflectancia a medida que aumenta su madurez, debido a que gracias al cambio de temperatura, ésta sufre reacciones de aromatización irreversibles (Peters y Cassa, 1994).

Etapa de Madurez Termal para Aceite		Tmax (°C)	Ro (%)
Inmadura		<435	0,2-0,6
Madura	Madura (Temprano)	435-445	0,6-0,65
	Madura (Pico)	445-450	0,65-0,9
	Madura (Tardío)	450-470	0,9-1,35
	Sobremadura	>470	>470

Tabla 3. Etapas de madurez termal de acuerdo a algunos parámetros geoquímicos (Peters y Cassa, 1994).

El grupo de la vitrinita se divide en tres subgrupos, telovitrinita, detrovitrinita y gelovitrinita, que a su vez se dividen en los macerales propiamente dicho, estos son listados en la Tabla 4.

GRUPO	SUBGRUPO	MACERAL
V I T R I T A	Telovitrinita	<ul style="list-style-type: none"> Telinita Collotelinita (Telocolinita)*
	Detrovitrinita	<ul style="list-style-type: none"> Vitrodetrinita Collodetrinita (Desmocolinita)*
	Gelovitrinita	<ul style="list-style-type: none"> Corpogelinita (Corpocolinita)* Gelinita (Gelocolinita)*

Tabla 4. Subdivisiones del grupo maceral vitrinita (tomado de ICCP, 1998).

El principio de la técnica consiste en comparar la luz reflejada de una vitrinita bien pulida, esta luz tiene una longitud de onda de 546 nm, y entra a un ángulo de

incidencia casi perpendicular al área, medida bajo un aceite de inmersión con un índice de refracción de 1,518 a 23°C, usando un fotomultiplicador (o equipo similar) con luz reflejada bajo idénticas condiciones de un número de estándares de reflectancia conocida. Algunos de los equipos para realizar los análisis son los mostrados en la figura 7.

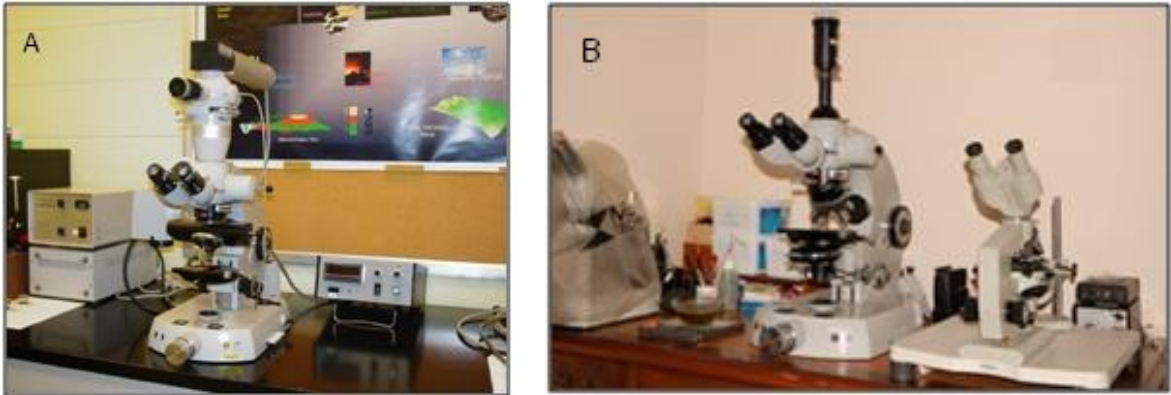


Figura 7. A) Fotomicroscopio Zeiss PM III. B) Fotomicroscopio v. LOMO Biolam. Tomado de Mastalerz (2009).

Análisis visual del kerógeno.

El análisis visual del kerógeno consiste en la observación con microscopio de luz transmitida el kerógeno aislado a través del tratamiento ácido a la roca. El objetivo de esta técnica es la determinación de los tres grupos de la materia orgánica (fitoclastos, MOA y Palinomorfos). Para la identificación de tales grupos han sido presentadas numerosas clasificaciones pero ninguna parece ofrecer una clasificación estandarizada uniforme (Combaz, 1964; Alpern, 1970; Masran y Pocock, 1981; Robert, 1981; Habib, 1982; Batten, 1983; Hart, 1986; van Bergen et al., 1990; Tyson, 1995; Boussafir et al., 1995; y otros), sin embargo, Ercegovac y Kostic (2006) proponen una clasificación organizada de la materia orgánica dispersa (Tabla 5). A continuación se presentará una breve clasificación de la materia orgánica dispersa. Con la clasificación de la materia orgánica es posible determinar tanto el tipo de kerógeno y por lo tanto el potencial de generación, así como el ambiente de depositación de las rocas. La figura 8 muestra la clasificación

ternaria (A-F-P) que es realizada para determinar el ambiente de depositación de la materia orgánica con base en las proporciones relativas de materia amorfa, palinomorfos y fitoclastos con su respectiva explicación en la tabla 6.

Categoría	Constituyente	Origen	Grupo Maceral	Maceral	Tipo de Kerógeno	
Materia Orgánica Estructurada (SOM)	Fitoclastos	Cutículas (Capas extracelulares resistentes que cubren la epidermis de plantas superiores, tienen estructura celular inalterada) Ercegovac (2006).	En luz transmitida normal, son generalmente amarillas a marrón translucidas. Son más típicas de ambientes fluvio-deltaicos, prodelta, estuarino o facies de abanico proximales (Tyson, 1987, 1995), tanto en ambientes de energía, como en pantanos terciarios.	Liptinita	Cutinita	II (aceite)
		Tejidos de cortezas de raíces	Material no leñoso vascular de color amarillo-marrón a marrón oscuro con bordes agudos. Baja fluorescencia luego del decaimiento suelos oxigenados.	Huminita/vitrinita	Suberinita/telinita	III (gas)
		Tejidos leñosos (Fitoclastos traslucidos)	Translucidos al microscopio de luz transmitida. Se caracterizan por presentar estructuras celulares de madera, de color gris, marrón claro a negro de la lignina (figura 10). Es más típica de facies de pantanos óxicos a anóxicos y otros sedimentos ricos en materia orgánica En facies marinas, están representados por material retrabajado.		Telinita Telocolinita	III (gas)
		<ul style="list-style-type: none"> Tejido de Gimnospermas Tejido de Angiospermas Tejido estructurado gelificado 				
		Madera oxidada bioquímicamente	Partículas opacas y negras con o sin estructura visible. Aparecen como partículas opacas mayormente homogéneas altamente corroídas de formas elongadas con bordes angulares. Son muy abundantes en depósitos lacustres y de ríos. Es frecuentemente un componente importante de materia orgánica de zonas mareales influenciadas por la oxidación, en pantanos y en Cuenas marinas anóxicas. Pueden ser abundantes o dominantes en sedimentos de llanuras de lodos costeras, en el delta-front y prodelta, pantanos de agua dulce, lagoons, lagos y ríos (Ercegovac, 2006).	Inertinita	Pirofusinita	IV (inerte)
		Detritos de hongos: esporas, Hypae	Esporas unicelulares y pluricelulares y filamentos de hongos sin fluorescencia. Si se encuentran coloreadas de tonos marrones oscuros indica la melanización e influencia de oxígeno atmosférico (Tyson, 1995).	Inertinita	Secretinita	IV (inerte)
	Palinomorfos	Esporas y granos de polen	Derivados de las flores de plantas superiores, son encontrados en lagos, ríos y en ambientes marinos someros.	Liptinita	Esporinita, polinita	II (aceite)
	Todos los microfósiles resistentes al HCl y HF, de paredes orgánicas (unicelulares, pluricelulares o colonias) que pueden estar presentes en preparaciones palinológicas (Tschudy, 1961)	Algas (fitoplancton)	Incluyen holoplancton y meroplancton, que son formas que pasan la mayor parte de su vida en el suelo oceánico, con una fase planctónica. La mayoría de los Acritarcos son probablemente remanentes de quistes de fitoplancton marino.		Liptodetrinita Telalgininita Lamalginita	I (aceite)
		<ul style="list-style-type: none"> Plancton marino (acritarcos, dynocysts, parasinophyta) Algas de agua fresca (botryococcales) Zoomorfos (scolecodonts, chitinozoa, linajes de foraminíferos) 	Presentes en ambientes lacustres principalmente, pero por transporte se pueden encontrar en ambientes marinos. La presencia de foraminíferos es un indicador confiable de condiciones marinas (especialmente de aéreas de upwelling en el margen noroccidental de África). La abundancia de estos decrece con el aumento de la profundidad del agua.	Restos de animales		
	Sin estructura (AOM) Constituye la mayor parte de la materia orgánica en las rocas madre en forma de kerógeno amorfo, lleva este nombre debido a que no posee una estructura definida e identificable	Derivado de Fitoplancton	MO altamente degradada: pellets fecales, MO fluorescente	En algunos casos esta amorfización ocurrió porque partículas de materia orgánica se asociaron con partículas de arcilla mediante un proceso llamado floculación, este proceso tiene lugar en la zona fótica, donde ocurre la mayoría del consumo y remineralización de la biomasa en o cerca de la interfase agua-sedimentos. Otra procedencia de la AOM es restos fecales o zooplankton (Porter y Robbins, 1981 en Tyson, 1995). En estos ambientes abiertos oxidantes, se preservan poco o nada en los sedimentos pelágicos.	Liptinita	Alginita, bituminita, fluoramorfinita
Producto de la descomposición bacteriana de plantas superiores		Cianobacterias, thiobacterias	Comprende una larga proporción de bacterias vivas o muertas; y su presencia apunta a ambientes reductores (disóxicos o anóxicos). El contenido de esta AOM aumenta en facies distales anóxicas y por los sistemas de upwelling influenciados por facies disóxicas (Demaison and Moore, 1980; Powell et al., 1990). La ausencia de oxígeno es ideal para la preservación de esta materia orgánica (Jones and Demaison, 1982; Jones, 1983).		Lamalginita	I/II (aceite)
		Detritos degradados de plantas superiores, material húmico rellenando las células (MO no fluorescente)	Esta materia orgánica se origina por la degradación bacteriana de partes de plantas (Tyson, 1995)	Huminita/vitrinita	Hebamorfinita (colinita?)	III (gas)

Tabla 5. Clasificación de la materia orgánica dispersa (Modificado de Ercegovac y Kostic, 2006).

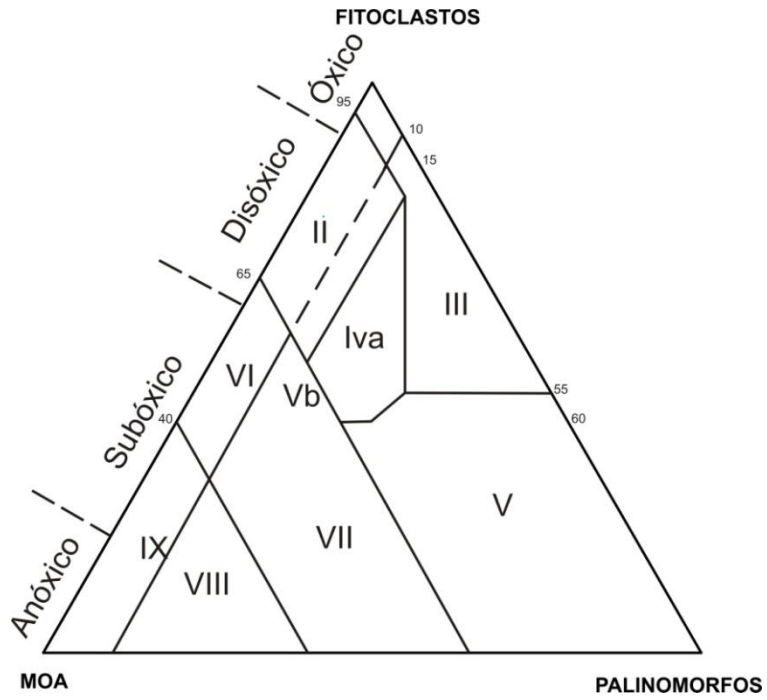


Figura 8. Diagrama ternario del kerógeno MOA-Fitoclastos-Palinomorfos de Tyson (1993) basados en la frecuencia numérica relativa. Tomado de Tyson (1995).

<i>Campo de palinofacies y ambiente</i>	<i>Características</i>	<i>Esporas: Polen</i>	<i>Microplancton</i>	<i>Tipo de Kerógeno</i>
I Plataforma altamente proximal o Cuenca	El alto suministro de fitoclastos diluye los demás componentes	Usualmente alto	Muy bajo	III, gas
II Cuenca marginal disóxica a anóxica	La MOA es diluida por el alto suministro de fitoclastos, pero la preservación de la MOA es moderada a buena. Las cantidades de COT marino dependen del estado redox de la cenca y la dilución.	Alto	Muy bajo	III, gas
III plataforma proximal	Generalmente baja preservación de la MOA; absoluta abundancia de fitoclastos dependiendo de la proximidad actual a la fuente fluvio-deltaica. Son comunes la oxidación y el retrabajamiento.	Alto	Común a abundante dinoquistes	III o IV, gas
IV Transición Plataforma-Cuenca	Paso de la plataforma a la Cuenca en tiempo o espacio. La abundancia absoluta de los fitoclastos depende de la proximidad a la fuente y el grado de redepositación. La cantidad de COT marino depende del estado redox de la Cuenca	Medio a alto	Muy bajo a bajo	III o II, principalmente gas
V Plataforma óxica dominada por lodos	Baja a moderada MOA (usualmente degradada). Palinomorfos abundantes. Lodos calcáreos bioturbados de colores claros son típicos.	Usualmente bajo	Común a abundante dinoquistes	III > IV, gas
VI Plataforma proximal subóxica a anóxica	Alta preservación de la MOA debido a las condiciones reductoras de la Cuenca. El contenido absoluto de los fitoclastos puede ser moderado a alto debido al suministro de material turbidítico y/o la proximidad a la fuente.	Variable, bajo a medio	Bajo a común quistes de dinoflagelados	II, aceite
VII Plataforma distal disóxica-anóxica	Moderada a buena preservación de MOA, bajo a moderado recobro de palinomorfos. Lodolitas ligeramente bioturbadas de colores oscuros son típicas.	Bajo	Moderado a común dinoquistes	II, aceite
VIII Plataforma distal disóxica-óxica	Asociaciones dominadas por MOA, excelente preservación de MOA. Bajo a moderado recobro de palinomorfos (en parte por el enmascaramiento). Shales típicos ricos en materia orgánica depositados en aguas estratificadas	Bajo	Bajo a moderado dinoquistes	I >> I, aceite
IX Cuenca distal subóxica-anóxica	Asociaciones dominadas por MOA. Bajo recobro de palinomorfos (en parte por el enmascaramiento). Ricas en alginitas frecuentemente. Depósitos de Cuencas profundas o de mar estratificado de plataforma, especialmente sedimentos de Cuencas retrabajadas.	bajo	Generalmente bajo prasinofitas	II > I, Alto potencial para aceite

Tabla 6. Características claves para palinofacies marinas distinguidas en los diagramas ternarios AFP en la figura (de Tyson, 1993, after Tyson 1989, p. 163) en Tyson (1995).

Facies orgánicas u organofacies. Para determinar las facies orgánicas de la Formación Cansona se empleará la clasificación de Jones (1984; 1987), quien definió 7 facies orgánicas, A a D (Tabla 7 y 8), relacionadas con los tipos de kerógeno, I a IV. Esta clasificación es propuesta después de Demaison *et al.* (1984), quien se refiere a las facies I a IV, que son directamente equivalentes a los tipos I a IV de kerógeno, definidos por Tissot *et al.* (1974; 1980). La definición de las organofacies de Jones (1984, 1987) enfatiza en que los tipos de kerógeno y las organofacies son conceptualmente diferentes, aunque basadas esencialmente en los mismos criterios (análisis elemental, pirolisis y microscopía).

El concepto de Jones de facies orgánicas enfatiza la distinción entre facies anóxicas-disóxicas (organofacies A, AB, C y BC), facies proximales fluvio-deltaicas a prodeltaicas y facies de plataforma óxica (facies C y CD) y facies altamente óxica, distal y lentamente depositada (facies D). Dentro de las facies disóxicas a anóxicas, la facies BC representa sedimentos con un suministro de fitoclastos relativamente alto (generalmente al margen de la Cuenca), mientras que las facies A, AB y B se presentan donde el suministro de fitoclastos es relativamente bajo (debido a su clima o distancia de la fuente fluvio-deltaica) (Tyson, 1995). Las tablas 5 y 6 muestran los principales rasgos para las facies definidas por Jones (1984; 1987). Para determinar las organofacies es necesario emplear los datos de pirolisis rock-eval, y a esta información adicionarle el análisis visual del kerógeno. Mediante el análisis visual del kerógeno son identificados los grupos predominantes de la materia orgánica en las rocas.

<i>Facies orgánica</i>	<i>Producto de pirolisis</i>		<i>Materia orgánica dominante</i>	<i>Estructuras sedimentarias</i>
	<i>IH</i>	<i>IO</i>		
A	>850	10-30	Algal; amorfa	
AB	650-850	20-50	Amorfa; terrestre muy baja	Laminada
B	400-650	30-80	Amorfa; común terrestre	Bien estratificada a laminada
BC	250-400	40-80	Mezcla; alguna oxidación	Pobrementemente estratificada
C	125-250	50-150	Terrestre; alguna oxidación	Pobrementemente estratificada a bioturbada
CD	50-125	40-150+	Oxidada, retrabajada	
D	< 50	20-200+	Altamente oxidada; retrabajada	Masiva, bioturbada

Tabla 7. Resumen de las características de las facies orgánicas (after Jones, 1984; 1987; Jones y Demaison, 1982).

FACIES ORGÁNICAS	A	AB	B	BC	C	CD	D
% MOA de kerógeno	dominante			Mod.	Usualmente bajo/ausente		
Fluorescencia de la MOA	Los más altos		Mod. a débil		Débil	Usualmente ausente	
% prasinofitas de plancton	Mas alto	Mod.	raro	Usualmente muy raro			
% fitoclastos de kerógeno	Baja (dilución)			Mod.	Usualmente dominante		
Fitoclastos opacos: translucidos	Alto frecuentemente			Usualmente bajo		Aumenta	
<i>Características geoquímicas (para sedimentos inmaduros)</i>							
IH	≥850	≥650	≥400	≥250	≥125	50-125	≤50
Tipo de kerógeno	I	I/II	II	II/III	III	III/IV	IV
COT%	12-20+	3-10+		3-3+	≤3	<0,5	
<i>Factores ambientales</i>							
Tendencia proximal-distal	Distal			Proximal Distal			
Régimen de oxígeno	Anóxico	Anóxico-disóxico			Óxico		Muy Óxico
Tasa de acumulación de sedimentos	Baja	Varía		Alta		Mod	Baja

Tabla 8. Relación entre algunos parámetros seleccionados de palinofacies y facies orgánicas de acuerdo con Jones (1987) en facies idealizadas marinas siliciclásticas (solo tendencias relativas generalizadas).

Contenido de azufre. El contenido de azufre en una roca sedimentaria carbonosa es muy importante para determinar el ambiente de depositación de la misma ya que este refleja las condiciones redox en el momento de la depositación de los sedimentos. Según fue propuesto por Berner y Raiswell (1983), “los sedimentos de grano fino de agua fresca se pueden distinguir rápidamente de sedimentos marinos con base en las relaciones de carbono orgánico con azufre pirítico, designada como C/S” (figura 9).

La reducción de los sulfatos es una relación completamente mediada por bacterias, la cual requiere sulfato disuelto y materia orgánica reactiva para que reaccione y se produzca H₂S que pueda ser fijado en los sedimentos en presencia de hierro reactivo a través de varias reacciones (Westrich, 1983; Berner, 1984). Las condiciones anóxicas requeridas se pueden desarrollar dentro del sedimento después de que se consume el oxígeno durante diagénesis óxica y subóxica o en la columna de agua suprayaciendo el paquete de sedimentos (Demaison and Moore, 1980 en Hofmann et al, 2000). El ambiente en el cual tiene lugar la reducción de sulfatos influye en el modo de fijación del azufre y puede ser usado para reconstruir el nivel de oxigenación en ambientes antiguos de depositación (Hofmann et al, 2000).

A partir del azufre total calculado es posible obtener un cálculo aproximado del azufre de origen orgánico en las rocas. Tal cálculo, de acuerdo con Durand (1980), aunque impreciso, es el mejor método para deducir del S total, la cantidad de mineral de azufre asociado a pirita a partir de la fórmula del FeS₂, es decir, multiplicando el contenido de Fe total por 64/56, y este valor es restado del S total (ecuación 2).

$$\text{Organic Sulfur} = \text{Total Sulfur}' - (\text{'Total Iron'} \times 1.148) \text{ (ecuación 2)}$$

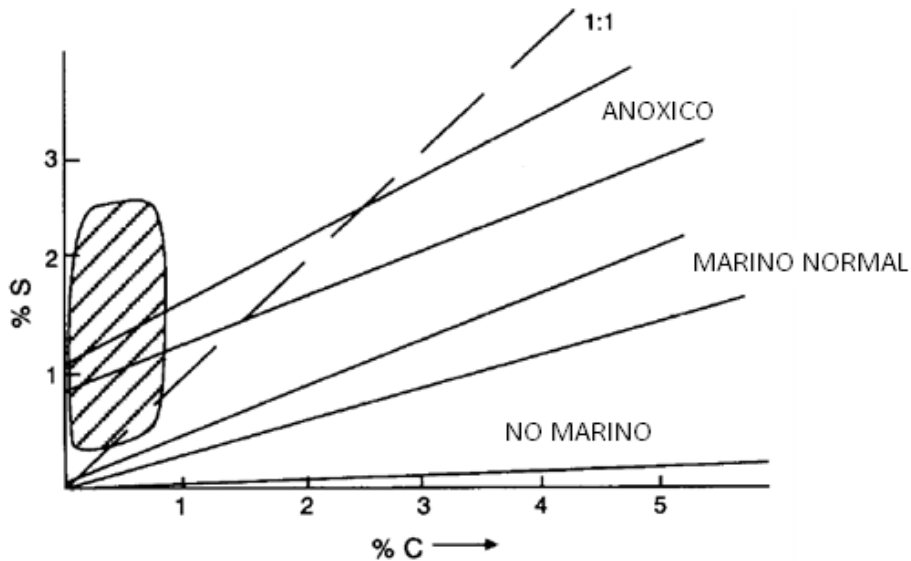


Figura 9. Diagramas Carbono-Azufre que muestra los campos para azufre singenético formado por reducción bacteriana de sulfatos y reacción de sulfuro con Hierro reactivo. La línea discontinua es la relación 1:1. (Leventhal, 1995).

Elementos mayores, menores y trazas en las rocas. Se definen como elementos mayores a los iones metálicos que se encuentran en concentraciones considerablemente mayores (>1,0%wt) que lo que se puede encontrar dentro de la corteza terrestre (Marcovecchio et al, 2006), estos incluyen los siguientes compuestos, presentados en forma de óxidos SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , FeO , MgO , MnO , CaO , Na_2O , and K_2O . Por su parte, los elementos menores son definidos como los que se encuentran en una concentración entre 0,1 y 1,0%wt. Los elementos traza se definen como aquellos que se encuentran en las rocas en concentraciones menores a 1000 ppm. El mecanismo empleado en este proyecto de investigación para determinar la concentración de los elementos mayores y menores en las muestras fue la espectroscopia de emisión con plasma óptico inductivamente acoplado (ICP-OES) y la espectrometría de masas con plasma inductivamente acoplado (ICP-MS). Los principios de ambas técnicas son presentados a continuación.

Espectroscopia de emisión con plasma óptico inductivamente acoplado (ICP-OES). Esta es una técnica multielemental que usa un plasma acoplado inductivamente para excitar los átomos de estados basales a puntos en los que emitan fotones en longitudes de onda específicas o luz que sea característica de un elemento en particular. El número de fotones producidos en una longitud de onda de un elemento específico es medido por un dispositivo óptico de alta resolución y uno sensible a los fotones como un fotomultiplicador o un detector de estado sólido. Esta señal de emisión está directamente relacionada con la concentración de los elementos en la muestra. La temperatura analítica de un ICP es de 6000 a 7000K, comparado con la de la llama, que es típicamente de 2500 a 4000K. La cantidad de muestra que se requiere para el tratamiento es de de 1mL/min (Taylor & Francis, 2008). El ICP-OES es disponible comercialmente como un instrumento de escaneo (elementos determinados secuencialmente) o un instrumento de canal fijo (elementos determinados simultáneamente). El diseño simultáneo es usualmente más rápido, pero ambos sistemas ofrecen la capacidad de arrojar resultados excepcionalmente rápido y pueden determinar hasta 20 a 30 elementos en unos pocos minutos. Sin embargo, cuando es requerida la determinación de solo unos pocos elementos, ICP no es probablemente la mejor técnica debido a que es necesario un largo periodo de tiempo (60 a 90 veces) para realizar el lavado y digestión de las muestras y esperar que la señal alcance el equilibrio (Taylor & Francis, 2008).

Espectrometría de masas con plasma inductivamente acoplado (ICP-MS). Esta técnica es indudablemente la técnica de mayor crecimiento empleada para la detección de elementos traza. La figura 10 muestra los componentes básicos de un sistema ICP-MS. La muestra, que usualmente debe estar en estado líquido, es empujada a una velocidad de 1mL/min, al ser introducida, esta es convertida en un fino aerosol con gas Argón a una tasa de 1L/min. Las finas gotas de aerosol, que representan 1-2% de la muestra, están separadas de las más grandes por medio de una cámara de spray. El fino aerosol que sale del tubo de la cámara de spray es transportado a la antorcha de plasma por medio de un inyector de muestra. Es

importante diferenciar el papel de la antorcha en ICP-MS comparado con ICP-OES. El plasma es formado exactamente de la misma forma, por la interacción de un campo magnético fuerte (producido por radiofrecuencias que pasan a través de una espiral de cobre) o en un flujo tangencial de gas (normalmente argón), a una tasa de 15L/min a través de un tubo concéntrico de cuarzo. Con esto se ioniza el gas, y cuando es “sembrado” con una fuente de electrones de chispas de alto voltaje, forma una descarga de plasma de una muy alta temperatura (10.000K) en la apertura del tubo. Por su parte, en el ICP-OES, el plasma, que normalmente es vertical, es usado para generar fotones de luz, por la excitación de los electrones de un átomo de estado inferior a uno mayor. Cuando los electrones caen a un estado basa, son emitidos fotones de una longitud de onda específica, que es característica del elemento de interés. En ICP-MS, la lámpara de plasma, que está ubicada en posición horizontal, es usada para generar iones cargados positivamente y no fotones (Taylor & Francis, 2008). Esta es una técnica multi-elemental rápida al igual que ICP-OES. El arrojó de los resultados es similar al de ICP-OES, y típicamente detecta de 20 a 30 elementos en pocos minutos, dependiendo de factores como los niveles de concentración y la precisión requerida.

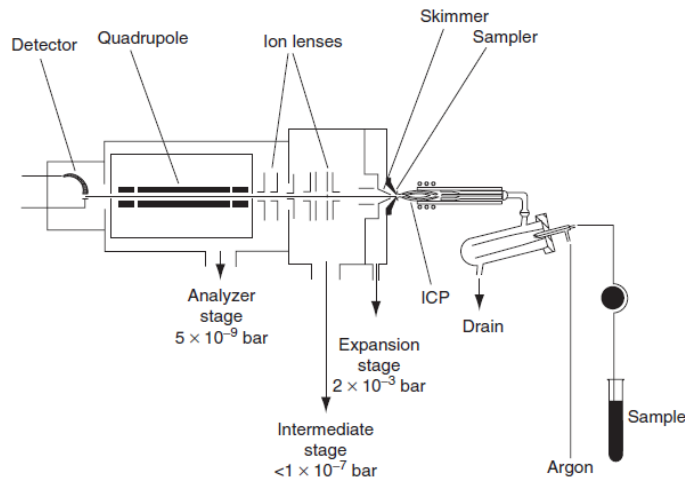


Figura 10. Diagrama esquemático de un espectrómetro de masas inductivamente acoplado (Kellner et al, 2004).

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 DISCUSIÓN ACERCA DE LA ESTRATIGRAFÍA DE LA ZONA

Durante el trabajo de campo fueron levantadas 10 secciones estratigráficas en cuatro localidades de la Cuenca Sinú-San Jacinto, tales localidades son el Cerro Cansona en los Montes de María, Bolívar; el municipio de Chalán, Sucre en las quebradas Peñitas y Columbita; la cantera San Carlos en el municipio de Lórica, Córdoba y las canteras Purgatorio y El Clan en el municipio de Montería, Córdoba (figuras 3 y 11).

El reporte entregado por Caicedo et al (2010) del trabajo de campo propone la correlación entre las diez secciones que se muestra en el anexo D (figura D.1), tal correlación ha sido modificada para la realización de este trabajo, presentándola en la figura 6. Entre ambas correlaciones se observan una serie de discrepancias principalmente hacia el área de Chalán, sin embargo, no se tiene certeza total de la veracidad de una u otra correlación debido a la carencia de estudios bioestratigráficos de las secciones, por lo que se sugiere sea realizado el estudio bioestratigráfico detallado de las mismas.

La correlación propuesta en este trabajo fue modificada de la entregada del reporte en campo con base en la información registrada en la literatura sobre estas secciones debido a que la información suministrada por la bioestratigrafía fue muy pobre (únicamente se dio edad de dos muestras, una de la sección Arroyo Columbita (AC-C-4), la cual dio una edad Campaniano-Maastrichtiano; y una de la sección Cantera El Purgatorio (CP2-C-13,5), la cual sugiere una edad Cretácico superior –Albiano-Maastrichtiano–). En vista de que la sección tipo de la Formación Cansona (en Cerro Cansona) no fue levantada debido a que esta fue tapada debido a la construcción de una carretera, no se tiene una posición estratigráfica muy clara de las secciones levantadas, por lo tanto estas se ubican en la misma posición de la correlación propuesta (Anexo D). La posición de las

secciones de Chalán (Arroyo Columbita y Peñitas) fue determinada con base en la bioestratigrafía y la información reportada en la literatura, respectivamente, en una de las cuales es datada la base de la sección Arroyo Peñitas, dando como resultado, una edad del Campaniano al Maastrichtiano con base en las asociaciones de foraminíferos planctónicos y palinomorfos (Espitia y Torres, 2010 Reporte Interno Ecopetrol-ICP). Las secciones de la Cantera El Purgatorio fueron ubicadas con base en el resultado de la bioestratigrafía y las secciones Cantera El Clan y Cantera San Carlos se ubicaron tentativamente. El objetivo de realizar la correlación estratigráfica es evaluar los cambios laterales en las facies orgánicas identificadas.

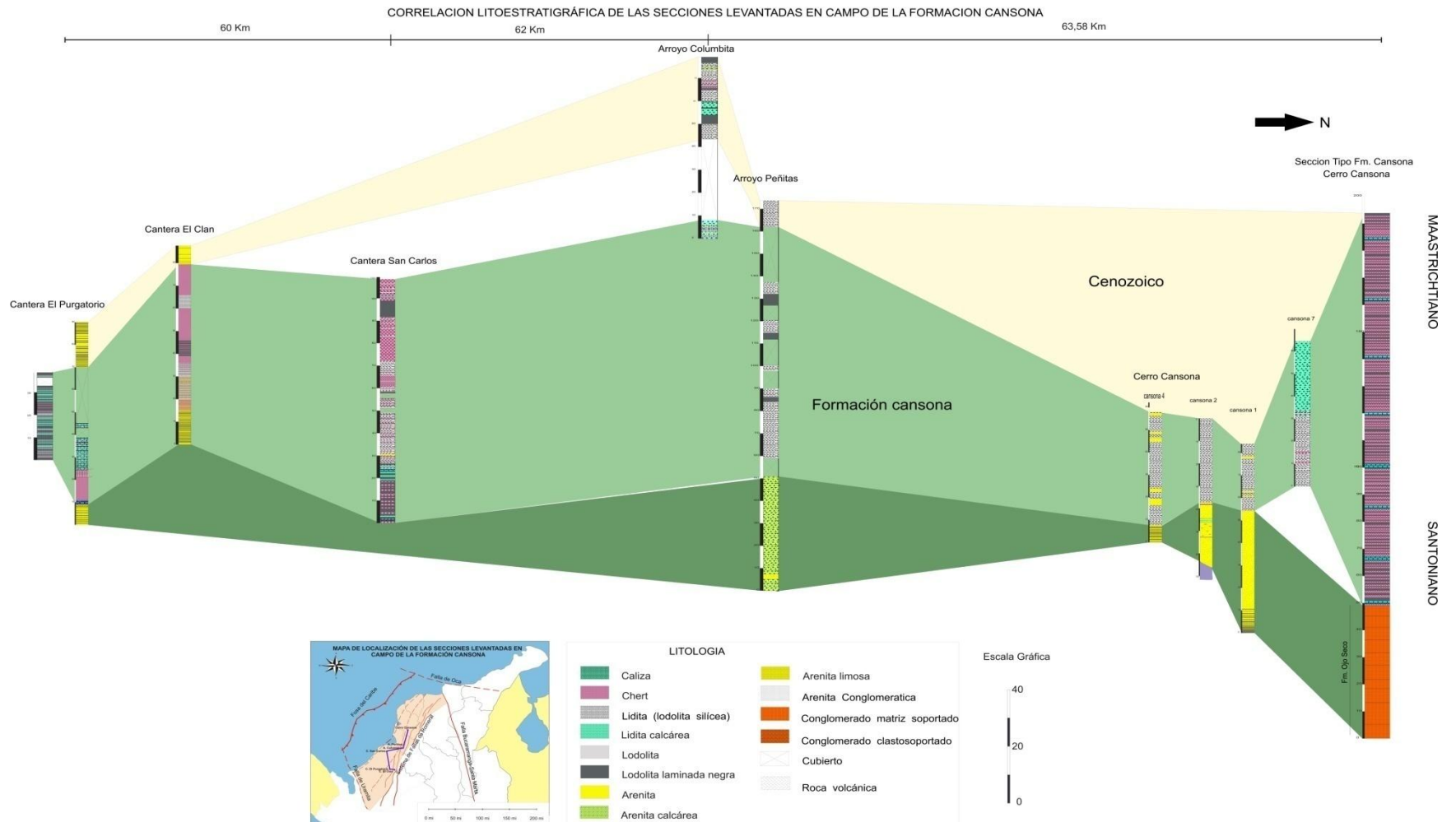


Figura 11. Correlación litoestratigráfica entre las distintas secciones levantadas en campo elaborada para este trabajo. Las columnas estratigráficas fueron modificadas con base en la descripción litológica que fue hecha durante la fase de muestreo.

5.2 EVALUACION DEL POTENCIAL DE GENERACION DE LA FORMACION CANSONA

5.2.1 CANTIDAD, CALIDAD Y MADUREZ DE LA MATERIA ORGÁNICA.

Para evaluar los parámetros básicos de calidad, cantidad y madurez de roca generadora fueron empleadas las técnicas de COT, Pirolisis Rock-Eval y petrografía orgánica. El análisis de COT fue determinado en 476 muestras de limolitas, arcillolitas, chert, areniscas de grano muy fino y areniscas impregnadas. Del total de 476 muestras analizadas, solo el 19% (91 muestras) tuvieron un contenido de Carbono Orgánico superior a 0,5%wt (3 de Cerro Cansona-6, 4 de Arroyo Columbita, 24 de arroyo Peñitas, 21 de Cantera San Carlos, 10 de Cantera El Clan y 29 de Cantera Purgatorio). El potencial basado tanto en la calidad y madurez como en la cantidad de materia orgánica es estimado para cada sección y se presenta a continuación. Los contenidos de COT de la Formación Cansona son de regulares a excelentes hacia la parte sur de la Cuenca, en las secciones San Carlos, Purgatorio y El Clan; mientras que hacia el Norte, en las secciones de Chalán y Cerro Cansona, presenta los COT más bajos (figura 12). De manera similar se comportan los IH de la Formación Cansona, siendo mayores hacia el sur y un sector en el centro y menores hacia el norte (figura 17).

5.2.1.1 **Cerro Cansona.** El potencial de la Formación Cansona en esta sección se estima como Pobre. Todas las muestras se encuentran en el rango de 0,0 a 0,5%wt de TOC. Esta sección presenta los contenidos más bajos de materia orgánica, por lo tanto la cantidad de hidrocarburos producidos a partir de ella es casi nulo (figura 13).

Las rocas del sector de Cerro Cansona se encuentran particularmente afectadas por la meteorización. En trabajos previos como el realizado por ESRI-ILEX (1995) se evalúa la posibilidad de que los contenidos de carbono orgánico sean tan bajos en esta sección, por ejemplo, debido a la meteorización de las rocas causadas por

el clima de la zona. Como se observa en los antecedentes, en la Formación Cansona se han reportado COT regulares a excelentes (Anexo C), así como también IH altos (p. ej. Gulf, 1983; Chevron, 1986; ESRI-ILEX, 1995); mientras que trabajos más recientes (Ecopetrol, 2003) muestran contenidos de Carbono orgánico significativamente más bajos en comparación con los de años anteriores. Este hecho contrasta en gran medida con los resultados obtenidos en este trabajo, el cual arroja COT que no superan 0,8%wt. Tal hecho puede sugerir que la meteorización podría afectar el COT de las rocas en la zona.

En esta sección fue analizada la madurez termal únicamente en una muestra donde hubo recuperación de materia orgánica (CC6-C-8,2). El Tmax de tal muestra es de 429°C y el Ro es de 0,30% (Anexo F-1), ambos resultados demuestran que la muestra presenta un bajo grado de madurez termal.

5.2.1.2 Arroyo Peñitas. El potencial en esta sección, con base en su contenido de materia orgánica, se estima en pobre a regular (figura 13). Veinticuatro muestras de un total de 93, cuya litología corresponde a lodolitas silíceas, tienen un %COT regular (0,46-0,81%wt), en un segmento desde 69,1 metros hacia el tope, mientras que hacia la parte basal de la sección el %COT es pobre.

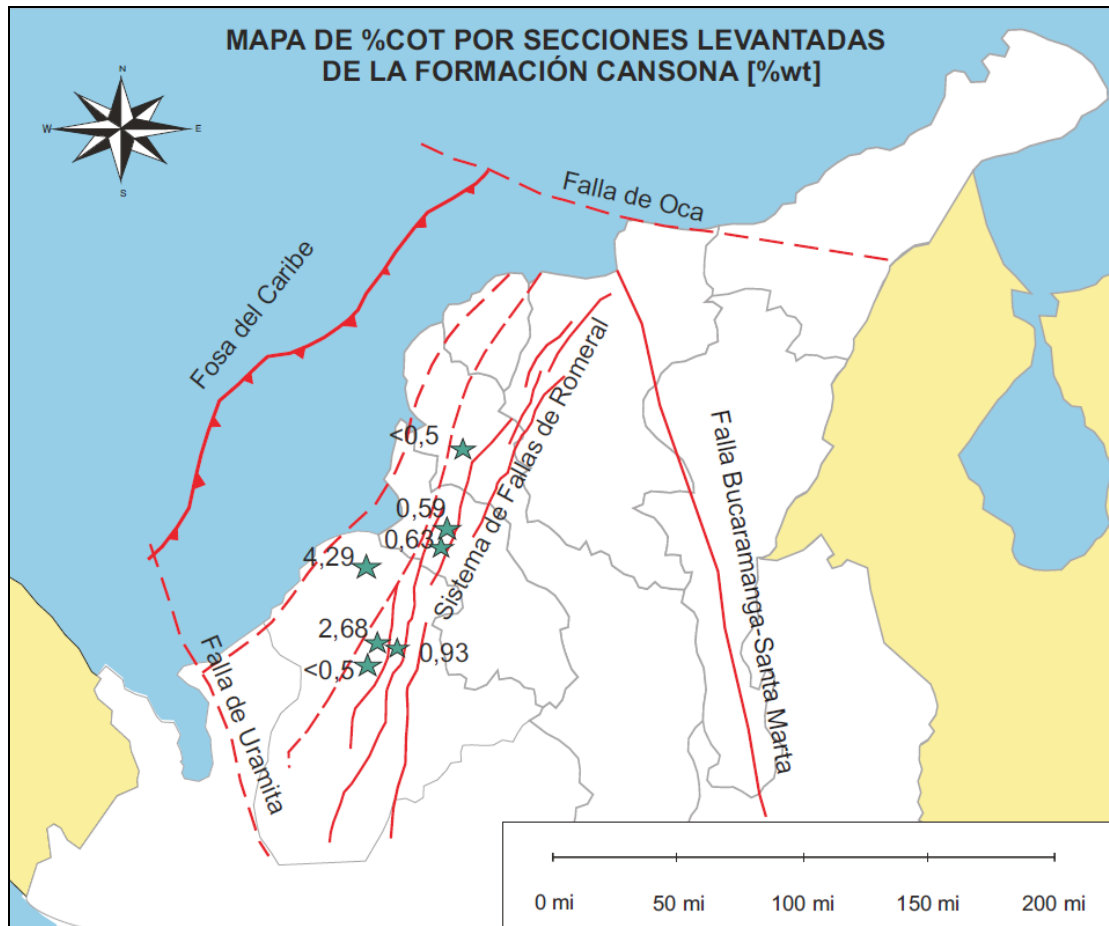


Figura 12. Mapa de distribución promedio del Carbono Orgánico de la Formación [%wt] Cansona en las seis secciones analizadas.

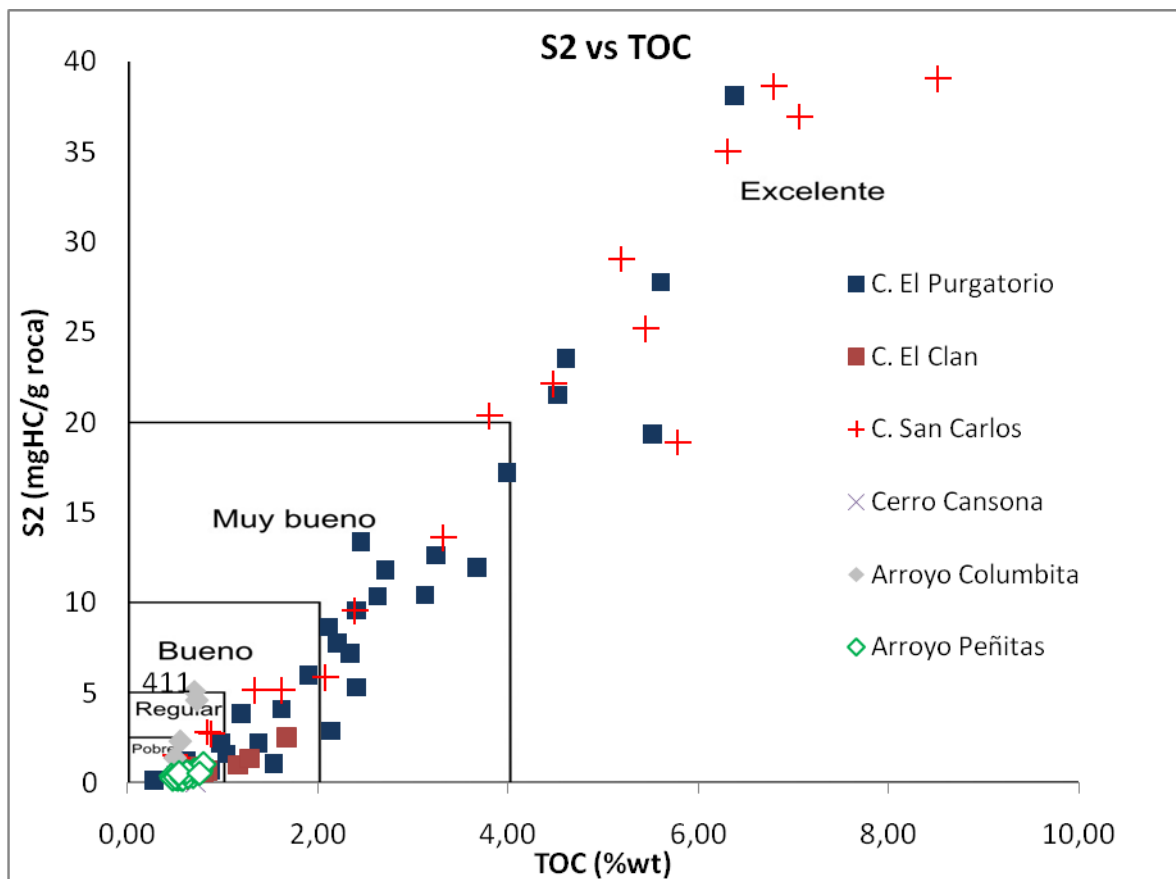


Figura 13. Evaluación del potencial de la Formación Cansona con base en la relación %COT vs S2. Las etiquetas en algunas muestras representan el Tmax.

El S1 a lo largo de toda la sección es muy bajo (menor a 0,5mgHC/g de roca), lo que indica que a partir de estas rocas han sido generados muy pocos hidrocarburos (figura 21), aunque la mayoría de las muestras presenten Tmax superiores a 435°C. El parámetro S2 también es muy bajo (0,25 a 1,06 mgHC/g de roca), por lo tanto el potencial para generar hidrocarburos a partir de las rocas de esta sección es pobre a regular de acuerdo con Peters y Cassa (1994). El IH de estas muestras oscila entre 46 y 131 mg Hc/g COT. Al representar el IH vs IO en el diagrama de Van Krevelen (figura 14) se corrobora que el tipo de kerógeno es III/IV. Sin embargo, en la figura 15 se evalúa el potencial de estas muestras con base en IH vs S2, el cual refleja el bajo potencial de generación de la Formación Cansona en esta localidad.

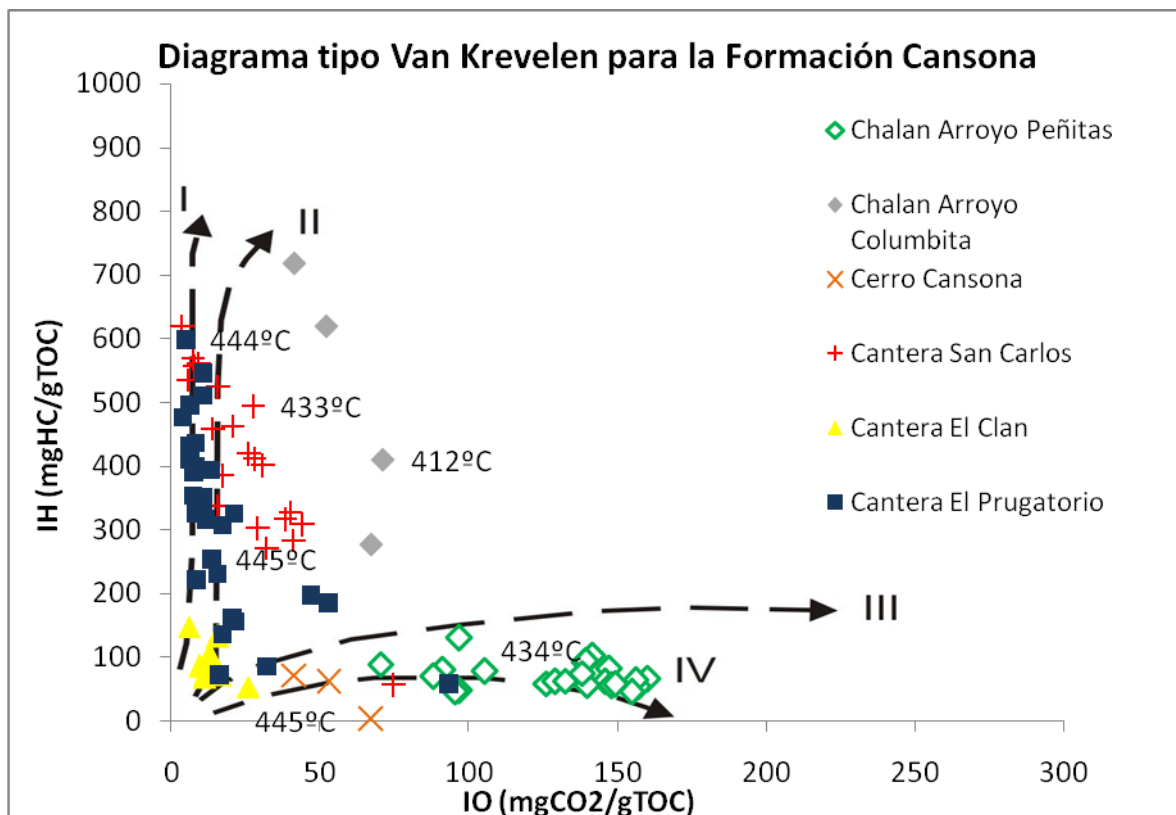


Figura 14. Diagrama tipo Van Krevelen para todas las muestras de la sección Cansona en las diferentes secciones levantadas en campo. Las leyendas en algunas muestras reflejan el Tmax.

A partir del análisis visual del kerógeno presente en las muestras correspondientes a esta sección se pudo determinar que la materia orgánica predominante es del grupo de los *Fitoclastos*, predominando los no bioestructurados (Lámina E.1) y los opacos en segundo lugar; la MOA varía entre 1 y 12%, encontrándose en las muestras MOA fluorescente en muy baja proporción. En la muestra AP-C-114,7 fue encontrada la cianobacteria *Gloeocapsomorpha* (Lámina E.2), esta bacteria se caracteriza por presentarse como glóbulos esféricos a ovoides de color amarillo brillante, cuyo diámetro oscila entre 20 y 500 μm , su superficie externa es típicamente suave. Derenne et al (1991b; 1992) consideraron *Gloeocapsomorpha* como una microalga que corresponde o esta cercanamente relacionada con *Botryococcus Braunii*, sin embargo, “las facies de *Gloeocapsomorpha* (en el Shale Kukersite de Estonia) se caracterizan por ser netamente marinas, por lo tanto, un

origen de agua dulce sería muy improbable”². El recobro de palinomorfos (láminas E.3, E.4 y E.5), sobre todo marinos, en esta sección es el más alto, variando entre 2 y 10%. Al graficar estos datos en un diagrama ternario de MOA, Fitoclastos y Palinomorfos (AFP) (figura 16), las muestras se ubican en los rangos I, II y III. Estos resultados se pueden interpretar como kerógeno tipo III y IV. El ambiente que se le puede atribuir a esta relación es de plataforma marina altamente proximal hacia la mitad de la sección, con aporte de material fluvial, con base en el alto contenido de fitoclastos translucidos y palinomorfos continentales; hacia el tope de la secuencia (166 a 172,5 metros) se evidencia un cambio hacia zonas más profundas en la Cuenca, evidenciado por el aumento en el contenido de dinoflagelados y disminución de fitoclastos translucidos. El nivel de oxígeno en la Cuenca varía de óxico a disóxico.

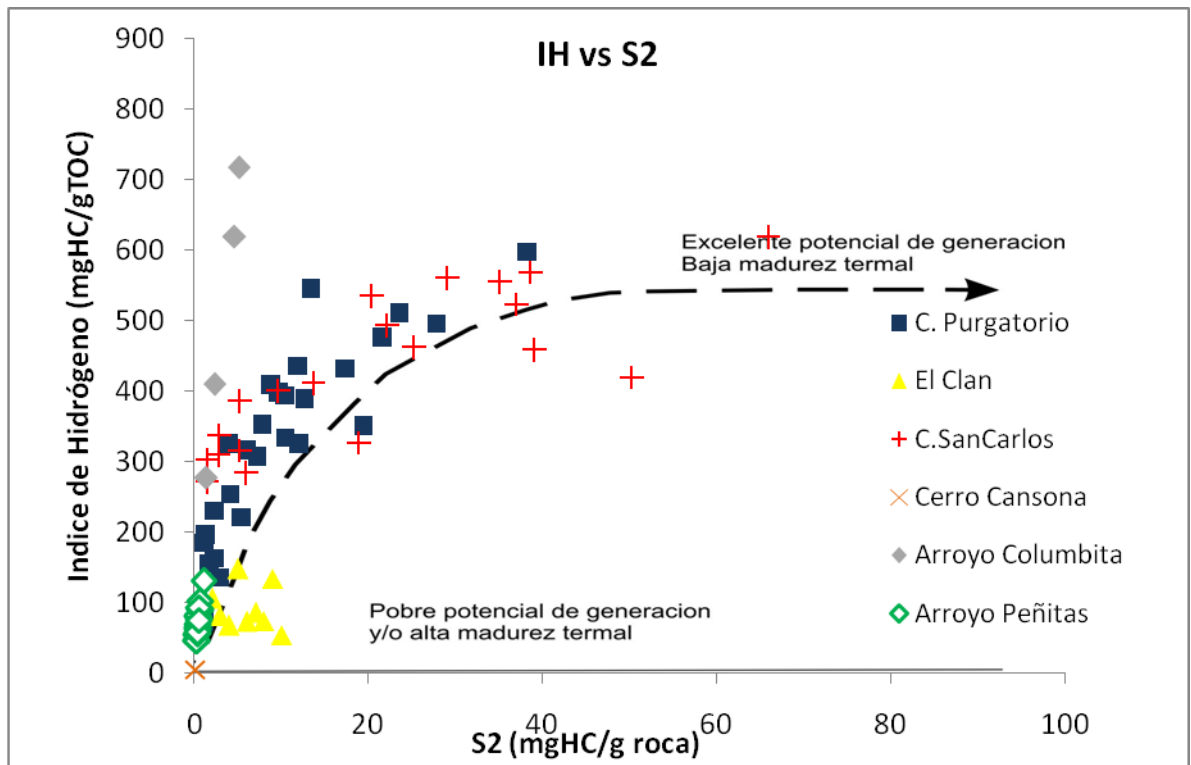


Figura 15. Diagrama de Índice de Hidrógeno vs S2.

² Tyson (1995), Sedimentary organic matter, p. 198

La madurez de esta sección fue evaluada con base en los resultados de pirolisis, así como también por medio de la petrografía orgánica (ICE y %Ro en dos muestras, AP-C-69,1 y AP-C-114,7). Como fue mencionado en párrafos anteriores, aunque la mayoría de las muestras tienen un Tmax por encima de 435°C, el S1 de las muestras es muy bajo, no supera 0,03mgHC/g de roca. Además, el COT de las muestras es regular, lo que condiciona al S1 y S2. Este hecho hace que el Tmax no sea un resultado válido para evaluar la madurez de la sección. La madurez evaluada con técnicas petrográficas en las muestras AP-C-69,1 y AP-C-114,7 indicó que la sección se encuentra aun inmadura. Para la muestra AP-C-69,1; la reflectancia de la vitrinita indicó la existencia de dos familias de vitrinitas, una 0,77%Ro y otra de 0,53%Ro (Anexo F.2), al comparar tal resultado con la coloración de 10 esporas, estas presentan una coloración clasificada en el rango de 4 a 6 (ver Anexo G para observar los rangos de ICE), la cual es asociada con una %Ro teórica de 0,53%Ro (tabla 9), por lo tanto, la familia de vitrinitas que se adoptó fue esta última. La muestra AP-C-114,7 presenta un Tmax de 440°C, sin embargo, al estimar el ICE en 8 esporas, da un rango de 4 a 5 (Anexo G) y tiene una reflectancia de vitrinita de 0,45%Ro, lo que indica que la muestra se encuentra inmadura.

5.2.1.3 Arroyo Columbita. Su contenido de carbono orgánico se valora como Pobre (figuras 13 y 18). Mas del 90% de las muestras se encuentran en el rango de 0,0 a 0,5%wt de %COT; aunque un pequeño segmento de 7,5 metros de lodolitas calcáreas ubicadas hacia la base de la sección tiene COT mayores a 0,5 y menores a 1%wt. El parámetro S2 de estas muestras (1,4 a 5,12 mgHC/g roca) es regular de acuerdo con la definición de Peters y Cassa (1994)..

El parámetro S1, por su parte, refleja la baja madurez de las rocas (Tmax de 411-413 °C), ya que pocos hidrocarburos han sido generados a partir de ellas, mientras que el parámetro S2 (figura 18) demuestra que estas rocas tienen buen potencial para generar hidrocarburos líquidos. Los IH para la base de esta sección se consideran de buenos a excelentes para producir aceite debido a que oscilan

entre 200 y más de 700 mg Hc/g, los cuales al graficarlos en un diagrama tipo Van Krevelen (figura 14), indican que el tipo de kerógeno es II.

ELEVACION	Tmax °C	ICE	%Ro	TAI
132	433	4-4,5		2,5
120	438	4,5-5		2,5
114,7	440	4-4,5	0,45	2,5
87,5	437	4-4,5		2,5
69,1	426	4-4,5	0,53	2,5

Tabla 9. Parámetros para la evaluación de la madurez termal en las rocas de la Formación Cansona en la sección Arroyo Peñitas.

En el análisis visual del kerogeno de las muestras de la base de esta sección fue identificada gran abundancia de materia orgánica amorfa fluorescente (láminas E.6 y E.7), ocupando más del 69% del total de la materia orgánica observada. Fue identificada además la presencia de la cianobacteria *Gloeocapsomorpha*, a la cual le ha sido atribuida un ambiente de depositación marino (Tyson, 1995). Las asociaciones de MOA son predominantes, con excelente preservación. El contenido de palinomorfos es bajo (de 2 a 7%). Al graficar los tres grupos de materia orgánica en el diagrama ternario AFP (figura 16), las muestras caen dentro del grupo IX, que corresponde a un ambiente marino de plataforma externa anóxico a subóxico. Este grupo es típico de shale ricos en materia orgánica depositada en condiciones marinas de aguas estratificadas. El tipo de kerógeno que conforma estas muestras es predominantemente II, tal resultado se encuentra en concordancia con los resultados de pirolisis aplicados a las muestras.

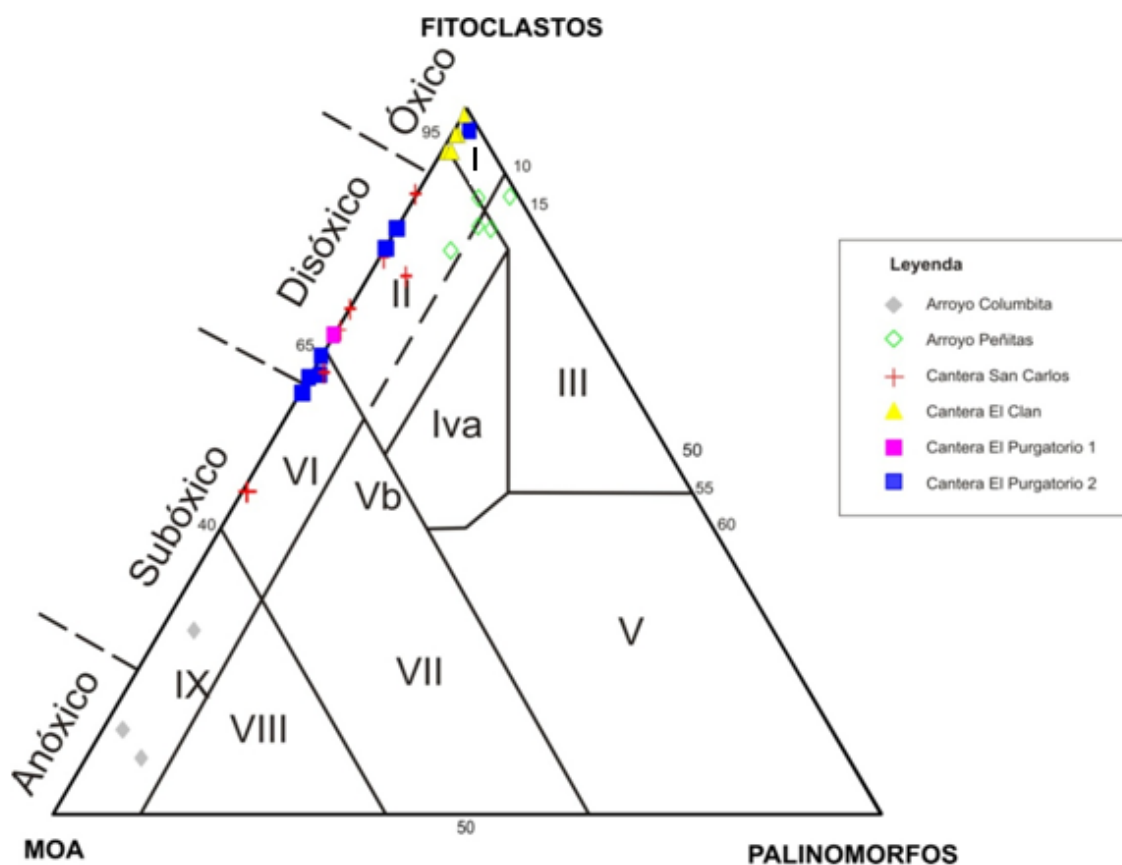


Figura 16. Diagrama ternario AFP para las muestras de las secciones Arroyo Peñitas, Arroyo Columbita, Canteras San Carlos, El Clan y El Purgatorio 1 y 2. Ver las características de cada sector en la tabla 6.

La baja madurez de esta sección es evidente tanto en la petrografía orgánica, como en la pirolisis. La alta fluorescencia de la materia orgánica y el bajo índice de Coloración de Esporas (ICE) refleja la baja madurez termal de la sección. El ICE es de 4,5 a 5 en la muestra AC-C-5; y para las muestras AC-C-6 y AC-C-7,5, este es 2,5 a 3 (tabla 10). Dichos ICE corroboran el estado de madurez obtenido a partir de pirolisis rock-eval, donde el Tmax es en promedio de 413 y el S1 es muy bajo, los cuales indican que la roca se encuentra termalmente inmadura. La reflectancia de la vitrinita no pudo ser estimada para las muestras de esta sección debido al pobre recobro de vitrinitas en las muestras analizadas.

ELEVACION	Tmax	ICE	%Ro	TAI
7,5	413	2,5-3	-	1,8
6	411	2,5-3	-	1,8
5	415	4,5-5	-	2,5

Tabla 10. Madurez termal en las rocas de la Formación Cansona en la sección Arroyo Columbita.

5.2.1.4 Cantera San Carlos. Los contenidos de COT para esta sección se estiman de Pobre a Excelente (figura 13), ya que el %COT es muy variable, desde muestras que no superan 0,5%wt; hasta contenidos excelentes (11,97%wt). En esta sección se encuentra el segmento con los mejores COT de la Formación Cansona, ubicado en la base de la sección, con un espesor de 22 metros que consiste de una interestratificación de shale carbonoso y chert. La mayoría de las rocas suprayacentes a este segmento corresponden a chert laminado y un pequeño segmento de lodolitas rojas. Es posible que este segmento de excelentes contenidos de COT corresponda al miembro Finca Vieja de la Formación Cansona, el cual es el segmento más prospectivo en cuanto a generación de hidrocarburos en tal Formación. En un trabajo previo realizado por Chevron (1986) fue levantada la Formación Cansona en la sección Cantera San Sebastián (anexo) (la cual en este trabajo recibe el nombre de Cantera San Carlos) en donde se reporta hacia la base de la sección tal miembro, siendo coincidente con la configuración estratigráfica del presente trabajo.

El contenido de hidrocarburos libres en la muestra (S1) es bajo a regular (0,13 a 2,7mgHC/g roca); indicando un bajo grado de evolución termal (figura 19). Por su parte, los valores de S2 muestran que las rocas tienen excelente potencial para generar hidrocarburos líquidos (0,37 a 65,92mgHC/g roca). El índice de hidrógeno de la Formación Cansona en esta sección varía entre 58 y 569mgHC/gCOT, lo que representa un kerógeno predominantemente tipo II y mezcla de II y III, con posibilidad para generar hidrocarburos líquidos. Al representar los parámetros IH e

IO en un diagrama tipo Van Krevelen se observa predominantemente un kerógeno tipo II (figura 14). Con base en la figura 15, la Formación Cansona en esta sección tiene un excelente potencial de generación. El tipo de hidrocarburo que se espera haya sido generado a partir de estas rocas es principalmente aceite y mezcla de gas y aceite.

Los fitoclastos amorfizados (láminas E.8 y E.9) son predominantes a lo largo de la sección, siendo su contenido relativamente menor hacia la base, sin embargo, predomina desde los 10,5 metros de espesor, alcanzando hasta más del 70%. La MOA también se encuentra presente en esta sección, alcanzando hasta el 30% del contenido total de materia orgánica. El recobro de palinomorfos en esta sección es bajo, teniendo su mayor porcentaje a los 15 metros de espesor, predominando los palinomorfos continentales. Algunos individuos de la cianobacteria *Gloeocapsomorpha prisca* fue encontrada hacia la base (Lámina E.10). Al graficar en el diagrama ternario AFP, las muestras caen principalmente en los rangos II y VI (figura 16), la región II se caracteriza por ser una plataforma marina marginal disóxica, donde la MOA es diluida por un alto suministro de fitoclastos; por su parte, la región VI es una zona de plataforma subóxica a anóxica proximal. El tipo de kerógeno que se puede interpretar de estas muestras es II y III.

Como se observa en la figura 19, el Tmax de las muestras de esta sección oscilan entre 427 y 446°C, la mayoría de la sección se encuentra por encima de 435°C, lo que indica que las rocas se encuentran entrando a la ventana de generación del aceite y en muchos casos, como lo demuestra el S1, ya han generado hidrocarburos. Para validar la madurez termal se empleó la reflectancia de vitrinita de las muestras SC-C-7,5 y SC-C-59.5. Para el caso de la muestra SC-C-7,5, cuyo Tmax es de 438°C, la reflectancia de la vitrinita muestra una media de 0,58%Ro (Anexo F-4), tales valores se encuentran en concordancia, de acuerdo con Peters y Cassa (1994). La muestra SC-C59.5 tiene una reflectancia media de vitrinita de 0.45%Ro (tabla 11), aunque el Tmax indica que tiene una alta madurez

termal (446°C), es debido tener en cuenta que el COT de esta muestra es muy bajo, por lo tanto el S2 y por ende el Tmax no son fiables, al contrario de lo que sucede con las muestras de la base que presentan buenos COTy tienen un grado bajo de madurez. En general, la sección se encuentra inmadura y tiene un excelente potencial para generar aceite y mezclas de hidrocarburos.

ELEVACION	Tmax	ICE	%Ro
59,5	446	-	0,45
7,5	438	-	0,58

Tabla 11. Parámetros para la evaluación de la madurez termal en las rocas de la Formación Cansona en la sección Cantera San Carlos.

5.2.1.5 Cantera El Clan. Para esta sección, el contenido de carbono orgánico se interpreta como Pobre a bueno (figura 13). La mayoría de las muestras tienen un %COT inferior a 0,5%, aunque hacia la base se encuentra un segmento de 15 metros constituido por intercalaciones de shale y areniscas de grano fino, en el cual, los shale alcanzan %COT hasta de 1,69%.

El S1 en ese intervalo es muy bajo, esto demuestra que se han generado pocos hidrocarburos a partir de estas rocas aunque la Tmax (441 a 448°C) refleje alta madurez termal. Al evaluar la madurez con técnicas petrográficas, se pudo determinar que las rocas se encuentran en un estado más bajo de madurez termal que el mostrado por la pirolisis. La reflectancia de la vitrinita de la muestra CCL-C-5 es de 0,59%Ro y el ICE estimado con base en solo tres esporas encontradas en la placa es de 5,5 a 6, (tabla 12) esto es indicativo de que las rocas se encuentran entrando en la ventana de generación y no en estados más avanzados de madurez. Los valores de IH e IO son bajos, por lo tanto el tipo de kerógeno de estas muestras es III (Peters y Cassa, 1994) predominantemente (figura 14), con posible potencial para generar gas, sin embargo, la figura 15 muestra que tiene muy bajo potencial para generar hidrocarburos.

ELEVACION	Tmax	ICE	%Ro
5	443	5,5-6	0,593

Tabla 12. Parámetros para la evaluación de la madurez termal en las rocas de la Formación Cansona en la sección Cantera El Clan.

El grupo de materia orgánica predominante son los fitoclastos, principalmente no bioestructurados, y en segundo lugar, se encuentran los fitoclastos amorfizados (Lámina E.11). El bajo recobro de palinomorfos en las muestras de esta sección indica la depositación en un ambiente transicional deltaico de alta energía, donde la corriente de la fuente fluvial no permite la preservación de palinomorfos y “el suministro de fitoclastos diluye los demás componentes” (Tyson, 1995). De acuerdo con el diagrama ternario AFP (figura 16), todas las muestras se ubican dentro de los grupos I y II, dichos grupos son asociados con un ambiente marino transicional de afinidad deltaica tanto por sus características litoestratigráficas, como por la materia orgánica característica. El tipo de kerógeno de estas muestras es III, con potencial para generar gas, dicho resultado se encuentra en concordancia con los bajos índices de hidrogeno obtenidos a partir de pirolisis.

5.2.1.6 Cantera El Purgatorio. Esta cantera fue analizada en dos secciones estratigráficas (figura 11). En la sección Purgatorio 1 (90 metros de espesor) los contenidos de carbono organico son pobres (menores a 0,5%); mientras que en Purgatorio 2 los valores, aunque variables, son más altos (mayores a 4%wt), por lo tanto, se interpreta el potencial de la Formación Cansona con base en el COT en esta sección como Regular a Excelente (figura 13); el S1 demuestra el bajo grado de evolución termal de las rocas de esta sección (0,025 a 1,57mgHC/g roca); por su parte, el S2 (1,1 a 38,14mgHC/g roca) demuestra que tiene un buen potencial de generación. La Formación Cansona en la sección Purgatorio 2 se caracteriza por presentarse como una intercalación de chert, shale y lodolitas calcáreas localmente (figura 20), de las cuales, las muestras con mejores COT son shale y en algunos casos lodolitas calcáreas. El IH (entre 59 y 546, con un promedio de 324 mg HC/g COT) es muy variable a lo largo de la columna

estratigráfica, demostrando que estas rocas tienen potencial para generar principalmente hidrocarburos líquidos y mezclas de gas y aceite. De acuerdo con la figura 14 el kerógeno predominante es tipo II y II/III (con potencial para generar hidrocarburos líquidos y mezclas) (figura 15).

La materia orgánica de la Formación Cansona en la sección Purgatorio 2 es uniforme verticalmente. Se compone principalmente de fitoclastos amorfizados en más del 60% y en segundo lugar se encuentra la MOA no fluorescente (hasta 36%), la relación entre estos dos grupos es de 2:3 (láminas E.13 y E.14), la presencia de fitoclastos opacos es también importante; mientras que el recobro de palinomorfos es muy bajo en la base (Lámina E.15) y nulo desde la parte media hasta la base. En el diagrama ternario AFP (figura 16) se observa que la mayoría de las muestras se ubican en los grupos II y VI, al igual que las muestras de la cantera San Carlos, debido al aumento en los contenidos de materia orgánica amorfa, dichos grupos corresponden a los ambientes de plataforma continental proximal a distal de subóxica a disóxica, mientras que una muestra se ubica en el sector I del diagrama AFP, al que se le asocia un ambiente de plataforma altamente proximal, cuyo kerógeno es tipo III. En general, el tipo de kerógeno de estas asociaciones es II y III, con potencial para generar gas principalmente.

La medición de reflectancia de vitrinita en las muestras CP-C-31,5, CP2-C-11 y CP2-C-37,5 (ver columna estratigráfica y correlación) no muestra una correlación directa con los resultados de pirolisis, por ejemplo, la muestra CP-C-31,5 presenta un Tmax de 451°C, lo cual indicaría que se encuentra por encima del pico de generación, sin embargo, la reflectancia de vitrinita muestra que esta materia orgánica se encuentra entrando a la ventana de generación, con un %Ro de 0,64 (tabla 13). Por su parte, en la muestra CP2-C-11 (Anexo F-7) con un Tmax de 443, si muestra una correlación entre el Tmax y la %Ro, el cual es de 0,74%Ro (tabla 13). Al observar ambas muestras se pueden identificar dos valores de reflectancia predominantes, lo que se traduce en la posible la presencia de dos

familias de vitrinitas. En general, la Formación Cansona se encuentra entrando en la ventana de generación en la sección Cantera El Purgatorio.

ELEVACION	Tmax	ICE	%Ro
CP2-C-11	443	-	0,75
CP-C-31,5	451	-	0,64

Tabla 13. Parámetros para la evaluación de la madurez termal en las rocas de la Formación Cansona en la sección Cantera El Purgatorio.

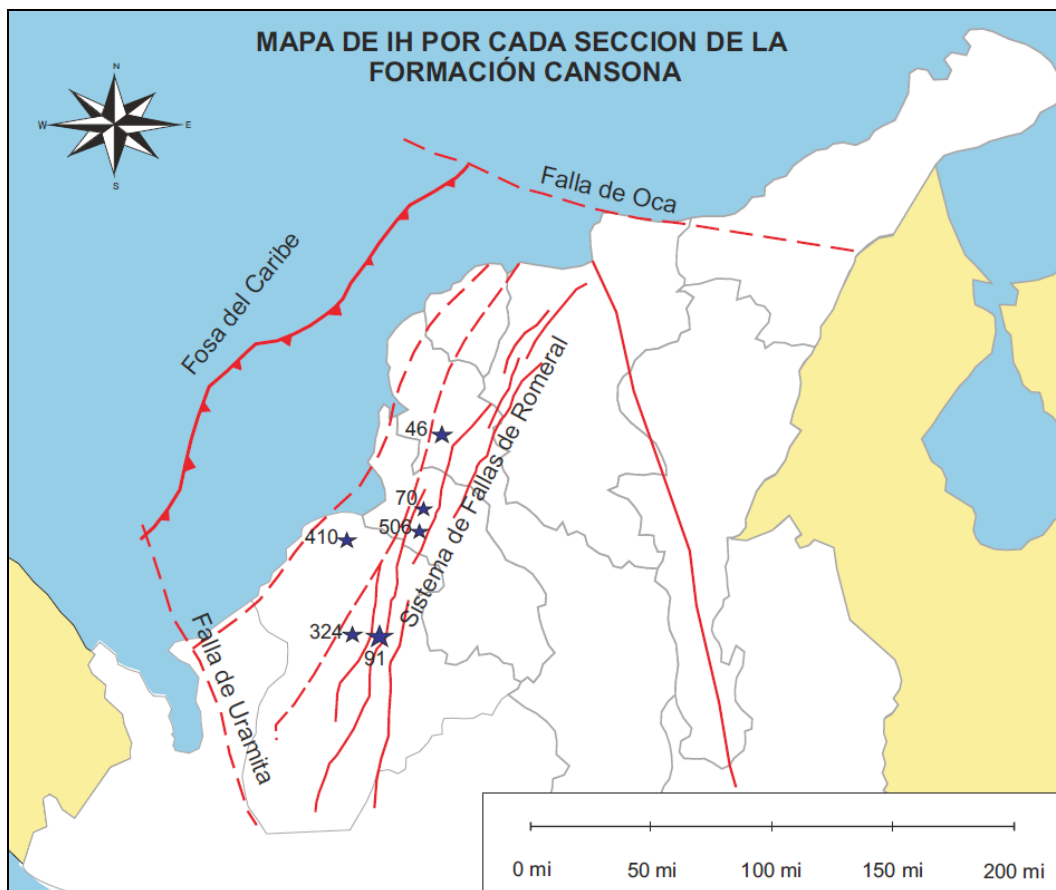


Figura 17. Mapa de distribución de los promedios de Índice de Hidrógeno [mgHC/gTOC] por sección de la Formación Cansona.

Las localidades donde la Formación Cansona tiene mejor potencial de generación con base en la pirolisis y el análisis visual del kerógeno son las Canteras San Carlos y El Purgatorio debido a que tiene los mejores índices de Hidrogeno (300 a 600mgHC/gCOT, por lo tanto el kerógeno ha sido clasificado como tipo II y mezcla de II y III (figura 18). Adicionalmente, como se observa en la figura 10, estas secciones presentan excelente potencial de generación. La sección arroyo Columbita presenta materia orgánica de excelente calidad para generar hidrocarburos líquidos con base tanto en la pirolisis como en el análisis visual del kerógeno, sin embargo, los contenidos de carbono orgánico encontrados son muy bajos, por lo tanto no representa prospectividad como roca generadora. La Formación Cansona las secciones Cantera San Carlos y El Purgatorio 2 presenta kerógeno tipo II y II/III típico de ambientes de depositación marinos transicionales, cuyo potencial varía de bueno a excelente para la generación de hidrocarburos líquidos y mezclas, sin embargo, el grado de evolución termal de la Formación Cansona no es muy alto, principalmente en la sección Cantera San Carlos, mientras que es un poco mayor en El Purgatorio 2.

Por su parte, la Formación Cansona en las secciones Arroyo Peñitas y Cantera El Clan presentan contenidos de COT muy bajos como para ser considerada como una roca generadora potencial; adicionalmente la materia orgánica es de afinidad continental, cuyo kerógeno es tipo III debido tanto a sus bajos IH y altos IO, como a las asociaciones de la materia orgánica encontrada en tales secciones, la cual consiste de fitoclastos.

5.3 ORGANOFACIES

Las facies orgánicas de la Formación Cansona fueron identificadas a partir de técnicas analíticas (los parámetros IH, IO obtenidos a partir de pirolisis y el contenido de carbono orgánico), en conjunto con técnicas petrográficas (el análisis visual del kerógeno) en las cinco secciones estratigráficas donde fue posible estudiarlas. Tales facies orgánicas fueron determinadas con base en el modelo de Jones (1987), quien define siete facies orgánicas, A, AB, B, BC, C, CD, D, “las cuales describen un contenido de oxígeno del agua decreciente, el cual controla la preservación cuantitativa y cualitativa de la materia orgánica y, por lo tanto, el potencial para generar petróleo” (Mann y Stein, 1997). Cinco, de las siete facies orgánicas propuestas por Jones (1987) fueron identificadas en las diferentes secciones donde se estudió la Formación Cansona, tales facies fueron las AB, B, BC, C y CD, facies que se caracterizan por mostrar una “transición entre facies disóxicas, como son las facies B y BC, a unas facies proximal fluvio-deltaica a prodeltaica y facies de plataforma óxica (facies C y CD)” Tyson (1995). A continuación se describen las facies orgánicas identificadas en la Formación Cansona.

5.3.1 Facies AB. Esta primera facies representa la mejor calidad de la materia orgánica encontrada en la Formación Cansona. Tal facies fue identificada únicamente hacia la base de la sección Arroyo Columbita (figura 18). Consiste de MOA fluorescente, predominantemente (85%), con un aporte de fitoclastos muy bajo (8%) principalmente por opacos equidimensionales y translucidos amorfizados; el recobro de palinomorfos en esta facies indica un ambiente marino con base en la presencia de dinoflagelados y FTL. La alta fluorescencia que presentan las partículas de MOA indican un ambiente marino altamente reductor con buena preservación de materiales ricos en lípidos (Tyson, 1995). Esta facies tiene dentro de sus propiedades químicas, %COT bajos (hasta 0,8%), IH hasta de 717mgHC/gTOC. La litología con la que se encuentra asociada esta facies es de

lodolita ligeramente arenosa, por lo que la materia orgánica no se concentró en estas rocas. El ambiente de depositación que es atribuido a esta facies es marino de plataforma externa de aguas muy tranquilas altamente reductor, al cual se le asocia kerógeno tipo II, sin embargo, esta facies no tiene amplia distribución dentro del muestreo, por lo tanto, no representa potencial para generar hidrocarburos. Adicionalmente, al evaluar el grado de madurez de la Formación Cansona en la sección Arroyo Columbita, se encuentra inmadura (Tmax promedio de 313°C, S2 hasta 5,12 0,3mgHC/g roca, S1menores a 0,3mgHC/g roca; y adicionalmente, la coloración general de la materia orgánica es clara y presenta alta fluorescencia).

5.3.2 Facies B. Caracterizada por presentar aunque COT muy bajos (0,56 a 0,74), donde la materia organica ha sido diluida, una calidad de la materia orgánica muy buena, cuyos Índices de Hidrogeno oscilan entre 410 y 618 mg HC/gTOC; IO que oscilan entre 41 y 52. La diferencia entre esta facies y la anterior, AB, es el IH que es mayor en la facies AB que en esta.

Al observar la materia orgánica en luz transmitida, la materia orgánica de esta facies es de excelente calidad, siendo más del 60% de la materia orgánica dominada por MOA cuya fluorescencia es moderada; el contenido de fitoclastos es muy reducido, predominando los fitoclastos opacos equidimensionales; y el contenido de palinomorfos no supera el 7%. Esta facies se puede interpretar como depositada en un ambiente marino de plataforma externa en un régimen de oxígeno de anóxico a disóxico, cuya tasa de depositación se estima como variable, de acuerdo con Tyson (1995), esta facies orgánica se presenta cuando el suministro de fitoclastos es relativamente bajo (debido al clima o a distancia de las fuentes fluvio-deltaicas). Tal facies orgánica fue encontrada en las secciones Arroyo Columbita y Cantera San Carlos (figuras 18 y 19), presentada solo en pequeños segmentos de muy poco espesor, por lo tanto, aunque tiene una excelente calidad de la materia orgánica debido a su alto grado de preservación, no representa un intervalo prospectivo en cuanto a generación de hidrocarburos

debido a su bajo contenido de carbono orgánico, adicionalmente, esta sección se encuentra inmadura (sección 5.2.2).

REGISTRO GEOQUÍMICO ARROYO COLUMBITA

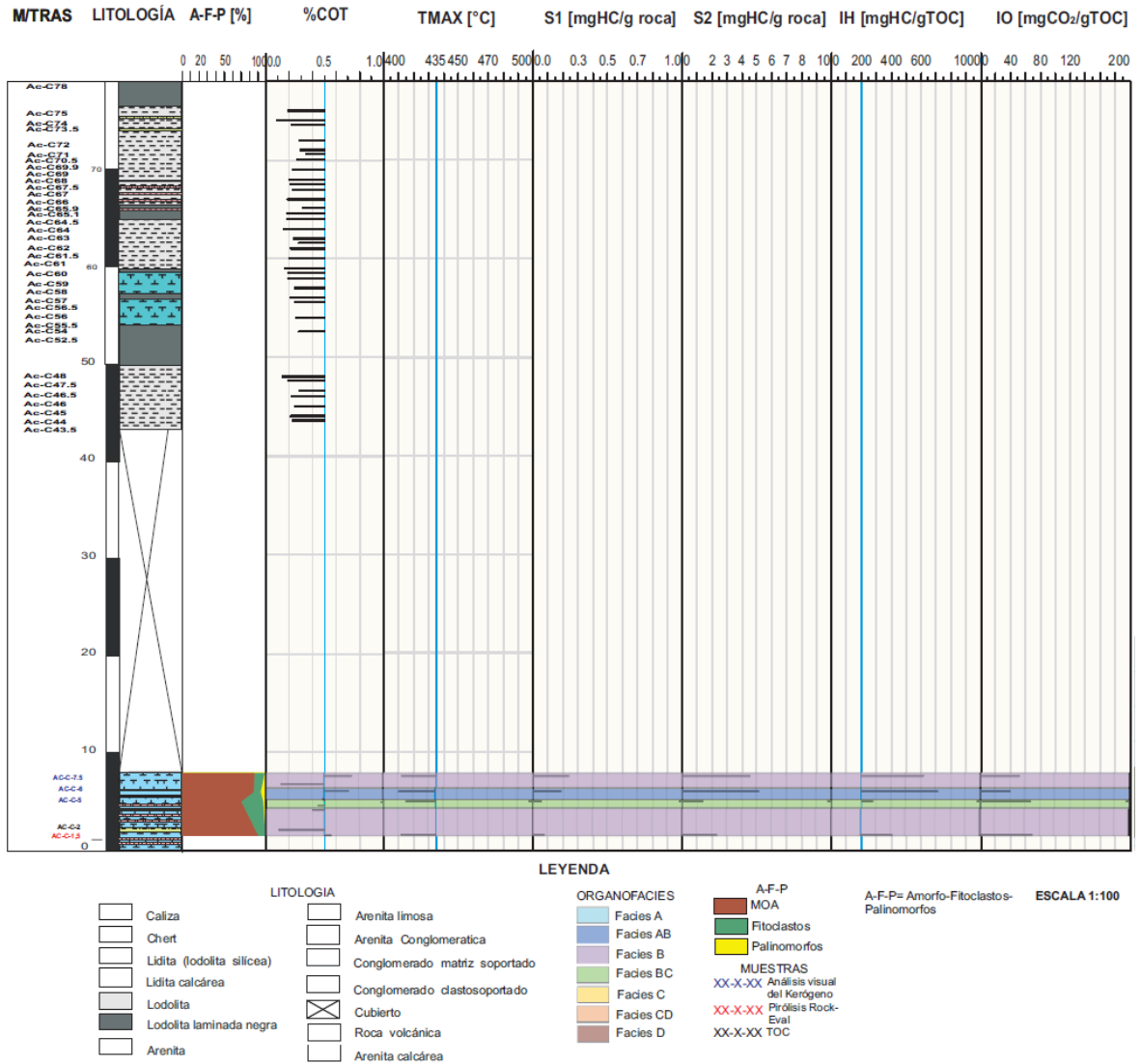


Figura 18. Facies orgánicas de la Formación Cansona en la sección Arroyo Columbita. En la columna de %COT 0,5% representa el corte para realizar pirólisis; en la columna de Tmax, la línea azul marca 435°C, mostrando cuales muestras se encuentran maduras y cuáles no.

Facies BC. Esta facies es la más predominante en la Formación Cansona, se caracteriza por presentar contenidos de carbono orgánico que oscilan entre 1,19

hasta 11,97 %wt; IH de 496 mgHC/gTOC; IO muy bajos, desde 6 mgCO₂/gTOC, sin embargo, la materia orgánica predominante en esta facies se caracteriza por presentar predominio de MOA no fluorescente y fitoclastos amorfizados (láminas E.8 a E.14); adicionalmente, el recobro de palinomorfos es casi nulo en estas muestras (figuras 19 y 20). La facies BC fue encontrada predominante en la sección Cantera Purgatorio y hacia la base de la sección Cantera San Carlos (figuras 19 y 20). Paleambientalmente, esta facies representa unas condiciones disóxicas en un ambiente de depositación marino de plataforma donde el suministro de fitoclastos fue relativamente alto. De acuerdo con los parámetros geoquímicos, las rocas que contienen estas facies orgánicas, que son predominantemente shale carbonosos y lodolitas carbonosas cuya laminación es plano paralela a ondulosa, tienen un buen potencial para generar hidrocarburos, sin embargo, se espera obtener hidrocarburos gaseosos más que líquidos de estas rocas. Esta facies orgánica es la que representa el mayor potencial para generación de hidrocarburos en la Formación Cansona debido a que se encuentra ampliamente distribuida en la Formación y porque reúne las condiciones para generar hidrocarburos, mencionadas arriba. Las rocas que se encuentran en esta facies se encuentran al inicio de la ventana de generación y en el pico de generación en algunos casos.

REGISTRO GEOQUÍMICO CANTERA SAN CARLOS

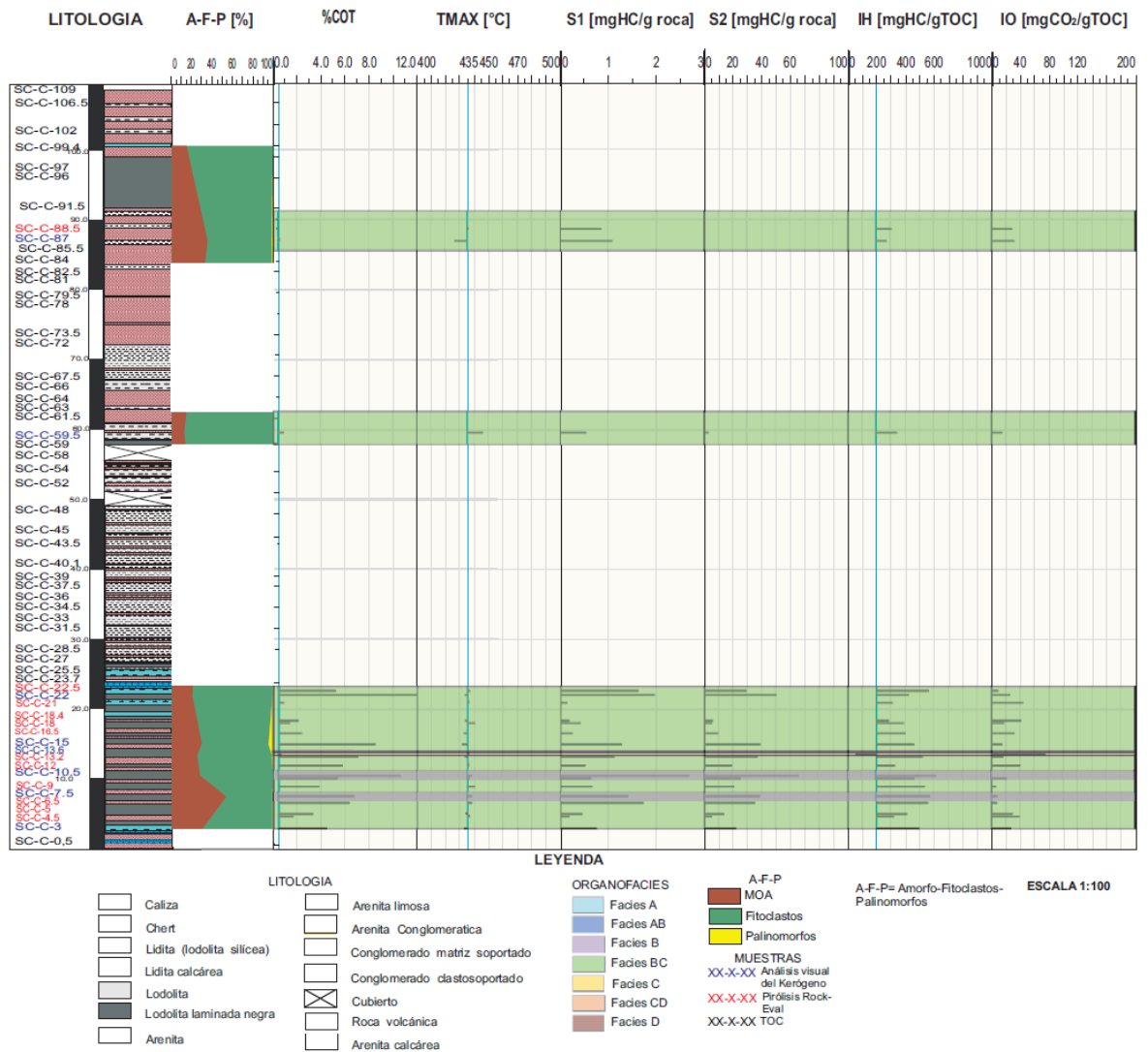


Figura 19. Facies orgánicas de la Formación Cansona en la sección Cantera San Carlos. En la columna de %COT 0,5% representa el corte para realizar pirolisis; en la columna de Tmax, la línea azul marca 435°C, mostrando cuales muestras se encuentran maduras y cuáles no.

REGISTRO GEOQUÍMICO CANTERA EL PURGATORIO

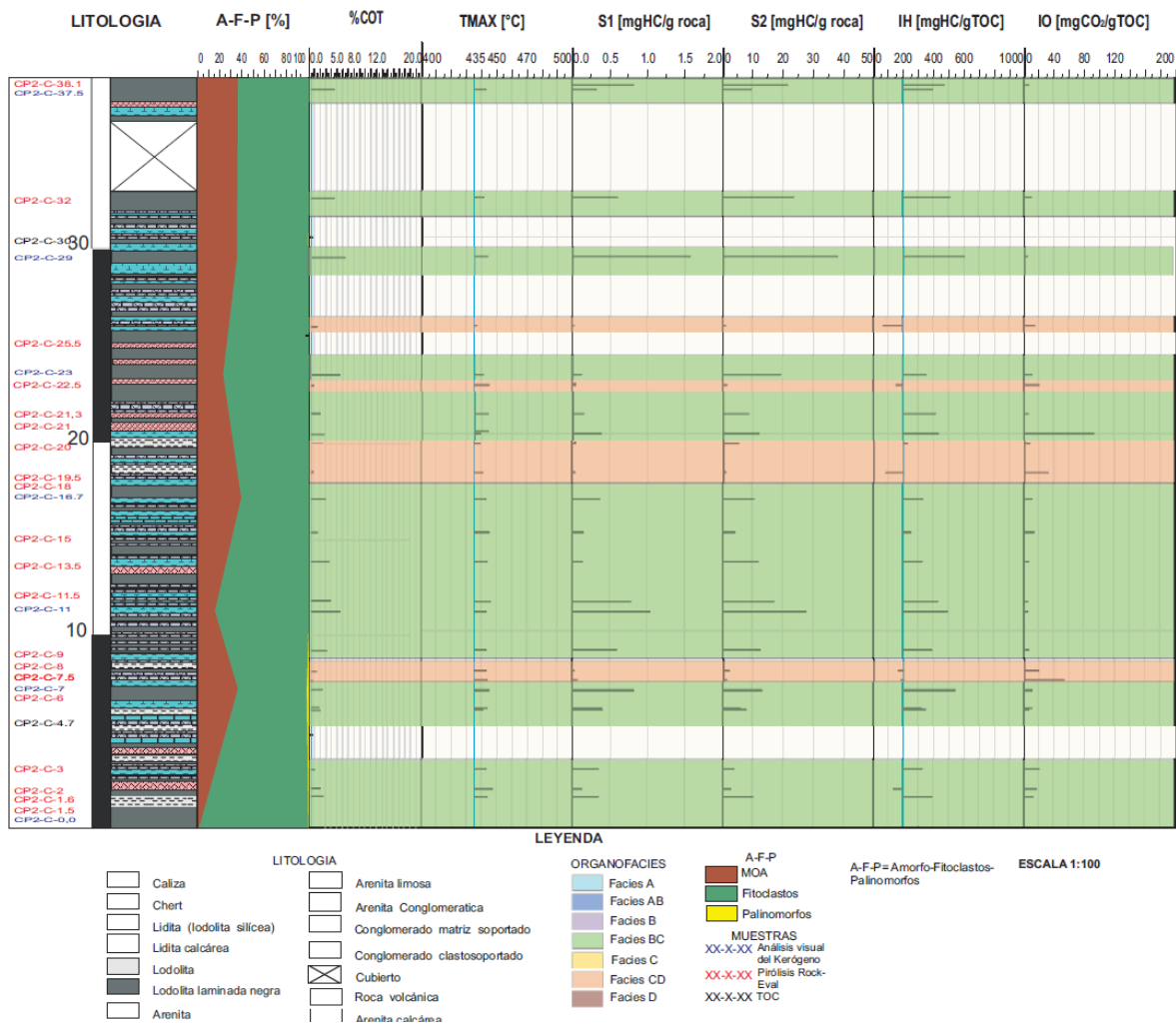


Figura 20. Facies orgánicas de la Formación Cansona en la sección Cantera El Purgatorio. En la columna de %COT 0,5% representa el corte para realizar pirólisis; en la columna de Tmax, la línea azul marca 435°C, mostrando cuales muestras se encuentran maduras y cuáles no.

5.3.3 Facies C. Esta facies es caracterizada por contenidos de carbono orgánico inferiores a 1% (0,52 a 0,85%wt); el IH varía de 100 a 148 mgHC/gTOC; mientras que los Índices de Oxígeno son muy bajos (no superan 35mgCO₂/gCOT (figura 22). Por su parte, el análisis visual del kerógeno refleja un alto contenido de fitoclastos amorfizados principalmente, seguido en abundancia de materia orgánica amorfa no fluorescente (laminas E.8, E.9 y E.10). Esta facies fue

encontrada en pequeños intervalos de la sección Cantera El Clan y en un intervalo muy reducido de la sección Cantera El Purgatorio. En cuanto al ambiente de depositación que se le atribuye a esta facies, es marino de plataforma, donde el suministro de oxígeno es alto, la tasa de sedimentación es alta, muy probablemente el ambiente que se le asocia a esta facies es deltaico. El kerógeno esperado de esta facies es tipo III, por lo tanto, las rocas pertenecientes a esta facies tienen potencial para generar gas, más que aceite.

5.3.4 Facies CD. Esta facies es la que representa el ambiente más proximal de la Formación Cansona. La facies CD fue encontrada en toda la sección Arroyo Peñitas y en la base de la Cantera El Clan (figuras 21 y 22), donde se caracteriza por presentar contenidos de %COT predominantemente inferiores a 1%, aunque hay algunas muestras que alcanzan hasta 1,69% (0,50 a 1,69%wt); los índices de Hidrógeno no superan 150mgHC/gCOT y los índices de Oxígeno en la sección Arroyo Peñitas son de 70 a 160mgCO₂/gCOT; por su parte los IO de la Formación Cansona en la Cantera El Clan son más bajos debido a que en esta sección tiene un grado de evolución termal mayor que en Arroyo Peñitas. El análisis visual del kerógeno en estas secciones muestra el más alto aporte de fitoclastos translucidos no bioestructurados en la Formación Cansona. La MOA es escasa en ambas secciones; mientras que el recobro de palinomorfos es bastante alto en Arroyo Peñitas y prácticamente nulo en Cantera El Clan. Gran cantidad de palinomorfos marinos fueron encontrados en la sección Arroyo Peñitas, esto indica que esta facies fue depositada en un ambiente marino de plataforma interna donde la influencia de un aporte fluvial es muy marcado debido a la abundancia de fitoclastos translucidos y palinomorfos continentales. Esta facies representa kerógeno tipo III/IV, lo que indica que tiene potencial para generar gas.

La figura 23 muestra la correlación de las facies orgánicas de la Formación Cansona (ver sección 5.1 para aclaraciones sobre la correlación). Como se observa, hacia la base se encuentran las facies BC y B, en las secciones Cantera San Carlos y Purgatorio, depositadas en un ambiente marino subóxico a disóxico;

mientras que hacia la parte media, se aprecia predominante la facies CD, característica de un ambiente marino transicional, con alto aporte de material terrígeno, en las secciones Cantera El Clan y Arroyo Peñitas. En el tope de la Formación Cansona se encuentra la facies orgánica de mejor calidad, representando un ambiente marino de aguas tranquilas en condiciones reductoras, encontrada en la sección Arroyo Columbita.

REGISTRO GEOQUÍMICO ARROYO PEÑITAS

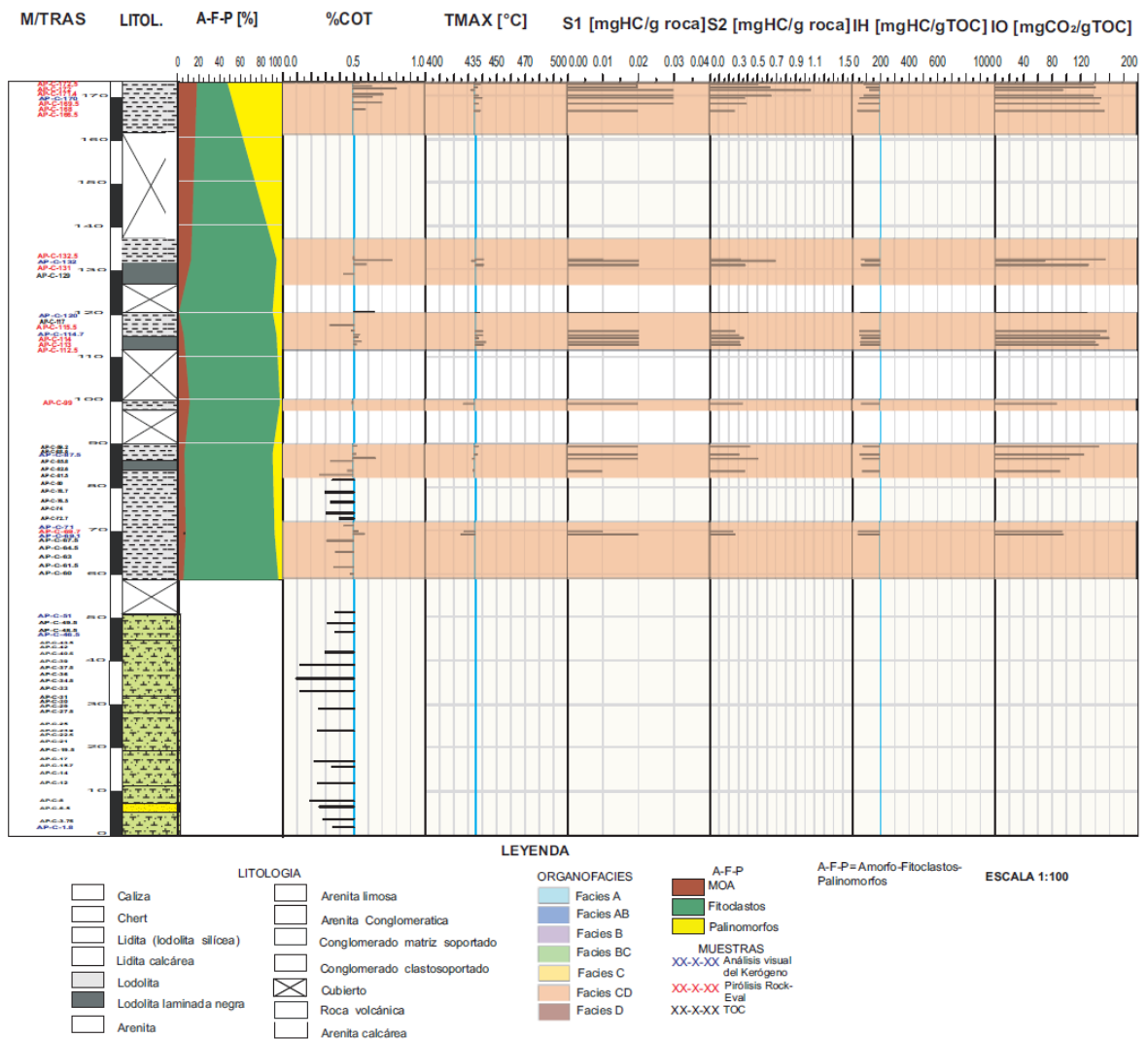


Figura 21. Facies orgánicas de la Formación Cansona en la sección Arroyo Peñitas. En la columna de %COT 0,5% representa el corte para

5.4 QUIMIOESTRATIGRAFÍA

Las secciones empleadas para el desarrollo de esta parte del proyecto fueron en primer lugar, la sección Cantera San Carlos, debido a que presenta los mejores contenidos de %COT y el mejor potencial de generación con base en los altos Índices de Hidrógeno y bajos de Oxígeno obtenidos a partir de la pirolisis hacia la base, mientras que la parte media y el tope de la sección la información geoquímica es muy baja; y la sección Arroyo Peñitas debido a que es la sección de mayor espesor y según trabajos anteriores (p. ej. ANH, 2009) esta es la sección que abarca la Formación Cansona de manera más completa.

Diversos autores (Lewan, 1984; Barwise, 1990; Akinlua et al, 2010, entre otros) han empleado una serie de relaciones entre algunos elementos traza presentes en las rocas para evaluar el ambiente de depositación, la procedencia de la materia orgánica y las condiciones de oxigenación del medio de las rocas generadoras, los cuales serán empleados en el presente trabajo. La herramienta de primer orden para identificar las quimiofacies en estas dos secciones es la estadística, por medio de clusters y los subsecuentes dendrogramas, a través de los cuales se agrupan los paquetes de roca que tengan las mismas propiedades.

El análisis de los elementos traza, más que de los mayores, brinda una herramienta muy importante en la determinación del ambiente de depositación de una secuencia rocosa debido a que ellos "(Ba, P, V, MO, Ni, Co, Cu, Cd, Cr y Mn), en rocas ricas en materia orgánica, sirven como marcadores paleoambientales" Mongenot et al., (1995). Altos contenidos de Ba, Cd y P se encuentran relacionados con una alta productividad primaria durante la depositación (Mongenot et al., 1994). Elementos como Co, Ni, V y Mo son denominados elementos biófilos, esto es que estos elementos se presentan naturalmente en organismos vivos o en materia orgánica, es por esto que son de gran importancia a la hora de establecer condiciones de oxigenación y origen de la materia orgánica contenida en las rocas. Para evaluar estas condiciones se emplean una serie de

relaciones como la V/Ni, de acuerdo con Barwise (1990), el tipo de roca generadora y el ambiente de depositación tienen un profundo efecto en las concentraciones de V y Ni en las rocas generadoras. Al evaluar esta relación se reflejan los regímenes de oxígeno del medio; cuando esta relación es superior a 3, indica de que la roca generadora fue depositada en un ambiente muy reductor (Galarraga et al. (2008) en Akinlua et al (2010)). La relación Co/Ni, de acuerdo con Udo et al. (1992), si es superior a 0,1 es indicativa de una roca generadora con suministro de materia orgánica marina. Por último, la relación Mo/Ni es de gran importancia también, el Molibdeno es conocido por ser un indicador paleoambiental muy útil, las concentraciones de Mo aumentan con el aumento de las condiciones anóxicas, y su relación con el Níquel muestra una correlación con la relación Co/Ni, encontrándose que un aumento en la relación Mo/Ni sugiere un aumento en la materia orgánica marina. Por su parte, “elementos como el Manganeseo son susceptibles a condiciones redox. Cuando los sedimentos son sometidos a condiciones reductoras, elementos como el Manganeseo puede ser solubilizado y migrado hacia arriba, de regreso a la columna de agua. Así, shales carbonosos se encuentran empobrecidos en Mn en comparación con shales marinos normales” (Mongenot et al., 1996). La tabla 14 presenta las concentraciones típicas de Mn y Fe para algunos tipos de roca.

Otra serie de relaciones entre elementos traza como es el caso de V/Cr también reflejan el suministro de oxígeno en el momento de la depositación. Un valor comprendido entre 2 y 4,25 refleja condiciones disóxicas de acuerdo con Jones y Manning (1994). Valores de esta relación por debajo de 2 se consideran condiciones óxicas.

5.4.1 Sección Arroyo Peñitas. Para analizar la composición de las muestras analizadas, primero se estudiaron los elementos mayores en las rocas, como es de esperarse, el Sílice en esta secuencia es predominante (52 a 88% en peso), le siguen en concentración el Aluminio (3,22 a 10,93% en peso) y el Hierro (1,87 a

7,1% en peso). La abundancia de hierro en las rocas sugiere la existencia de un medio oxidante.

<i>tipo de roca</i>	Mn (ppm)	Fe (ppm)	Mn/Fe
Tipos de rocas y aguas			
Basalto	1550	83000	0,019
Granito	390	21100	0,018
Shale	730	50000	0,015
Black shale	325	65300	0,005
Areniscas	850	35000	0,024
Calizas	420	9500	0,044
Sedimentos oceánicos	2700	36000	0,075
Agua de río	0,0082	0,04	0,21
Agua de mar	7,20E-05	2,50E-04	0,35

Tabla 14. Tabla de las concentraciones promedio de los elementos Mn y Fe y la relación Mn/Fe. Tomado de Li (2000) en Mackenzie (2005).

Al evaluar la relación V/Ni, esta oscila entre 1,70 y 2,07, siendo mayor hacia el tope de la sección (a partir de la muestra 114,7) (figura 24), lo que significa que la secuencia se depositó en un ambiente subóxico y que los niveles de oxígeno disminuyen hacia el tope de la secuencia. Por su parte, la relación Co/Ni oscila entre 0,15 y 0,24, mostrando el aporte de materia orgánica de origen marino en la secuencia, lo cual fue observado al realizar el análisis visual del kerógeno de esta sección. De nuevo se observa un cambio, aunque sutil, por encima de los 110 metros de la columna estratigráfica, a partir del cual, el aporte de materia orgánica marina es sutilmente mayor y las condiciones en cuanto al suministro de oxígeno muestran una disminución en tal elemento. Al evaluar la relación V/Cr, el valor menor es 0 y el mayor es 1,2, siendo en promedio 1,01, de acuerdo con lo mencionado arriba, los sedimentos depositados en esta secuencia estuvieron sometidos a un régimen de oxígeno relativamente alto, lo cual confirma el resultado de la relación V/Ni. La abundancia de Mn a lo largo de la columna

sedimentaria, sobre todo por debajo de 12,5 m, confirma la presencia un ambiente oxidante. Por último, las bajas concentraciones de azufre y COT (figura 25) a lo largo de toda la columna indica la depositación en un medio no marino a marino normal (Berner, 1982), como marino normal se entiende sedimentos depositados en un ambiente marino de aguas óxicas donde la salinidad es típica (3 al 5%wt), oxidante poco propicio para la acumulación de materia orgánica, adicionalmente, el poco suministro de materia orgánica marina mostrada tanto en el análisis visual del kerógeno como por la relación CO/Ni, sugiere un ambiente marino altamente proximal.

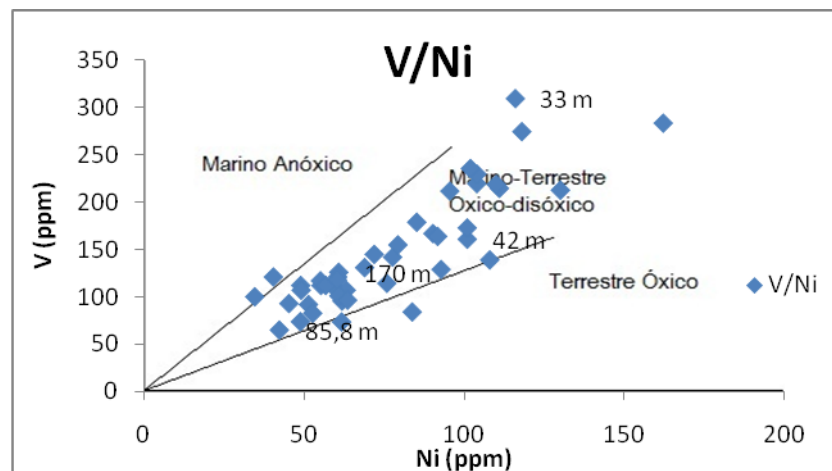


Figura 24. Relación Vanadio-Níquel para las muestras de la sección Arroyo Peñitas. La etiqueta representa el espesor al cual fue tomada la muestra.

5.4.1.1 Azufre total y orgánico. El contenido de S, al igual que el %COT, es muy bajo en toda la secuencia, siendo los mayores valores de S de 0,7%wt. La figura 26 presenta el diagrama S/C para las muestras de la sección Arroyo Peñitas, donde el Azufre calculado es total, tal diagrama muestra un ambiente de depositación predominantemente no marino (figura 25). El S orgánico es muy bajo a nulo.

Fueron identificadas cinco quimiofacies en estas secciones con base en los elementos traza (V, Mo, Ni, Cr, Cs, Cu, Pb, U, Ba) y algunos elementos mayores como Si, Al, Mn, Ti y P, además con ayuda de algunas relaciones entre tales

elementos traza. A continuación se describen las facies desde la base hacia el tope. La agrupación de los datos en cluster modo R fue hecha por el método paired group, sin restricción estratigráfica. Al crear los cluster en modo Q (figura 26) se observa que elementos como el V, Cr, Ti, Fe y Mg se encuentran asociados, lo que podría indicar a las rocas fuentes de sedimentos como de origen máfico. El %COT y el Mo, así como el Ba, Pb y S se encuentran asociados, lo que indica que estos elementos se asocian al ambiente de deposición de los sedimentos.

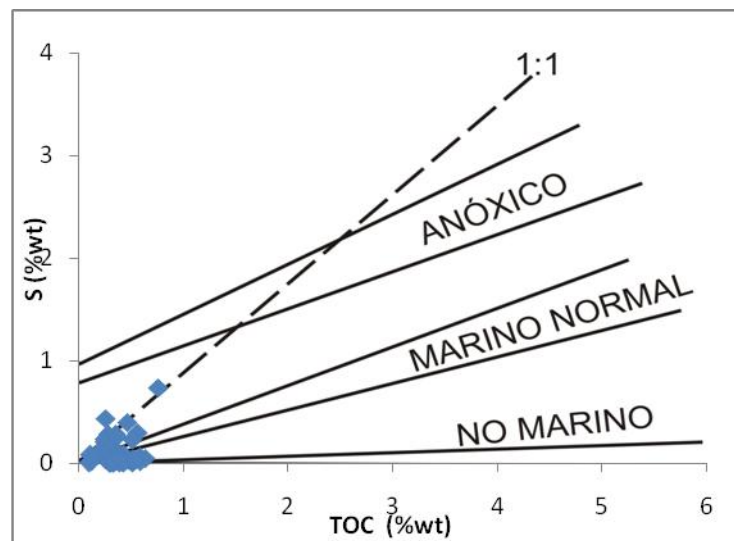


Figura 25. Diagrama S/C para la sección Arroyo Peñitas, para evaluar las condiciones redox durante la deposición. El azufre calculado aquí es en roca total.

5.4.1.1 Quimiofacies 1. Esta facies alcanza un espesor de 36 metros, y es caracterizada por una litología monótona, predominantemente areniscas ligeramente calcáreas, tales areniscas presentan los %COT más bajos, al igual que los contenidos de S (0,02-0,24%); los mayores contenidos de Mn se encuentran en esta quimiofacies, lo que indica el mayor nivel de oxígeno en la secuencia. Elementos como el Cs y el Cu se encuentran empobrecidos en esta quimiofacies, mientras que el Ti se presenta abundante (figura 27). El contenido de V no excede 400 ppm (0,04%wt) a lo largo de toda la columna; el Ni tiene

concentraciones medias (hasta 162 ppm) con respecto al valor máximo (400 ppm). En esta quimiofacies se observa altas concentraciones de Mn, característico de las areniscas, este enriquecimiento es debido a la presencia de oxígeno durante la depositación. En general, la quimiofacies 1 se interpreta como depositada en un ambiente altamente óxico, con suministro bajo de materia orgánica. Esta facies presenta las concentraciones más bajas de sílice en la columna, lo cual es correspondiente con la litología, que consiste de areniscas calcáreas.

5.4.1.2 Quimiofacies 2. Esta facies representa la transición entre la quimiofacies 1, constituida por las areniscas calcáreas y la quimiofacies 3, constituida por shales. Esta quimiofacies es caracterizada por un aumento marcado en las concentraciones de elementos trazas como el Cs y el Pb, así como el %COT; mientras que se nota la disminución de elementos como el V, Cr y un poco el Ni (figura 27). Elementos mayores como el Fe, Ca, Mn y Ti se encuentran disminuidos en esta quimiofacies con relación a la facies anterior.

5.4.1.3 Quimiofacies 3. Esta facies litológicamente está compuesta por intercalaciones de shale y lodolitas silíceas en una secuencia muy monótona. El COT de esta facies es mayor que las quimiofacies 1 y 2, y se mantiene en las facies superiores, haciéndose mayor de 0,5%wt. El S presenta altos contenidos, aunque variables con la estratigrafía. Elementos como el Si se encuentra enriquecido en esta facies, a diferencia de la quimiofacies 1, que muestra unas concentraciones relativamente bajas de Si. El Mn es en promedio 172 ppm, muy por debajo de los contenidos promedio de un shale, este empobrecimiento muestra un ambiente más reductor que el anterior (figura 27). En esta facies, el hierro disminuye su concentración de una manera marcada. Esta facies es correspondiente con la organofacies CD, que fue identificada para este segmento. Tal organofacies refleja un ambiente marino con un alto aporte de sedimentos continentales; la cual correlaciona muy bien con la quimiofacies 2, que muestra un aporte de materia orgánica marina, evidenciado por la relación Co/Ni mayor a 1; aunque el ambiente de depositación es altamente oxidante, que se refleja tanto en

los IH y en el análisis visual del kerógeno, como en la relación V/Ni, que es menor de 3; el alto contenido de Fe y los bajos contenidos de S (figuras 27). A la altura de 131 metros, el S alcanza su máxima concentración a lo largo de la secuencia.

5.4.1.4 Quimiofacies 4. Esta quimiofacies se caracteriza por presentar un leve aumento en Si. El K se presenta en concentraciones de más de 1%wt. El cobalto alcanza hasta 12 ppm; el V se presenta en altas concentraciones (82 a 121 ppm); el S se presenta a nivel de trazas, hacia el tope de esta facies, se encuentra el contenido más alto de toda la columna. El Mn alcanza hasta 270 ppm, lo cual es bajo en comparación con las facies inferiores. El Ni alcanza hasta 60 ppm (figura 27). La relación V/Ni, al igual que en las facies anteriores muestra un ambiente oxidante; y la relación Co/Ni refleja el aporte de materia orgánica de origen marino, lo cual se interpreta como un ambiente de depositación marino, donde el aporte de oxígeno es alto.

5.4.1.5 Quimiofacies 5. Esta última quimiofacies presenta un aumento en la concentración de Si, Co, Cs, Ni; mientras que hay una disminución en el contenido de Mo, Pb, Cr, V, Al y Ca; elementos como Fe, Mn, Mg y Ti permanecen casi constantes en esta facies con relación a la anterior (figura 287). Las relaciones Co/Ni y V/Ni son más altas que en las demás quimiofacies, hasta 0,24 para Co/Ni, lo que indica un mayor aporte de materia orgánica marina, que es evidente en el análisis visual del kerógeno; y hasta 2,3 para V/Ni, que indica un ambiente disódico.

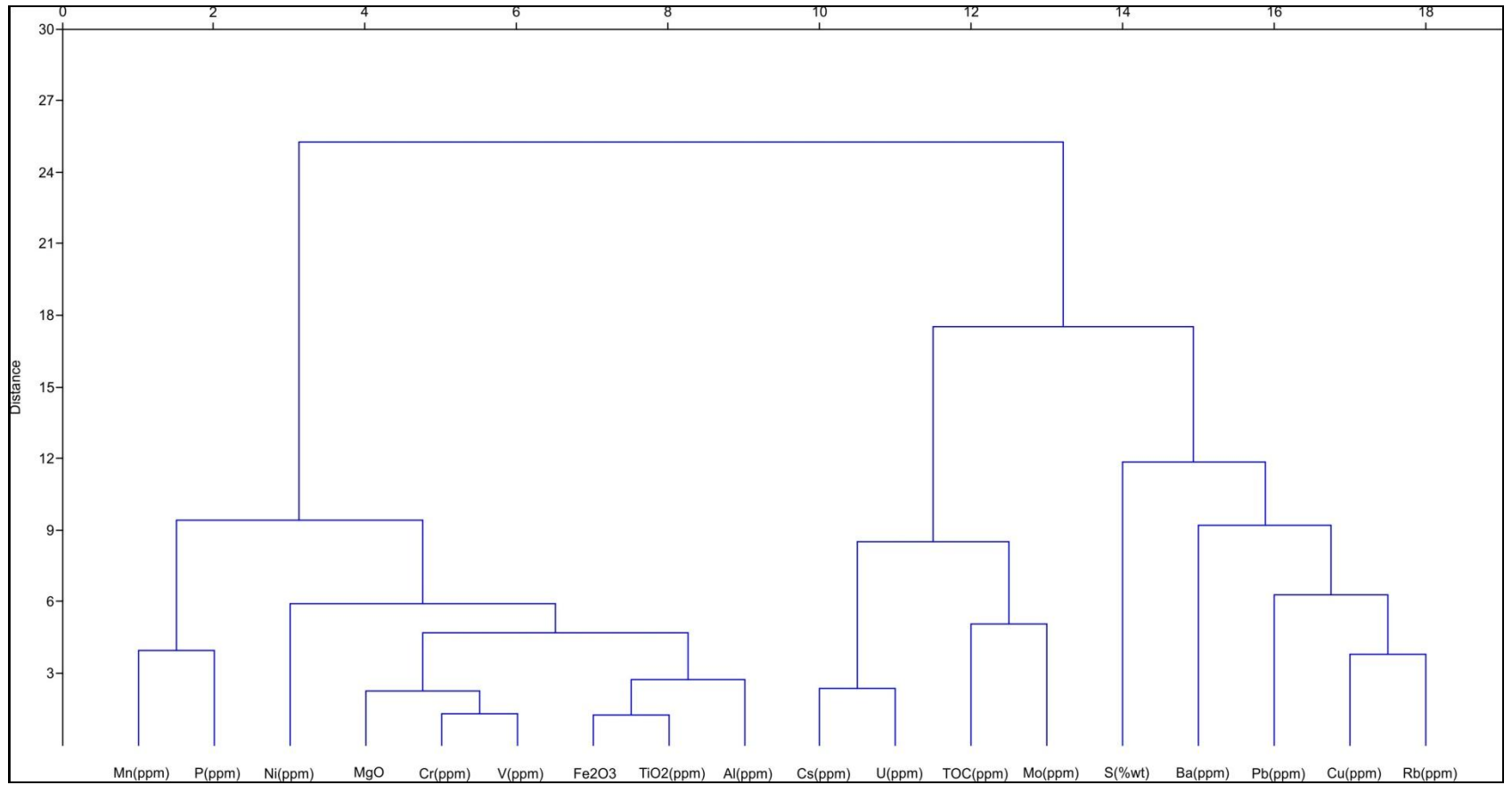


Figura 26. Cluster modo Q de la sección Arroyo Peñitas.

QUIMIOFACIES SECCION ARROYO PEÑITAS

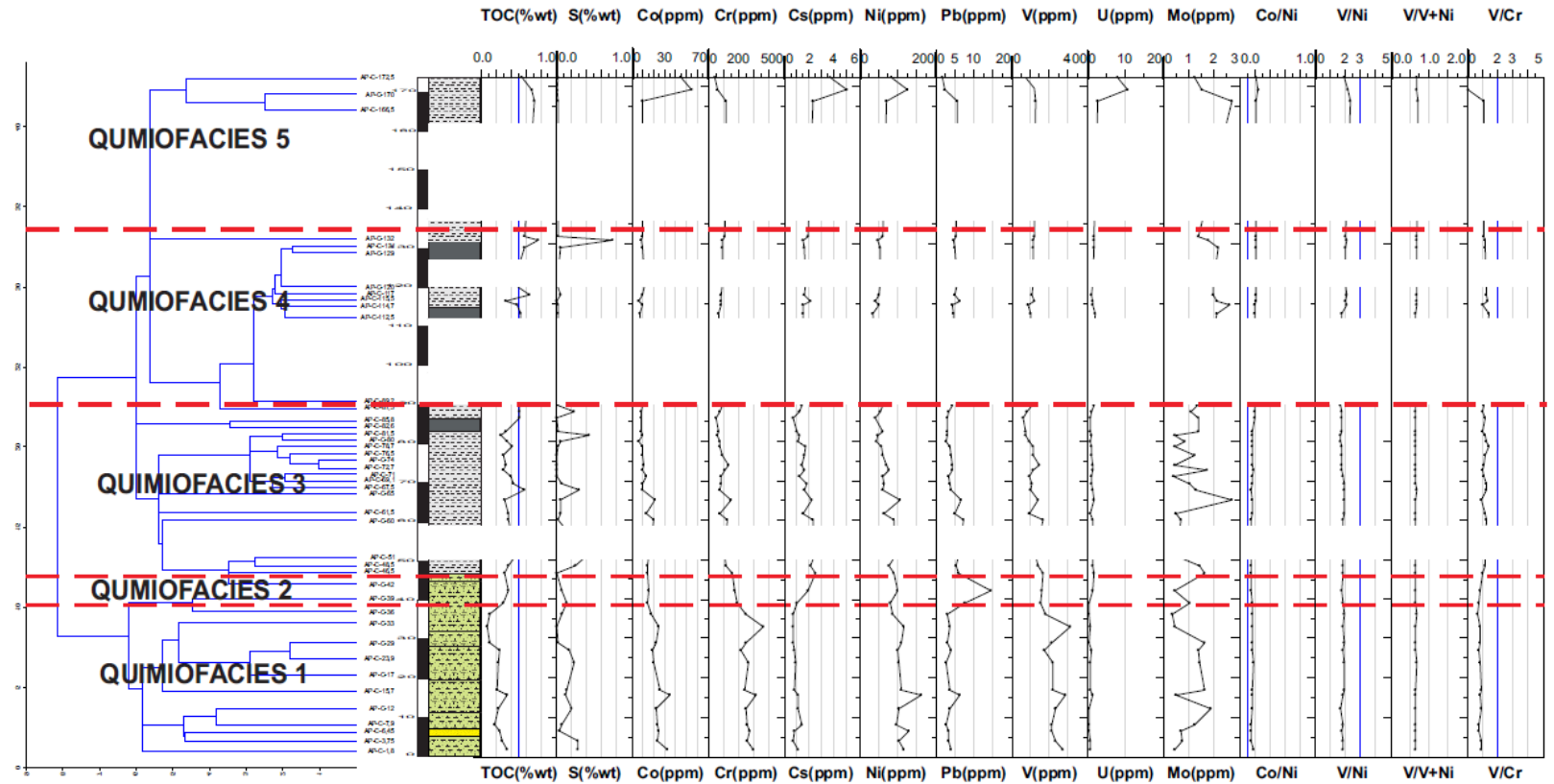


Figura 27. Quimiofacies delimitadas a partir de los elementos traza, %COT, S, Si, Al y Mn de la Formación Cansona en la sección Arroyo Peñitas.

5.4.2 Sección Cantera San Carlos. En esta sección, la Formación Cansona muestra unas variaciones marcadas entre un segmento y otro, evidenciándose el cambio facial, tanto en las quimiofacies como en las litofacies. La distribución de los elementos traza en esta sección es contrastante con la distribución en la sección Arroyo Peñitas.

5.4.2.1 Azufre total y orgánico. El Azufre en la sección San Carlos se encuentra en mayor abundancia hacia el segmento donde es mayor el %COT(figura 28), como se observa en la figura, a altos %COT, se tienen altos valores de S en las rocas, especialmente en la muestra SC-C-22, la cual tiene un S de 2,55%wt, con un %COT de 11,97%wt. Las muestras del segmento inferior tienen los contenidos de %S más altos, mientras que los segmentos superiores, los cuales tienen %COT inferiores a 1%wt, tienen contenidos de %S muy bajos, casi a nivel de trazas ($\leq 0,1\%wt$).

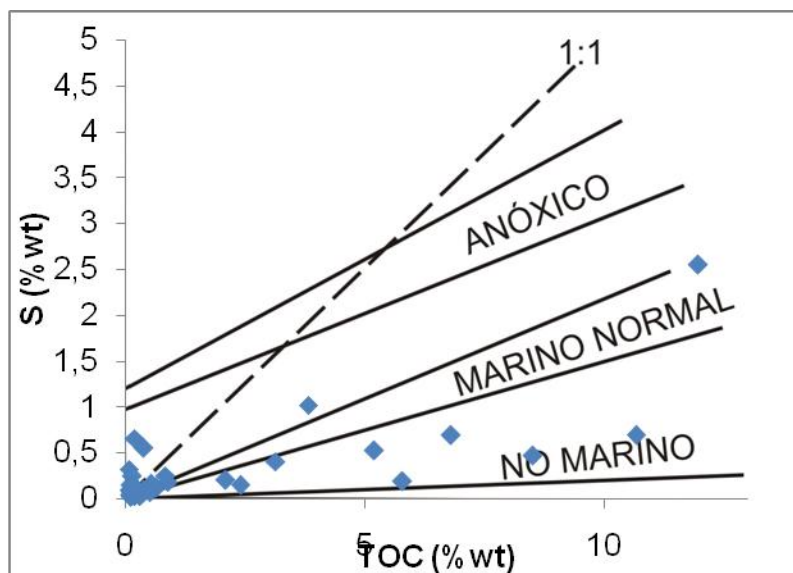


Figura 28. Diagrama S/C para la sección Cantera San Carlos, para evaluar las condiciones redox durante la depositación. El azufre calculado aquí es en roca total.

5.4.2.2 Quimiofacies 1. Representa la facies con mayor %COT, el S es significativamente mayor que en las facies superiores. En esta quimiofacies es evidente un enriquecimiento de los elementos V, Ni y Cr (figura 29), que como fue

mencionado previamente, son elementos que se relacionan con altos contenidos de materia orgánica, como se nota en la figura, estos enriquecimientos son marcados donde el %COT es más alto. Sin embargo, tales enriquecimientos, especialmente en V, son anómalos (concentraciones de hasta 3000 ppm) y podrían deberse tanto al aporte de materia orgánica durante la depositación, como a las rocas fuentes de los sedimentos, por lo tanto se sugieren posteriores investigaciones en este tema. Esta facies además presenta altos contenidos de azufre total (hasta más de 2% donde el %COT es excelente). La relación V/Ni no es constante, sino que muestra variaciones estratigráficas (figura 30), mostrando la existencia de un ambiente con oscilaciones en el nivel del mar, variando de disódico a muy anódico (hasta 10). La relación Co/Ni muestra un bajo suministro de materia orgánica de origen marino, con ciertas variaciones, verticales, especialmente en la muestra 13,6 la cual mostró presencia de MOA de origen marino. Donde el %COT, V y %S son más altos, el contenido de Mn es bajo a casi nulo.

5.4.2.3 Quimiofacies 2. Esta quimiofacies presenta empobrecimiento en la mayoría de los elementos traza, elementos como S, V, Ni y Al son los más bajos de toda la sección, mientras que el contenido de Mn es relativamente alto (figura 29 y 30). Esta quimiofacies está constituida litológicamente por intercalaciones de Chert y shale síliceo, lo que se hace notorio en las elevadas concentraciones de Si; mientras que el Al se encuentra en bajas concentraciones. El Si oscila entre 28 y 96 %wt; las concentraciones de Al son las más bajas, al igual que el Fe y el Mn. En cuanto a las relaciones de elementos trazas; la relación V/Ni se encuentra muy por debajo de tres, lo que indica condiciones oxidantes; hacia la base de esta facies, la relación Co/Ni es menor de 0,1 y aumenta progresivamente hacia el tope; la relación Mo/Ni. Esta quimiofacies se interpreta como depositada en un ambiente donde el suministro de oxígeno fue muy alto y el contenido de materia orgánica aumenta hacia el tope de ella, indicando un pequeño aumento del nivel del mar.

5.4.2.4 Quimiofacies 3. Comprende un segmento de aproximadamente 20 metros de espesor constituido predominantemente por chert intercalado con shale. Se caracteriza, al igual que la anterior por presentar %COT y S muy bajos, adicionalmente, el contenido de Fe alcanza hasta el 3%wt, elementos como el Ti, Co, Ni, V y U se encuentran altamente empobrecidos. La relación Co/Ni superior a 0,1 refleja el aporte de materia orgánica de origen marino y la relación V/Ni tan baja refleja las condiciones altamente oxidantes en un ambiente marino.

5.4.2.5 Quimiofacies 4. Se caracteriza por presentar empobrecimiento de la mayoría de los elementos analizados, a excepción del Si, que se encuentra hasta en un 99% wt debido a la litología predominante en esta quimiofacies que es el chert. La relación Co/Ni evidencia una disminución en el aporte de materia orgánica marina; y la relación V/Ni se presenta menor a 3, mostrando unas condiciones disóxicas.

5.4.2.6 Quimiofacies 5. Este segmento de roca es particularmente diferente a los anteriores debido a que consiste de lodolitas de color rojo. Este segmento es pobre en %COT, S, Si, V, U y Mo, pero por otra parte, presenta muy altas concentraciones de Mn, Cs, Pb, Fe, Al, Mg, Mn y Ti (figuras 29 y 30). Al evaluar la relación V/Ni se nota un ambiente de depositación altamente oxidante. La interpretación que se puede hacer sobre esta facies es que es un ambiente marino proximal a continental donde la exposición al aire causa oxidación produciendo tonalidades rojizas en las rocas. La relación Co/Ni refleja la presencia de materia orgánica de origen marino.

5.4.2.7 Quimiofacies 6. En esta última facies el Si aumenta otra vez, mientras que elementos como Fe (promedio de 1,5%wt), Al, Mn (hasta 0,2%wt), Mg disminuyen sus concentraciones, al igual que elementos traza como el V, Ni, U y Mo. La relación Co/Ni (0,17 en promedio) muestra aporte de materia orgánica marina; mientras que la relación V/Ni indica un ambiente disóxico.

ELEMENTOS TRAZA EN LA FORMACIÓN CANSONA-SECCIÓN CANTERA SAN CARLOS

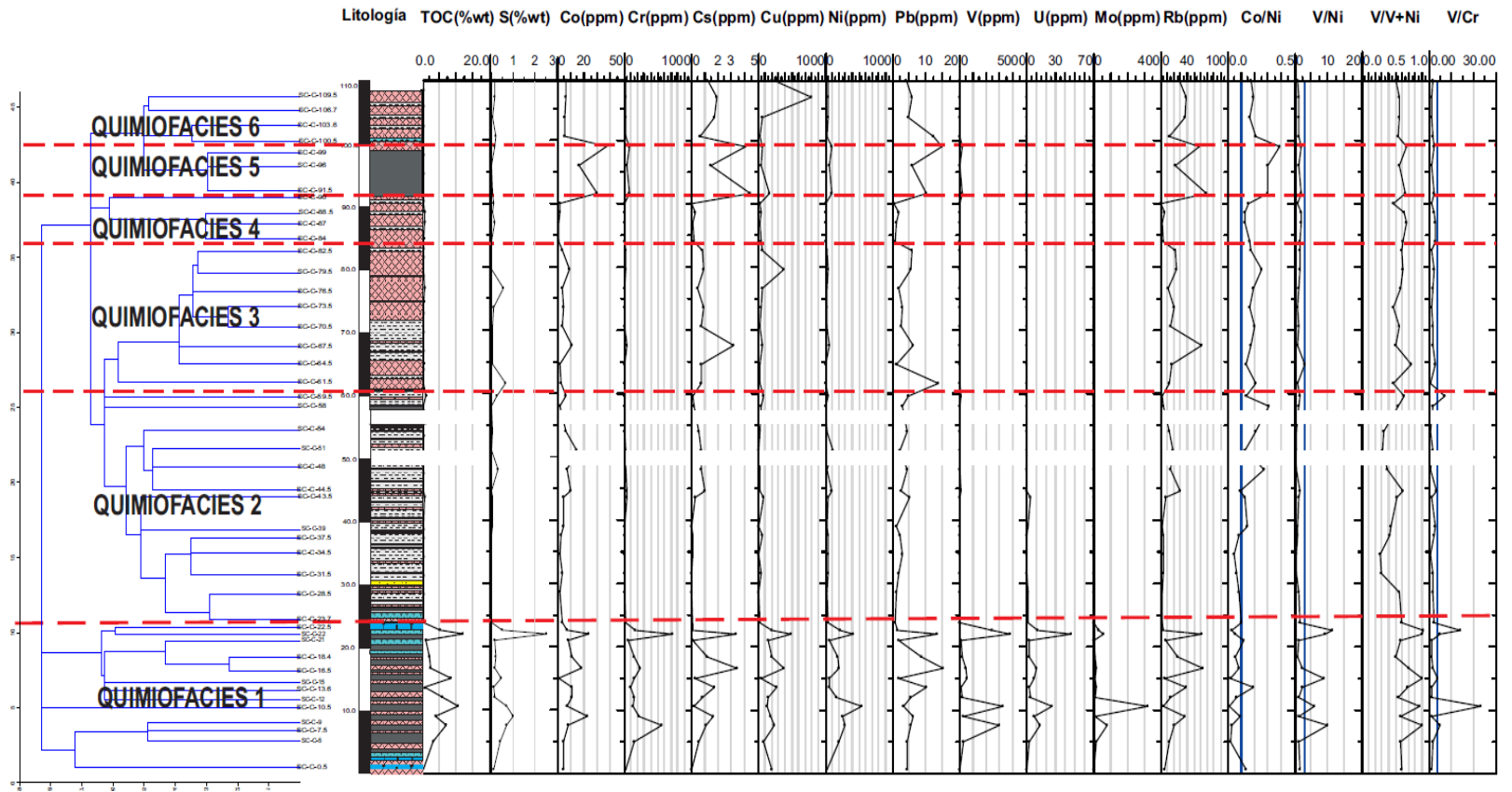


Figura 29. Quimiofacies de la Formación Cansona en la sección Cantera San Carlos, acompañado por los perfiles de los elementos trazas.

ELEMENTOS MAYORES DE LA FORMACIÓN CANSONA EN LA SECCIÓN CANTERA SAN CARLOS

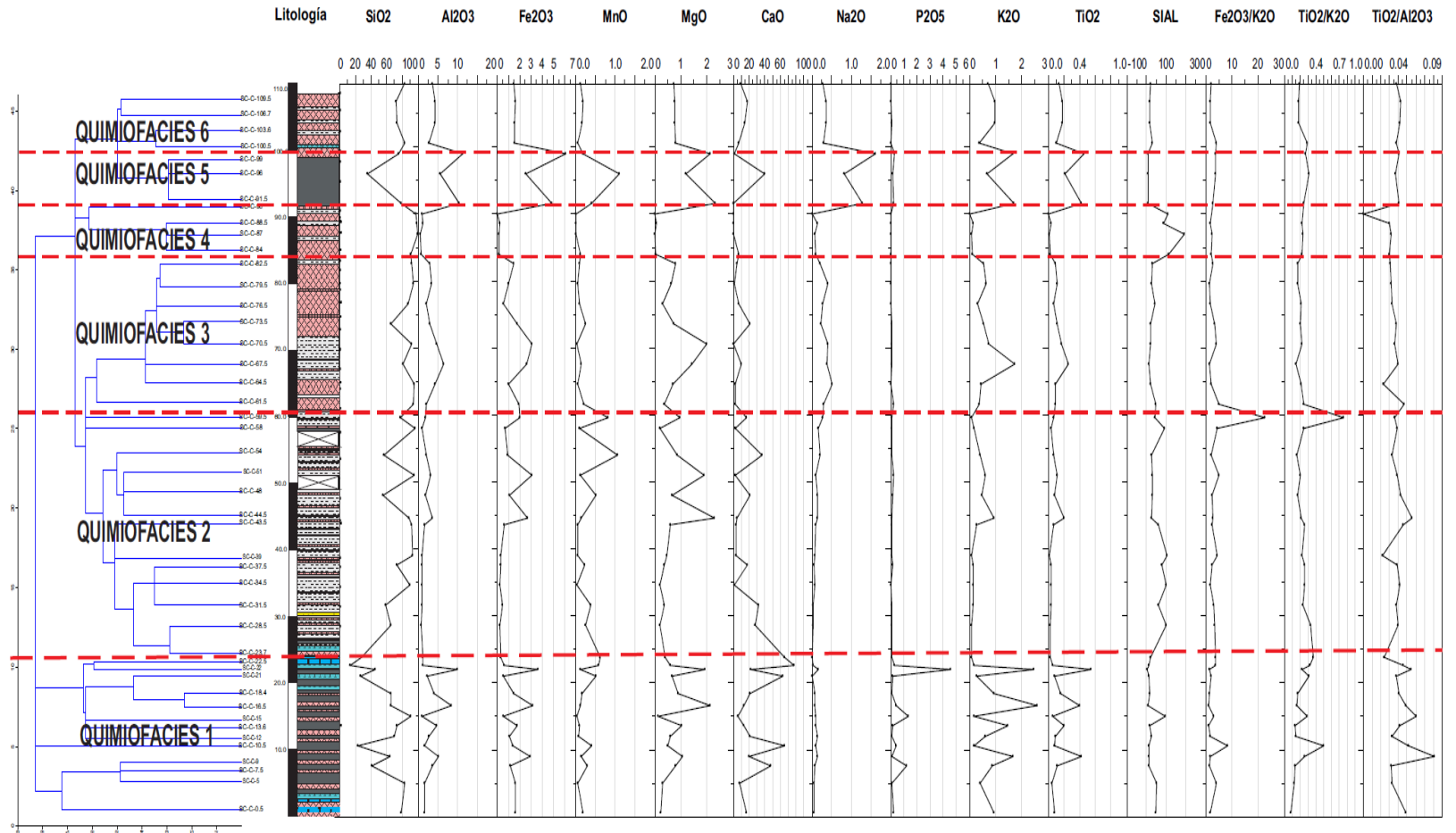


Figura 30. Quimiofacies de la Formación Cansona en la sección Cantera San Carlos, acompañado por los perfiles de los elementos mayores.

5.5 CORRESPONDENCIA ENTRE ORGANOFACIES Y QUIMIOFACIES

Para el caso de la sección Arroyo Peñitas, debido a que en los primeros 69 metros de columna estratigráfica no se obtuvieron buenos %COT (menores a 1%), y por lo tanto, no se tienen resultados de pirolisis, no fue posible identificar las organofacies, sin embargo, con la ayuda de las quimiofacies identificadas fue determinado el ambiente de depositación para la secuencia completa.

La quimiofacies 1 indica un ambiente marino de energía moderada, debido a la secuencia espesa de areniscas calcáreas, donde el suministro de oxígeno fue muy alto y el suministro de materia orgánica fue bajo. Por su parte, la quimiofacies 2 representa una transición entre un ambiente de energía moderada a uno de aguas más tranquilas. La quimiofacies 3 es correspondiente con la organofacies CD debido a los bajos valores de la relación V/Ni y Co/Ni, además por las bajas concentraciones de TOC, S y Ni. La quimiofacies 4 refleja aporte de materia orgánica de origen marino, lo cual se interpreta como un ambiente de depositación marino, en condiciones subóxica a disóxica, esta quimiofacies refleja condiciones similares a la facies CD en este mismo intervalo. Por último, la quimiofacies 5 refleja condiciones menos oxidantes que las cuatro facies anteriores, lo que no se muestra tan claramente con las organofacies (figuras 27 y 31).

En cuanto a la sección Cantera San Carlos, se observa una clara correspondencia en el intervalo de 0 a 22,5 metros, donde se aprecia claramente la organofacies BC predominantemente, con pequeños segmentos de la organofacies B; esta organofacies es comparable con la quimiofacies 1 (figura 31), esta muestra altas concentraciones de elementos como V, Ni, Co y bajas concentraciones de Mn, reflejando un ambiente de depositación marino en condiciones subóxicas a anóxicas, como el caso de la muestra SC-C-22. La quimiofacies 2 complementa la descripción del ambiente debido a que en el segmento de 22,5 a 59,5 metros no hubo resultado de pirolisis. Esta quimiofacies representa un ambiente de depósito marino, donde el suministro de oxígeno fue muy alto, con pequeñas fluctuaciones

en el nivel del mar. A la altura de 59,5 metros se identifica la facies orgánica BC, con un espesor de 3 metros, a la que se le atribuye un ambiente de depositación marino con alto suministro de materia orgánica marina, esta organofacies es posible ampliarla con la ayuda de la quimiofacies 3, que refleja el aporte de materia orgánica de origen marino, depositadas en un ambiente marino de plataforma somera bajo condiciones altamente oxidantes, esta quimiofacies abarca aproximadamente 20 metros de espesor.

La quimiofacies 4 evidencia la disminución en el aporte de materia orgánica marina; y la relación V/Ni se presenta menor a 3, reflejando condiciones disóxicas, la cual es correspondiente con la organofacies BC identificada para el mismo segmento. La quimiofacies 5 (90 a 99 metros) refleja un ambiente de depositación altamente oxidante, posiblemente continental. Este segmento tuvo COT menores a 0,5%wt, por lo tanto no fue posible identificar organofacies en este segmento. La última quimiofacies (quimiofacies 6), refleja un aumento significativo en el nivel del mar, dando lugar a condiciones disóxicas.

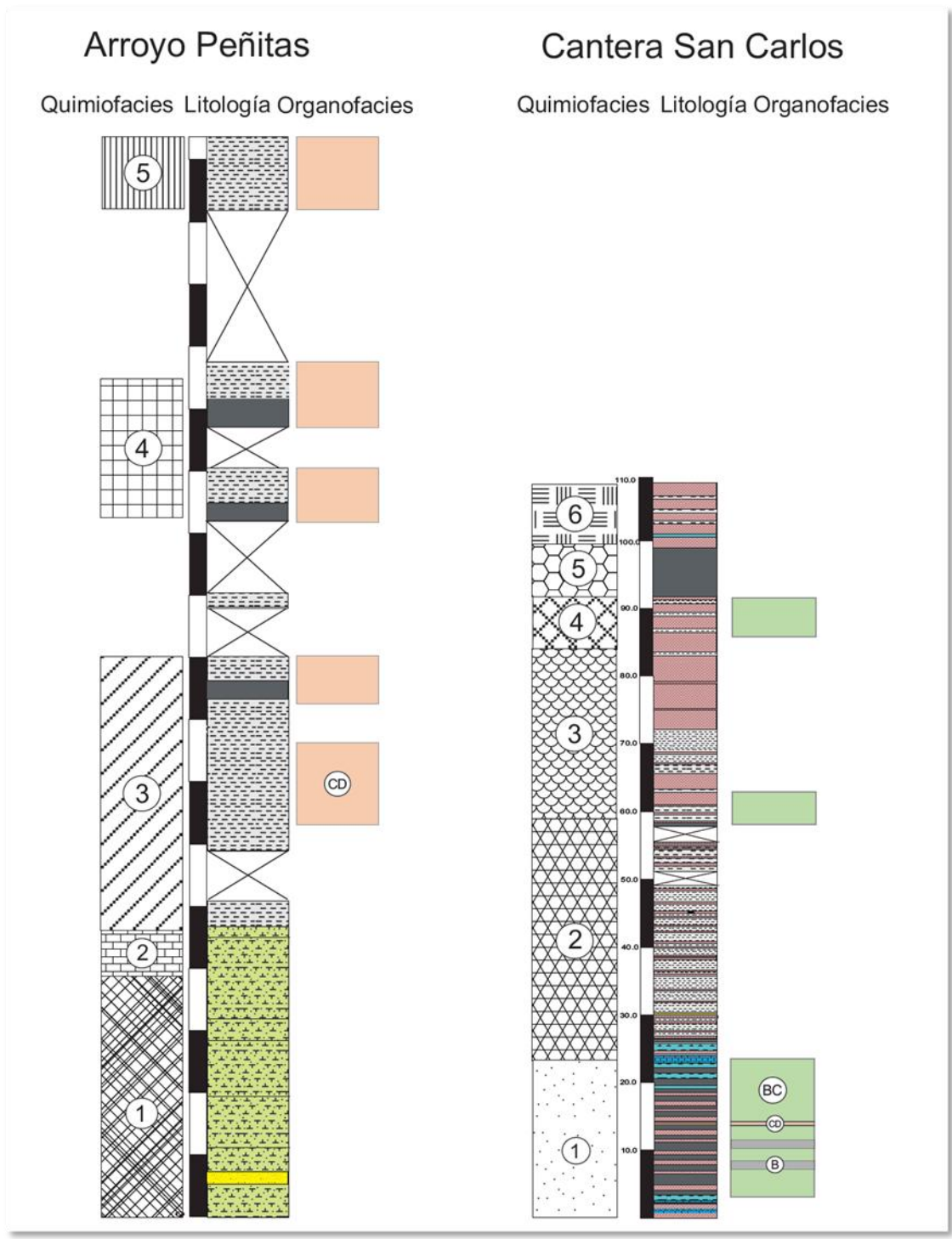


Figura 31. Comparación entre las facies orgánicas y las quimiofacies de la Formación Canzona en las secciones Arroyo Peñitas y Cantera San Carlos.

5.6 DISTRIBUCIÓN DE LOS AMBIENTES DE DEPOSITACIÓN

La Formación Cansona, con base en la distribución de la materia orgánica y la composición elemental en las secciones estudiadas fue depositada en un ambiente de marino de plataforma a transicional. Las facies más distales se ubican en la sección Arroyo Columbita (figura 24), la cual presenta materia orgánica característica de un ambiente de depositación marino de aguas tranquilas altamente reductor, que se ubica estratigráficamente hacia el tope de la Formación Cansona. En la sección Cantera San Carlos, el ambiente es de plataforma intermedia a interna hacia la base, mientras que desde la parte media se marca una disminución en el nivel del mar, identificada por la disminución de elementos como el V y Ni (figuras 19 y 29); en la sección Cantera Purgatorio se deduce una disminución progresiva en el nivel del mar y aumento en el suministro de materia terrígena, debido al mayor suministro de fitoclastos en comparación con la anterior sección San Carlos, en cuanto a la posición estratigráfica de este ambiente, se ubica tentativamente hacia la base o parte media de la Formación Cansona. En los sectores de Arroyo Peñitas y Cantera El Clan la Formación Cansona se aproxima a un ambiente transicional (figura 24) de alta energía donde la presencia de una fuente fluvial de los sedimentos y la materia orgánica es evidente. Entre estas dos secciones, el ambiente más proximal es representado en la sección Cantera El Clan ya que la litología de este segmento, que se constituye de intercalaciones de shale y areniscas de grano fino y la ausencia de dinoflagelados sugiere la depositación en un ambiente deltaico; mientras que Arroyo Peñitas presenta mayor recobro de palinomorfos marinos y continentales, indicando que la materia orgánica ha tenido un poco mas de transporte hacia el mar, de lo cual se interpreta un ambiente de prodelta hacia el tope de la sección, mientras que hacia la base, que consiste de areniscas de grano fino levemente calcáreas, se le atribuye un ambiente de línea de costa.

Es importante tener en cuenta que la Formación Cansona no tiene abundantes afloramientos en la Cuenca y los sets de fallas de cabalgamiento localizados en dirección SW-NE separa sectores depositados en ambientes similares, lo que hace pensar que la tectónica de la zona haya tenido gran influencia en la distribución de los ambientes de deposición (figura 32).

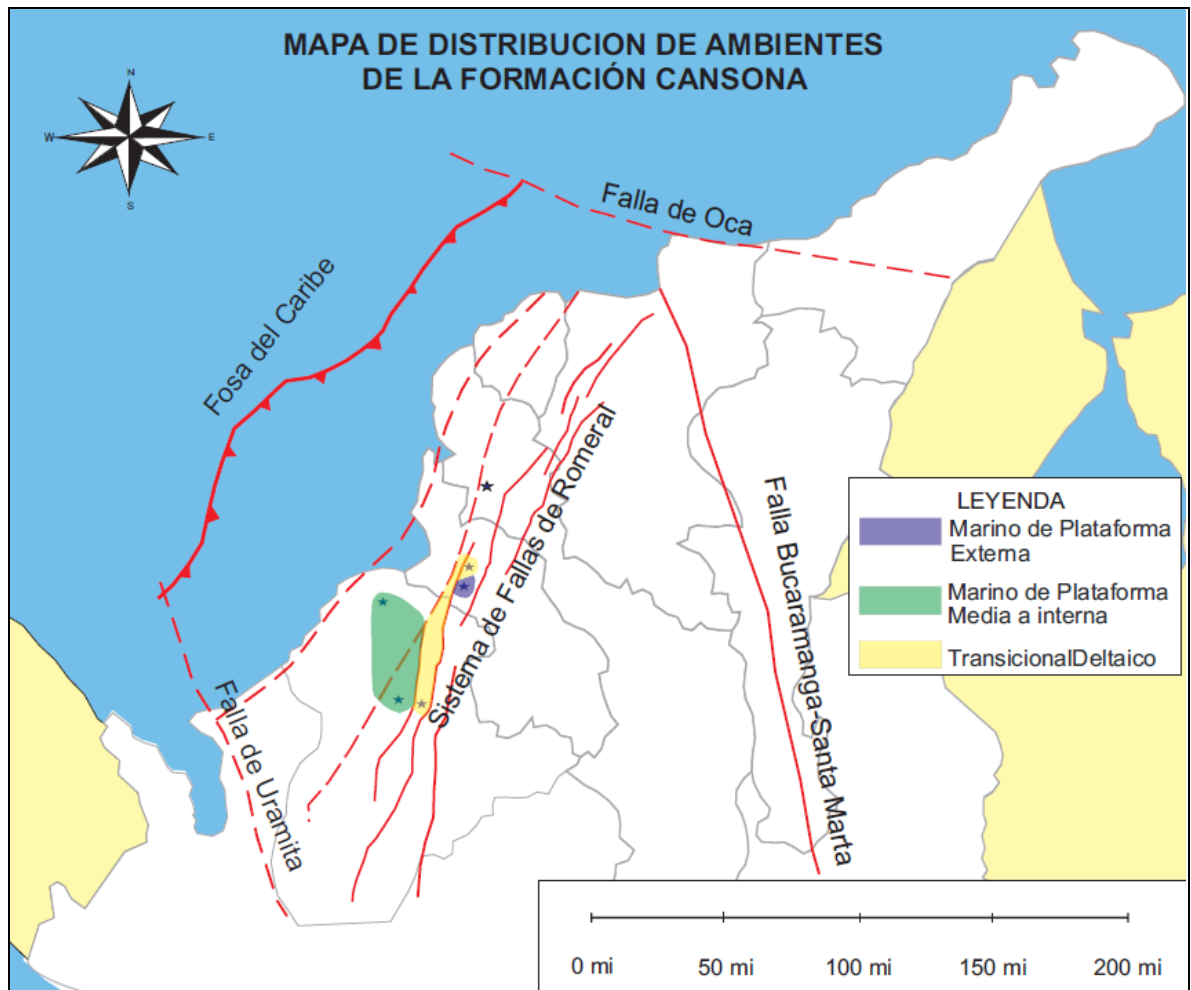


Figura 32. Mapa de ambientes de deposición de la Formación Cansona.

CONCLUSIONES

Fueron identificadas cinco organofacies (AB, B, BC, C y CD) que representan un ambiente marino de plataforma, mostrando una disminución en el contenido de oxígeno de derecha a izquierda.

La organofacies AB, identificada en la sección Arroyo Columbita, presenta la mejor calidad de la materia orgánica de la Formación Cansona, en donde los IH son los más altos y la materia orgánica típica es MOA, típica de ambiente marino de plataforma de aguas tranquilas y condiciones reductoras, sin embargo, el TOC de esta organofacies es muy bajo ($\leq 1\%$), por lo tanto no presenta buen potencial de generación.

La organofacies BC, en las secciones San Carlos y Purgatorio, es la que se encuentra más ampliamente distribuida en la Formación Cansona y representa un ambiente de depositación marino en condiciones subóxicas, donde la materia orgánica no se encuentra bien preservada y es principalmente de origen continental, aunque también se aprecia materia orgánica de origen marino.

Las secciones Arroyo Peñitas y Cantera El Clan se encuentran constituidas por rocas depositadas en ambiente marino proximal de alta energía, donde es importante la influencia de una fuente fluvial dado el alto contenido de materia orgánica terrígena (fitoclastos, granos de polen y esporas), este tipo de materia orgánica es característica de la organofacies CD.

La organofacies que representa el mayor potencial de generación es la BC, con potencial para generar hidrocarburos tanto líquidos como gaseosos, ya que el kerógeno asociado a esta facies es tipo II y III.

La quimiofacies 1 en la sección Cantera San Carlos corrobora la calidad de la materia orgánica de la organofacies BC y adicionalmente muestra que parte del aporte de elementos como el V, Ni y Co puede ser debido a la roca fuente de los sedimentos.

La organofacies CD identificada en la sección Arroyo Peñitas refleja de manera general un paleoambiente de depositación marino transicional, sin embargo, la identificación de las quimiofacies también en esta misma sección determinó cambios que no fueron evidentes con las organofacies, dando como resultado la idea de una profundización de la Cuenca hacia el tope de la secuencia.

La sección donde la Formación Cansona presenta las mejores condiciones de madurez es la cantera Purgatorio ya que la mayoría de la sección se encuentra en ventana de generación, con un %Ro de 0,7; mientras que en la cantera San Carlos, con mejor calidad de materia orgánica alcanzo las etapas iniciales de la ventana de generación.

La meteorización posiblemente juega un papel importante en la preservación de los contenidos de materia orgánica en las rocas.

Con base en los análisis geoquímicos de la Formación Cansona, se sugiere que esta unidad presenta un buen a excelente potencial de generación para hidrocarburos tanto líquidos como gaseosos, especialmente hacia la zona central y sur de la cuenca.

RECOMENDACIONES

Realizar un muestreo en el cual se tenga en cuenta el grado de meteorización de las muestras debido a que la alta meteorización en muchas muestras redujo la resolución de los análisis.

El muestreo de pozo ayudaría a robustecer el modelo de ambientes de la Formación Cansona ya que son muy pocos los afloramientos donde se encuentra la Formación Cansona en la Cuenca y además el grado de meteorización en muestras de pozo es menor.

Realizar un estudio bioestratigráfico detallado de todas las secciones con el fin de identificar a qué edad corresponden los intervalos con mejor potencial de generación

Se recomienda evaluar los elementos traza en kerógeno aislado con el fin de validar los resultados obtenidos en roca total

REFERENCIAS BIBLIÓGRAFICAS

- ANH, Barrero, D, Pardo, A, Vargas, C y Martínez, J1 2007, Colombian Sedimentary Basins, p. 46-82.
- Akinlua, A, Adekola, O, Swakamisa, O, Fadipe, O, Akinyemi, S, 2010, Trace element characterisation of Cretaceous Orange Basin hydrocarbon source rocks, Applied Geochemistry, Vol. 25, Elsevier, p.p. 1587-1595.
- Berner, R. A, Raiswell, R, 1984, C/s method for distinguishing freshwater from marine sedimentary rocks, GEOLOGY, v. 5, p. 365-368
- Berner, R, 1984, Sedimentary pyrite formation: An update, Geochimica et Cosmochimica Acta, Volume 48, Issue 4, April 1984, Pages 605-615.
- Cediel, F., R. P. Shaw, and C. Cáceres, 2003, Tectonic assembly of the Northern Andean Block, in C. Bartolini, R. T. Buffler, and J. Blickwede, eds., The Circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon habitats, basin formation, and plate tectonics: AAPG Memoir 79m p. 815– 848.
- Chevron Overseas, 1986, Northwest Colombia Project (Hydrocarbon Source Rock Potential). Apéndices A, B y C.
- De Porta, J, 1974. Léxico estratigráfico COLOMBIE (*deuxième partie*)-*Tertiaire et Quaternaire*, Centre National De La Recherche Scientifique.
- ECOPETROL, Mora C, Reyes A, Escobar C, Jaramillo C, Giraldo, B, Sarmiento L, 2003, Descripción De Corazones Y Análisis Petrológico-Petrofísico Y Geoquímico Cuenca Sinú, Tomo I-Informe Final, Piedecuesta, P. 43-84.
- Ercegovac M., Kostić A., 2006, Organic facies and palynofacies: Nomenclature, classification and applicability for petroleum source rock evaluation, International Journal of Coal Geology, p.70–78.

- ESRI-ILEX (García M, Wavrek d y Curtiss D), 1995, Evaluación Regional Sinú-San Jacinto, Empresa Colombiana De Petróleos, Gerencia De Exploración; Earth Sciences And Resources Institute; University Of South Caroline; University Of Utah; ILEX Ltda.
- Flinch J, Amaral J, Doulcet A, Mouly B, Osorio C Y Pince J.M, 2003, Structure of the Offshore Sinu Accretionary Wedge. Northern Colombia, VIII Simposio Bolivariano - Exploracion Petrolera en las Cuencas Subandinas.
- Gill D, Shomrony A y Fligelman H, 1993, Numerical Zonation Of Log Suites And Logfacies Recognition Of Multivariate Clustering. The American Association of Petroleum Geologists Bulletin. Vol. 10 (octubre 1993), p. 1981-1991.
- Gulf Oil Exploration And Production Company, 1983, Geology And Hydrocarbon Evaluation Of Northwest Colombia, Central Exploration Technology Center. P 6-11.
- Guzmán, G, Gómez, E., Serrano, B., 2004, Geología De Los Cinturones Del Sinú, San Jacinto Y Borde Occidental Del Valle Inferior Del Magdalena Caribe Colombiano-Escala 1:300.000, BOGOTÁ D. C., INGEOMINAS.
- Leventhal, J, 1995, Carbon-sulfur Plots to show diagenetic and epigenetic sulfidation in sediments, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 59, No 6, p. 1207-1211.
- Mann, U y Stein R, 1997) Organic Facies Variations, Source Rock Potential, and Sea Level Changes in Cretaceous Black Shales of the Quebrada Ocal, Upper Magdalena Valley, Colombia. *AAPG Bulletin*, V. 81, No. 4 (April 1997), P. 556D576.
- Mastalerz M (2009), Application Of Petrographic Techniques In Characterization Of Source Rock Variability, Indiana University.
- Mongenot, T, Tribovillard, N, Desprairies A, Lallier-Verges, E, Laggoun-Defarge, F, 1996, Trace elements as palaeoenvironmental markers in strongly mature

hydrocarbon source rocks: the Cretaceous La Luna Formation of Venezuela, *Sedimentary Geology* Vol, 103, Elsevier, p.p 23-37.

- Montero-Serrano, J, Palarea-Albaladejo, J., Martín-Fernández, J, Martínez-Santana, M, Gutiérrez-Martín, J, 2010 Sedimentary chemofacies characterization by means of multivariate analysis, *Sedimentary Geology*, Vol. 228, Elsevier B. V., p.p. 218-228.
- Mora C, (2009), *Geoquímica Del Petróleo*, XII Congreso Colombiano De Geología
- MORSE, J, BERNER, R, 1995, What determines sedimentary C/S ratios?, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 59, No. 6, Elsevier Science Ltd, pp. 1073- 1077.
- Norma Técnica Colombiana NTC 1486
- Normas ISO 7404-2, 3, 5 (1994).
- Reporte Interno Ecopetrol-ICP, Reconocimiento de Palinofacies de los Pozos de referencia: Tenax 1, Guando 73, Castilla Norte 15, Guariques 1, Rio de Oro 14, Ecopetrol-ICP, Bucaramanga.
- Tyson R. V., 1995, *Sedimentary Organic Matter. Organic Facies and Palinofacies*. Great Britain, Chapman & Hall.
- <http://www.leco.com/>

ANEXO A. MARCO GEOLOGICO REGIONAL

El norte de Colombia es ocupado por un complejo acrecionario muy amplio que se extiende a lo largo del mar Caribe, el cual representa la parte más externa de la cuña de acreción del norte de Colombia (figura 1). El prisma se encuentra asociado con la subducción de la placa Caribe por debajo de la suramericana (figura 2). Este prisma es denominado Cuenca de Sinú-San Jacinto y su estratigrafía y rasgos estructurales de las zonas del oeste colombiano están determinados por la zona de subducción (Haffer, 1963; Duque-Caro, 1980; Chevron, 1986; Bowland, 1993; ESRI-ILEX, 1995; Laverde, 2000; Caro and Spratt, 2003 en Sánchez y Permanyer, 2006).

La Cuenca Sinú-San Jacinto está localizada en la Cuenca Caribe colombiana (figura 1), que es una Cuenca de placa marginal del Cenozoico. Esta Cuenca se conforma por dos cinturones plegados adyacentes: (1) El cinturón de San Jacinto del Paleógeno con una extensión hacia el Norte y (2) el cinturón del Sinú del Neógeno localizado al margen oeste del cinturón de San Jacinto. Cada cinturón tiene sus propias características estratigráficas (Duque-Caro, 1980; Ecopetrol-ICP, 2000, 2003).

Seguido a la obducción de la placa oceánica Caribe tuvo lugar la acreción a lo largo del área del Sinú-Magdalena Inferior desde ese tiempo hasta el presente. Una cuña acrecionaria interna conformada por estratos del Cretácico superior a Oligoceno apoyado sobre corteza oceánica es expuesta a lo largo de las áreas de San Jacinto y Sinú. Esta parte reducida del prisma contrasta con el prisma offshore bien desarrollado del Sinú que consiste de bloques imbricados del Mioceo al Pleistoceno (Flinch, 2003).

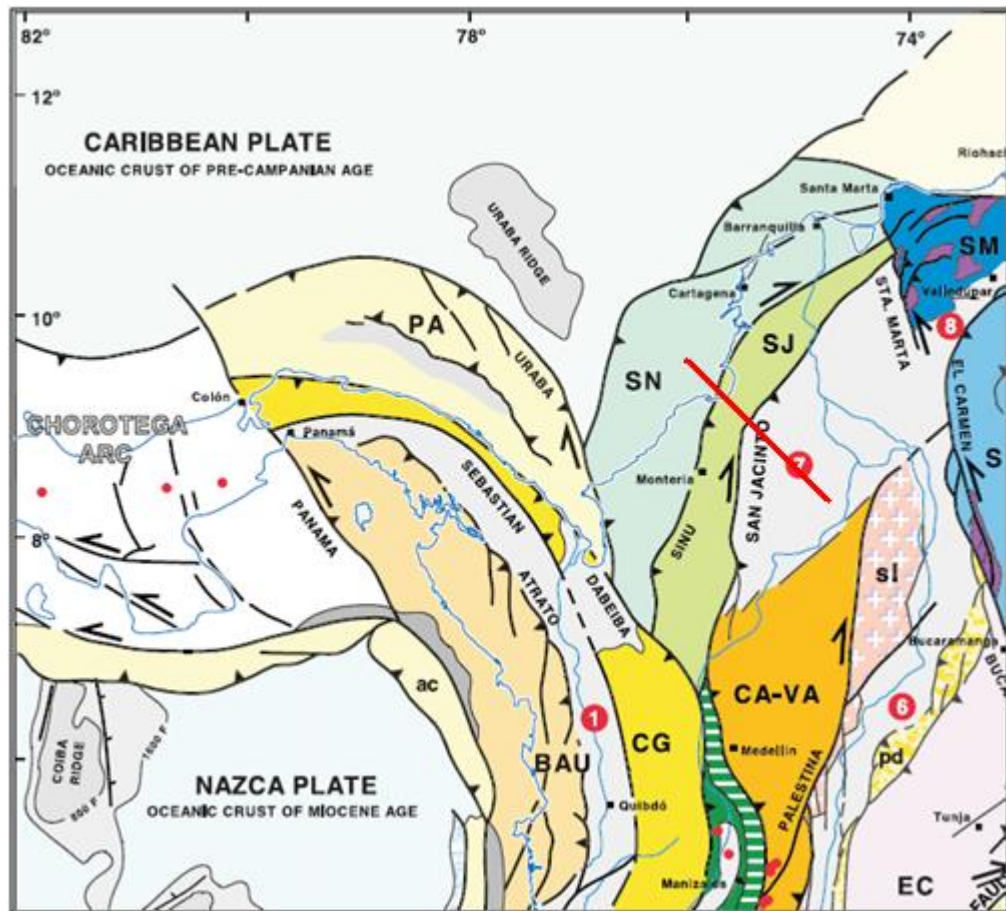


Figura A.1. Mapa de Colombia con las diferentes provincias y sus respectivos límites tectónicos (Cediél et al, 2003).

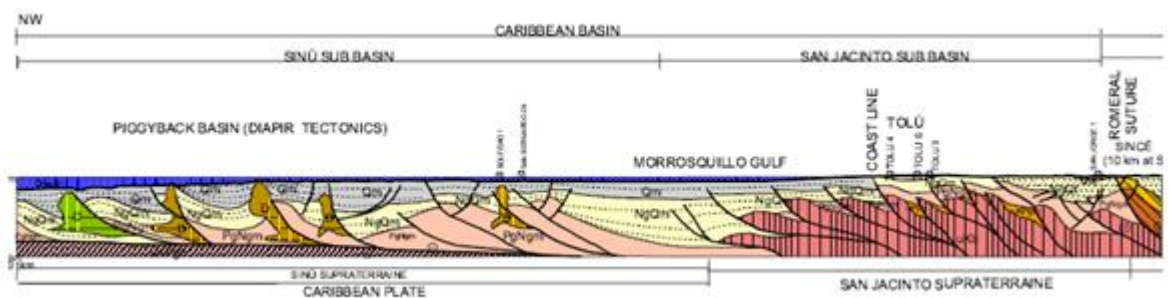


Figura A.2. Sección geológica de la costa Caribe colombiana, escala 1:500.000. Ingeominas.

La parte más interna y antigua de la cuña acrecionaria colombiana está expuesta a lo largo de las montañas de San Jacinto y el área del Sinú, el oeste de la Cuenca Plato-San Jorge. Esta cuña interna consiste de bloques imbricados con

vergencia al oeste que envuelve corteza oceánica cretácica y una cobertura sedimentaria muy delgada de edad Cretácico representado por la Formación Cansona y sedimentos pelágicos y tipo flysch del Paleógeno a Mioceno inferior (Flinch, 2003).

El cinturón de San Jacinto está conformado por una serie de pliegues con dirección noroeste, fallas inversas y normales. Hacia el norte se encuentra limitada por la falla de Oca; al este por la falla de Romeral; al Oeste está limitado por el lineamiento del Sinú; y al Suroeste, por la terminación de la Cordillera Occidental (figuras 1 y 2) (Caro, 2003).

ESTRATIGRAFÍA

En el cinturón plegado de Sinú-San Jacinto afloran rocas de edad Cretácico hasta Cuaternario, sin embargo, la sedimentación en la Cuenca estuvo muy controlada por el ambiente tectónico, por lo tanto, la estratigrafía del cinturón del Sinú difiere del cinturón de San Jacinto. La unidad sedimentaria más antigua del cinturón de San Jacinto, que es donde se ubican principalmente los afloramientos de interés, corresponde a la Formación Cansona, la cual presenta un contacto discordante con el basamento cristalino, conformado por las *Peridotitas de Planeta Rica* (figura 3) (Guzmán et al, 2004). Esta última es definida por Dueñas y Duque-Caro (1981) como un cuerpo peridotítico compuesto por harzburgitas y en menor proporción dunitas, asociado localmente con serpentinitas y gabros. En su mayor parte, se reporta que las rocas se encuentran muy meteorizadas, encontrándose roca saprolítica de color verde oscuro y manchas amarillentas con concentraciones locales de ferro-níquel. La edad absoluta de esta unidad no ha sido definida debido a la carencia de dataciones radiométricas, pero se estima que es anterior al Santoniano, ya que estas peridotitas infrayacen a la Formación Cansona de edad Cenomaniano-Maastrichtiano (Guzmán et al, 2004).

La *Formación Cansona (K2c)* fue definida por la Texas Petroleum Company. El término ha tenido diferentes connotaciones como el “Ciclo de Cansona” y el “Piso de Cansona” de Duque-Caro (1972^a, 1972^b, 1973) quien utiliza estos nombres para referirse a unidades tiempo-roca o el de series de Cansona (Cansonian Series en Duque-Caro, 1987) aparentemente con la misma connotación. También se ha empleado el nombre de “Grupo Cansona” (Duque-Caro, 1973; Ávila y Monroy, 1973; Dueñas y Duque-Caro, 1981) para agrupar dos formaciones denominadas San Cayetano inferior y San Cayetano superior, formaciones definidas muy brevemente por Chenevart (1963). La actual definición de INGEOMINAS establece que la Formación Cansona está constituida por chert tipo estratificado (gris oscuro, pardo y rojizo), capas delgadas, con intercalaciones de limolitas silíceas con restos fosfatizados de vértebras y escamas de peces y microfósiles; ocasionalmente entre las lilitas aparecen capas de calizas grises, arcillolitas físciles y arenitas grano fino color gris. Conglomerado matriz soportado, con fragmentos de rocas volcánicas básicas e intermedias; intrusiones de silos de basaltos porfiríticos de matriz muy fina, cloritizados. Para GEOTEC (1997), la Formación Cansona está constituida hacia la base por cherts marrones afectados por pequeños silos y diques de una roca ígnea muy meteorizada, con intercalaciones aparentes de diabasas, chert negros, limolitas grises verdosas y arcillolitas; dispuestas en capas decimétricas o centimétricas. Cuenta con un espesor promedio de 100 m (Guzmán et al, 2004). La Formación Cansona ha es catalogada como una de las posibles unidades generadoras de la Cuenca Sinú-San Jacinto (ANH, 2007), en ella históricamente, desde 1983, se han realizado diversos estudios geoquímicos para evaluar su potencial de generación, en los cuales se ha encontrado amplias variaciones en el contenido y calidad de su materia orgánica.

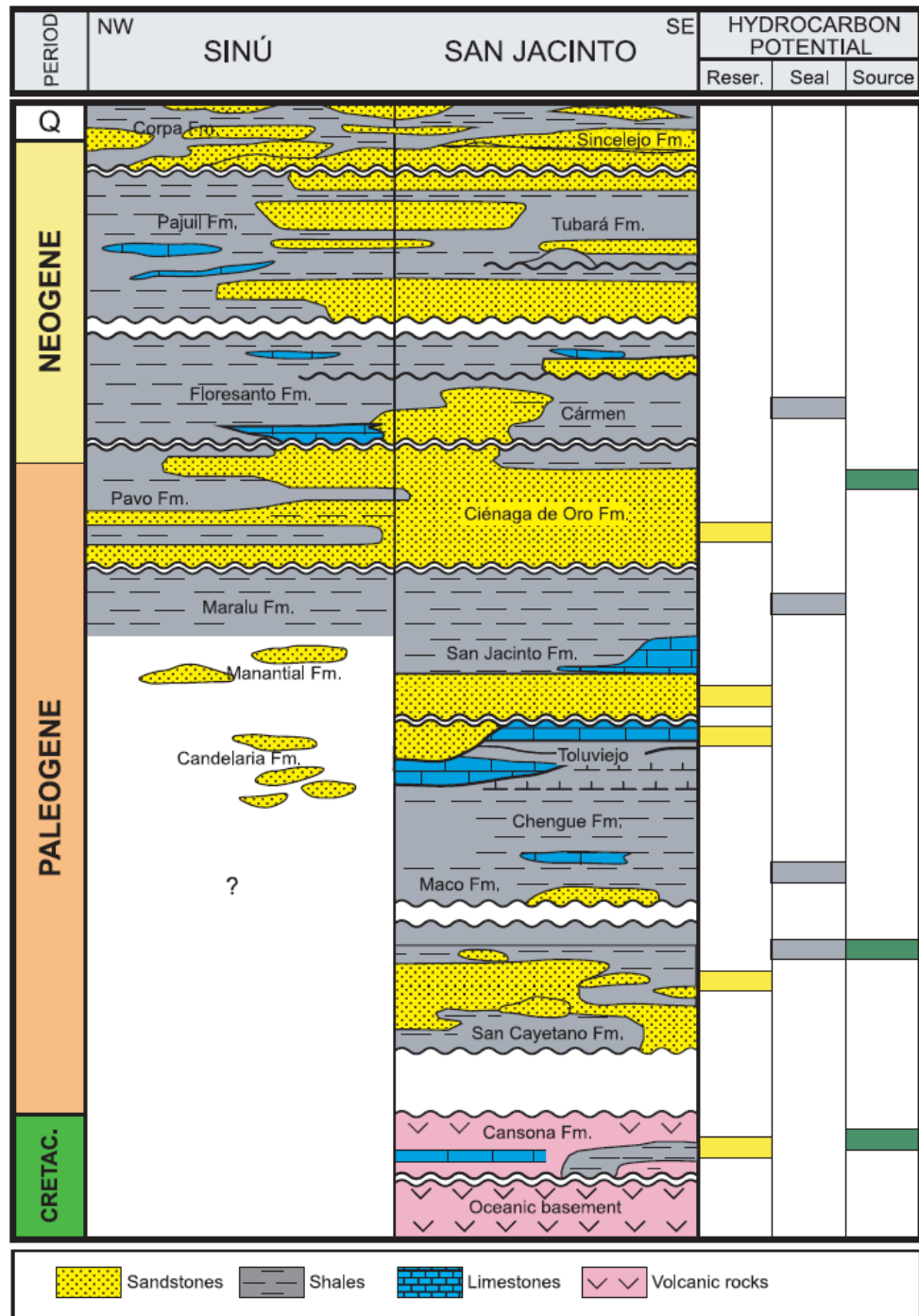


Figura A.3. Columna estratigráfica generalizada de las Cuencas Sinú y San Jacinto (ANH, 2007).

Por encima de la Formación Cansona yace discordantemente la *Formación San Cayetano* (E1E2sc), cuya edad ha sido estimada como Paleoceno tardío–Eoceno

temprano. Su nombre fue propuesto inicialmente por Chenevart (1963) para denominar los sedimentos que afloran en los Montes de María, aunque este autor no asigna ninguna sección tipo. En la cartografía del INGEOMINAS, se reporta que la Formación San Cayetano, corresponde a secuencias granodecrecientes de litarenitas arcósicas desde conglomeráticas hasta grano fino, generalmente color café amarillento por alteración a verde oliva oscuro en muestra fresca, cemento silíceo, localmente calcáreo, mal seleccionadas. Intercalaciones menores de lodolitas interestratificadas con arenitas grises de grano fino a medio, cemento calcáreo, bioturbadas, en capas gruesas a muy gruesas, con abundante yeso y azufre secundario (Guzmán, 2004).

Suprayaciendo a la Formación San Cayetano se ubica la Formación Maco (E2ma), definida como “una secuencia de litoarenitas arcósicas de grano medio y grueso conglomeráticas, hacia la base color naranja amarillento oscuro dispuestas en capas medianas a muy gruesas, con intercalaciones de capas gruesas de conglomerados polimícticos con matriz arenosa, algunos calcáreos color naranja muy pálido, macizos, duros, con fragmentos angulares de calizas o derivados a partir de rocas ígneas; y esporádicas intercalaciones de lodolitas color marrón” (Duque-Caro, et al, 1996). La Formación Maco es correlacionable con la Formación Chengue y se encuentra suprayacida por las *Formaciones Toluviejo (E2tv)*, *San Jacinto (E2sj)* y *Ciénaga de Oro (E3N1co)* (figura 3).

La *Formación Ciénaga de Oro (E3N1co)* en su localidad tipo, que es la población de Ciénaga de Oro, como una unidad predominantemente arenosa, que consta en general de una alternancia de areniscas de grano fino a conglomeráticas, limolitas intensamente bioturbadas, estratificadas en capas planas paralelas, shales grisáceos algo calcáreos, shales carbonosos y carbón (Guzmán, 2004). El carácter ferruginoso de sus arenas y conglomerados así como su color pardo rojizo abigarrado, ha sido causa que en la industria petrolera la hayan denominado a esta unidad como Formación Pintura (Dueñas y Duque-Caro, 1981).

ANEXO B. GEOLOGIA DEL PETROLEO

En la Cuenca Sinú-San Jacinto se ha identificado un sistema petrolífero conformado por la Formación Cansona (K2c) como roca generadora, la cual “es favorable para la generación de hidrocarburos líquidos y consiste principalmente de materia orgánica roca en kerógeno tipo I-II” (ANH, 2007), otras unidades también han sido propuestas como generadoras (Porquero, Floresanto y las facies lodosas de Cienaga de Oro), sin embargo, estas presentan rasgos característicos de kerógeno tipo II y III; “los reservorios principales son siliciclásticos depositados durante el Eoceno-Mioceno” (ANH, 2007).

Roca Generadora. “Las únicas unidades estratigráficas que en esta Cuenca tienen suficiente contenido orgánico son los shale del Oligoceno de la Formación Cienaga de Oro y la Formación Porquero. Los shale de Cienaga de Oro son muy variables en términos de contenido de TOC, normalmente muy pobres en materia orgánica, pero la presencia de lentes de carbono es relativamente alta (hasta 7% en shales), su kerógeno predominante es tipo III. La principal unidad de roca generadora es la Formación Porquero de edad Mioceno temprano constituida por shales grises oscuros, arcillolitas calcáreas de origen marino, con intercalaciones de lentes de areniscas turbidíticas. En la Cuenca de Plato el COT alcanza 2%. Allí hay presencia de kerógeno tipo I-II, aunque el tipo II-II es más normal” (ESRI-ILEX, 1995).

“La roca generadora mas prospera en la Cuenca Sinú-San Jacinto es la Formación Cansona de edad Campaniano, la cual se encuentra exclusivamente en el prisma acrecionario subestructural del Cinturón de San Jacinto. El miembro shale de Finca Vieja, parte de esta unidad reporta un COT entre 2,0 y 11,3% valores altísimos de pirolisis (2,9 a 78mg/g). El kerógeno es tipo I y II” (ESRI-ILEX, 1995).

Roca Almacenadora. En la Cuenca han sido identificadas las unidades depositadas durante el Eoceno-Mioceno. Estos depósitos varían de continentales

fluvio-deltaicos a marinos y también incluyen depósitos de aguas someras carbonatadas” (ANH, 2007). “En la Cuenca Sinú las rocas con mejores características de almacén son las areniscas basales de la Formación Pajuil/Tubará, las areniscas de las Formaciones Floresanto/Porquero, Ciénaga de Oro / Pavo y a algunas areniscas de la Formación San Cayetano” (Ecopetrol, 2005).

Roca Sello. “Sellos que se traslapan se encuentran presentes en toda la Cuenca. Los sellos se encuentran asociados con traslape o migración de cambios de facies de ambientes marinos a continentales” (ANH, 2007).

Trampa. “Es posible identificar diferentes tipos de plays con buen potencial exploratorio; trampas estructurales en cierres relacionados con cabalgamientos y trampas estratigráficas presentes al Norte del Cinturón de San Jacinto. También diapiros de shale pueden ser objetivos exploratorios” (ANH, 2007).

ANEXO C. ANTECEDENTES

Desde 1983 han sido practicados diversos estudios en la Cuenca Sinú-San Jacinto con el fin de reducir la incertidumbre geológica acerca de su sistema petrolífero. A continuación se presentan los diversos análisis geoquímicos realizados en la Formación Cansona a través del tiempo, presentando la metodología empleada en dichos estudios y los resultados obtenidos, procurando presentar las muestras, las empresas, los laboratorios y los equipos empleados para realizar los análisis.

1983. *GEOLOGY AND HYDROCARBON EVALUATION OF NORTHWEST COLOMBIA CENTRAL EXPLORATION AND TECHNOLOGY CENTER. GULF OIL EXPLORATION AND PRODUCTION COMPANY.*

AREA DE CERRO CANSONA

QUEBRADA CACAO.

METODOLOGIA

- Levantamiento estratigráfico de más de 1118 metros de espesor a lo largo de la Quebrada Cacao (figura C-1).
- Fueron tomadas 86 muestras de todas las litologías identificadas en el levantamiento estratigráfico (figura C-1).
- Se seleccionaron 12 muestras para geoquímica (35, 42, 46, 49, 52, 53, 58, 61, 64, 69, 75 y 77).
- Posteriormente se cuantificó la materia orgánica en las muestras seleccionadas, se midió la reflectancia de vitrinita, fue identificado el tipo principal de kerógeno, el tipo de hidrocarburo que sería producido probablemente a partir de las muestras (tabla C-1).

NUMERO DE MUESTRA	COT(WT %)	TA I	REFLECTANCIA MEDIA DE VITRINITA	PRINCIPAL TIPO DE KERÓGENO	PROBABLE HIDROCARBURO PRODUCIDO	POTENCIAL DE GENERACION
35	0,16	2+		Amorfo y Herbáceo	Aceite y gas	Pobre
42	1,07	2+	0,509	Amorfo	Aceite	Excelente
46	0,35	3		Leñoso	Gas	Regular
49	0,2	2+		Amorfo y Herbáceo	Aceite y gas	Pobre
52	0,43	2+	0,732	Herbáceo	Aceite y gas	Regular
53	0,85	3	0,852	Amorfo	Aceite	Bueno
58	0,45	3	1,039	Amorfo	Aceite	Regular
61	0,31	2+ a 3	0,545	Herbáceo	Aceite y gas	Regular
64	0,47	3	0,971	Herbáceo	Aceite y gas	Regular
69	0,14	2+		Herbáceo	Aceite y gas	Pobre
75	0,63	2+	0,75	Amorfo	Aceite	Bueno
77	0,18	3		Herbáceo	Aceite y gas	Pobre

Tabla C-1. Resumen de datos geoquímicos, potencial de generación y probables hidrocarburos producidos de 12 muestras de afloramiento de la Formación Cansona en el Cerro Cansona, Quebrada Cacao.

1986. ESTUDIO REALIZADO POR CHEVRON OVERSEAS. NORTHWEST COLOMBIA PROJECT (HYDROCARBON SOURCE ROCK POTENTIAL).

En este estudio se tomaron datos tanto de muestras de pozo como de afloramiento. Los afloramientos muestreados fueron: Cerro Cansona, Cantera San Sebastián y Cantera Purgatorio. Los resultados de Pirólisis rock-eval fueron obtenidos con el equipo rock-eval II. A continuación se presentan los resultados obtenidos.

CERRO CANSONA. El levantamiento estratigráfico realizado en la campaña de campo es presentado en la figura C-2, aquí se puede apreciar que la mayoría de

las muestras recolectadas son de rocas siliciclásticas limolíticas, algunas muestras fueron tomadas de niveles de chert. Los valores de CO_T obtenidos en estas muestras son bajos comparativamente (0,0-7,05%wt), siendo predominantes los valores inferiores a 1%wt., la media de estos valores es 0,73%wt (figura C-3). Los resultados de pirolisis rock.-eval fueron obtenidos con el equipo rock-eval II. La figura C-4 muestra las relaciones IH/IO, en ella se muestra una gran dispersión de los datos, presentando a grandes rasgos, una familia de muestras con kerógeno tipo II y otra cuyo kerógeno es tipo III. Los datos tomados para estos análisis se presentan en el anexo 1.

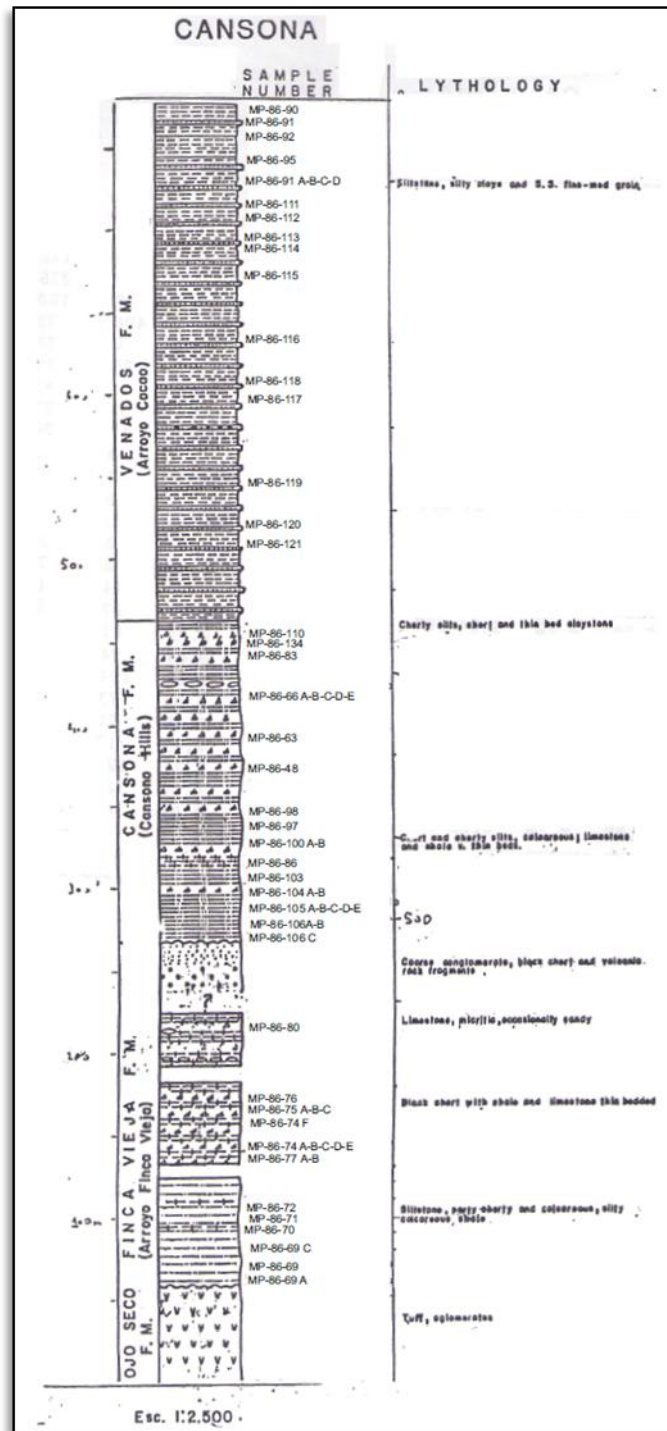


Figura C-2. Columna estratigráfica de la Formación Cansona sección tipo Cerro Cansona en el cinturón plegado Sinú-San Jacinto con la ubicación de las muestras (Chevron, 1986).

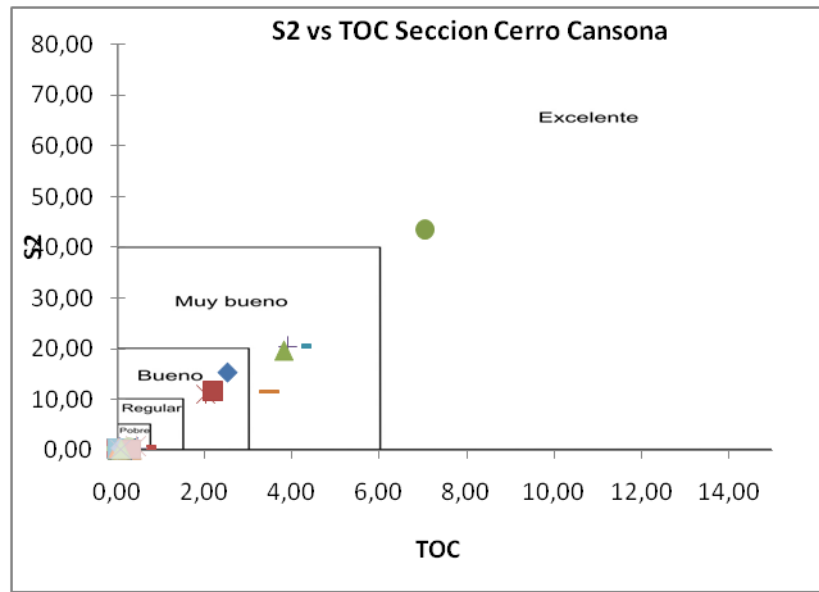


Figura C-3. Relación S2 vs COT en la cantera Cansona.

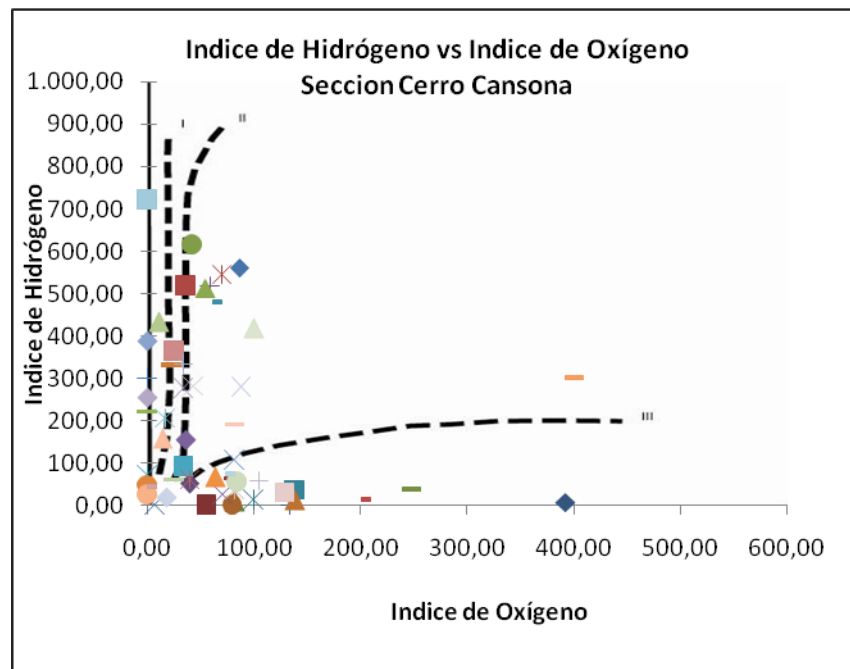


Figura C-4. Diagrama de Van Krevelen para las muestras de la Formación Cansona en la sección Cerro Cansona.

CANTERA PURGATORIO. La figura C-5 muestra la columna estratigráfica levantada en esta cantera con la localización de las muestras analizadas para geoquímica, en ella podemos observar que la mayoría de las muestras seleccionadas para los análisis geoquímicos corresponden a muestras de chert y en algunos casos de limolitas ya sea calcáreas o con niveles de chert. Los resultados de pirolisis rock-eval fueron obtenidos con el equipo rock-eval II. La figura C-6 muestra el diagrama de Van Krevelen con la relación IH/IO. Los valores de COT de estas muestras son muy variables, van desde 0,05 hasta 12,22, presentando una media de 4,97%wt (figura C-7), con estos valores de COT se puede concluir que el potencial es excelente. A partir del diagrama de van krevelen se puede observar que el tipo de kerógeno predominante en estas muestras es I y II, dando un potencial de generación para hidrocarburos líquidos. Al respecto de los valores obtenidos de Tmax se concluye que la sección se encuentra en ventana de generación de aceite.

CANTERA SAN SEBASTIAN. Gran parte de las muestras analizadas de esta sección corresponden a chert y limolitas con niveles delgados de chert. Los resultados de Pirólisis rock-eval fueron obtenidos con el equipo rock-eval II a partir de 19 muestras del levantamiento estratigráfico (figura C-8). Los resultados de COT obtenidos muestran una gran variabilidad (0,0 a 8,79%wt), con una media de 2,36%wt (figura C-9), sin embargo, son muy abundantes las muestras con bajos contenidos de carbono orgánico. La figura C-10 muestra el diagrama de van krevelen para las muestras tomadas en dicha sección, en ella se aprecia una clara distinción de dos grupos de muestras, unas predominantemente de afinidad marina y otro grupo de afinidad continental. El anexo 3 presenta los resultados de COTy rock-eval. En cuanto a la madurez termal se puede concluir que se encuentra inmadura hacia el tope de la secuencia.

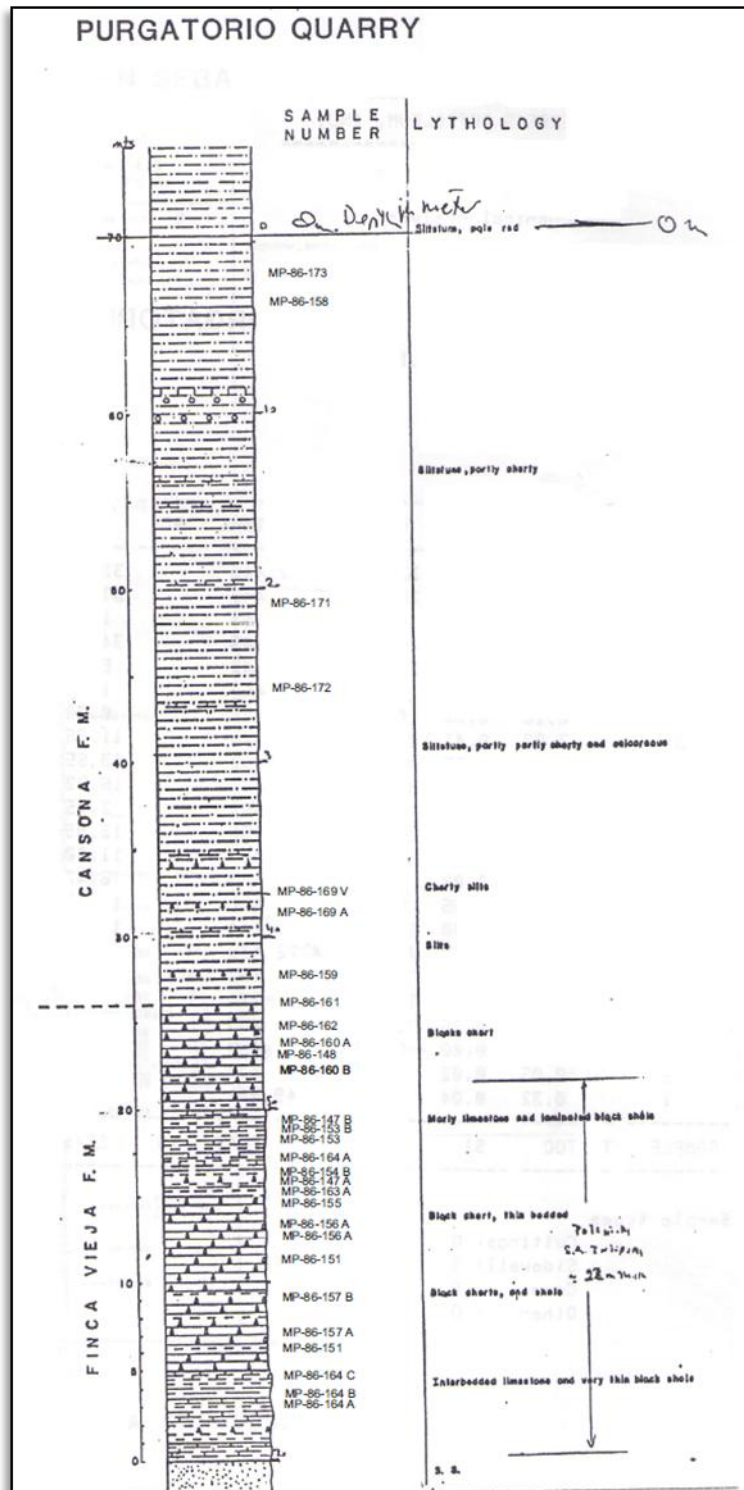


Figura C-5. Columna estratigráfica de la Formación Cansona en la cantera Purgatorio con la localización de las muestras (Chevron, 1986).

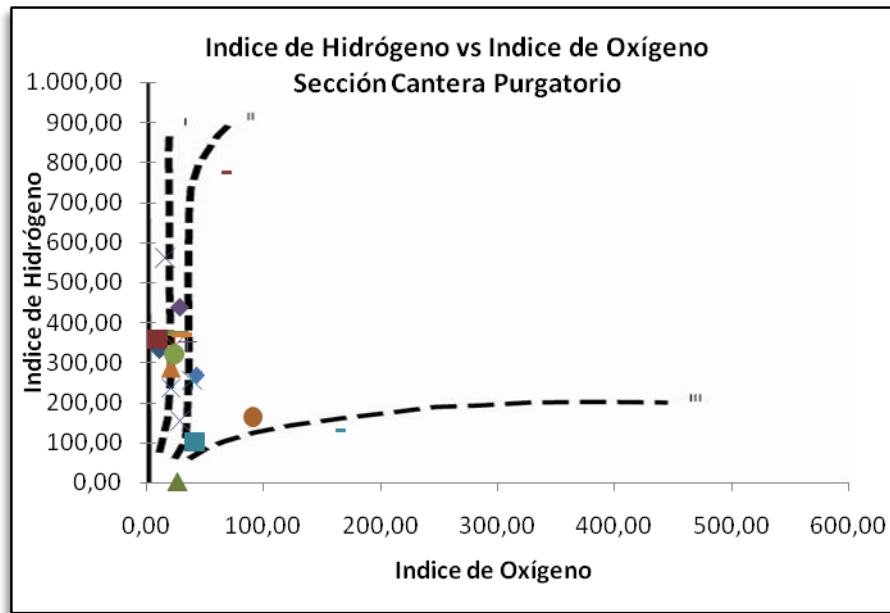


Figura C-6. Diagrama de Van Krevelen para la Formación Cansona en la sección Cantera Purgatorio (Chevron, 1986).

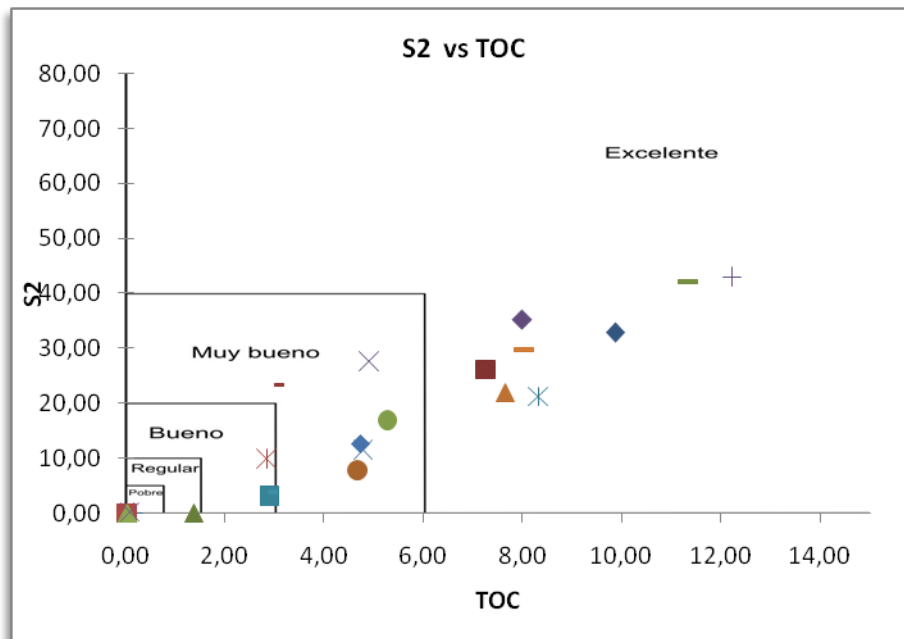


Figura C-7. Relación S2 vs COT para las muestras de la cantera Purgatorio.

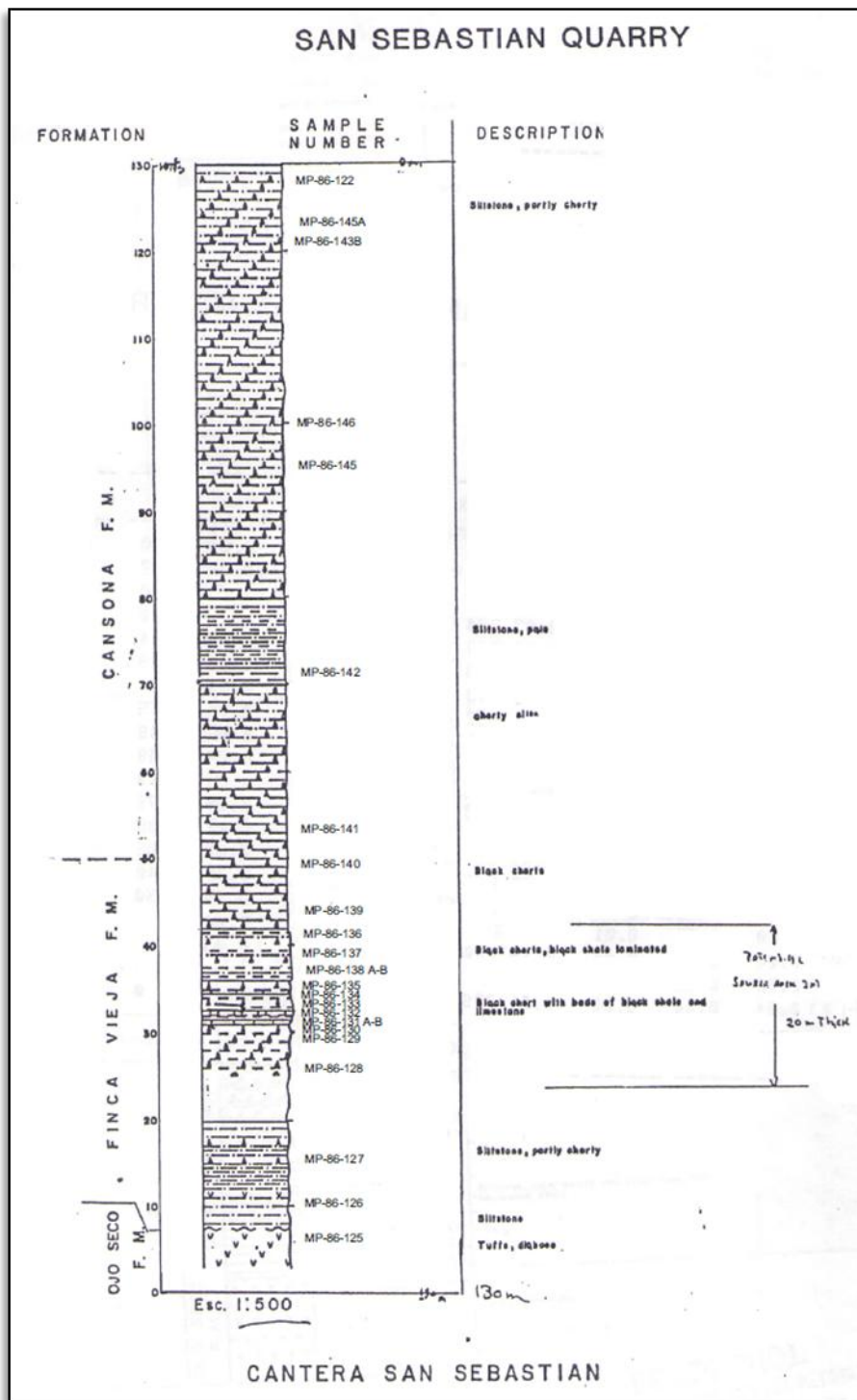


Figura C-8. Columna estratigráfica de la sección levantada en la Cantera San Sebastián (Chevron, 1986).

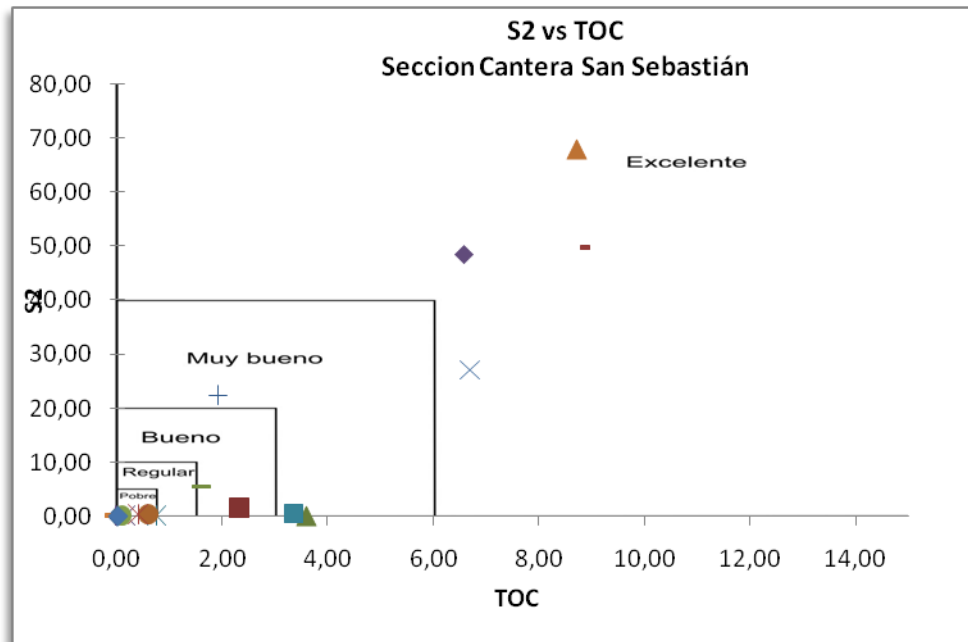


Figura C-9. Relación S2 vs COT de las muestras de la cantera San Sebastián.

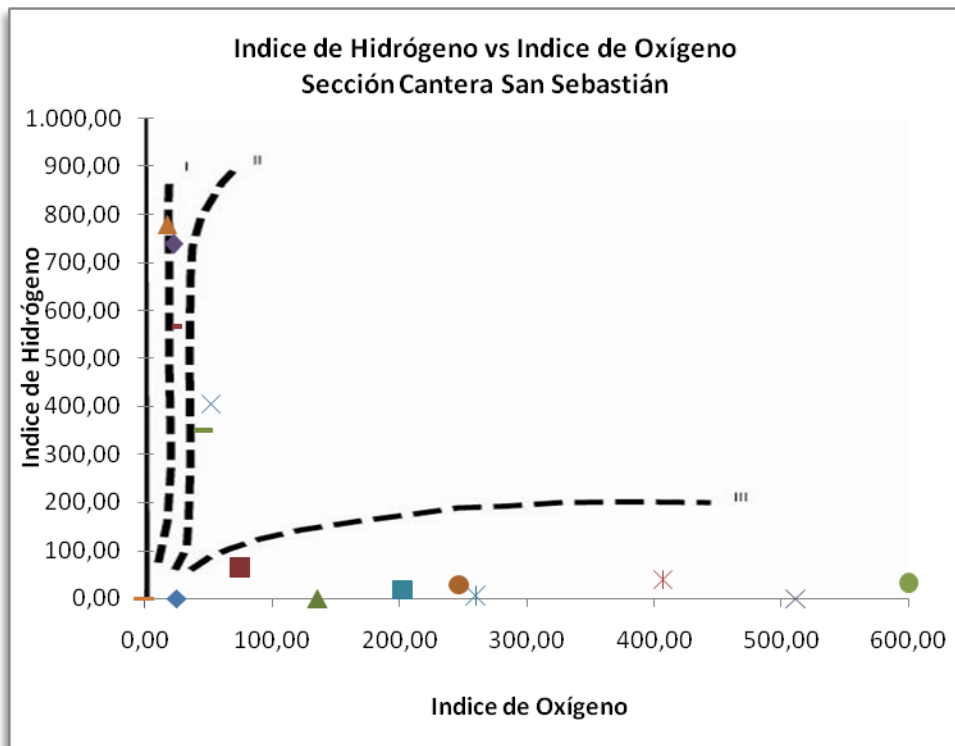


Figura C-10. Diagrama de Van Krevelen para las muestras de la cantera San Sebastián.

AÑO 1995. EVALUACION REGIONAL SINU-SAN JACINTO. MUESTREO REALIZADO POR ESRI-ILEX.

En este estudio se analizaron muestras de la Formación Cansona provenientes entre otras de tres afloramientos localizados en el Cerro Cansona, la Cantera San Sebastián y la Cantera El Purgatorio. La metodología llevada a cabo en este estudio fue la siguiente: basándose en el nuevo marco estratigráfico, se agrupó la información geoquímica existente de acuerdo a las principales secuencias estratigráficas identificadas. En cada uno de las secuencias estratigráficas se estudió la distribución de los valores de TOC, Ro y Tmax. Igualmente, los parámetros de HI y OI fueron analizados para identificar el tipo de kerógeno.

En este trabajo fueron identificadas cuatro secuencias posibles generadoras, estas son:

- Una secuencia de edad Cretácico superior representada por la Formación Cansona, a grandes rasgos, esta unidad presenta valores de COT que varían desde 0,5% hasta 12,2%, Tmax que varía desde 416° a 453° C, el IH por su parte se encuentra entre 64 y 1164mg/g, kerógeno tipo II (figura C-11), con esta información, la Formación Cansona cuenta con un potencial de generación Excelente.
- Secuencia de edad Paleoceno-Eoceno, identificada como la Formación San Cayetano. COT que varía entre 0,5% y 2,46%, con un promedio de 0,6%; los valores de IH son extremadamente bajos (<60mg/g); los valores de Tmax se encuentran entre 420 y 445° C. El tipo de kerógeno es II y III. Esta secuencia en general tiene un potencial muy limitado debido a los bajos valores de TOC.
- Secuencia Eoceno medio-Eoceno superior representada por las Formaciones Arroyo de Piedra, Chengue y Toluviejo. Esta secuencia fue estudiada con base en muestras de pozo localizadas en el cinturón de San Jacinto y Cuenca San Jorge. Las facies carbonatadas, en la Cuenca San Jorge, presentan COT superiores (0,99-2,32%), mientras que las facies clásticas tienen un promedio inferior de 0,5%. En el cinturón de San Jacinto el COT varía de 0,5 a

1,2%. El IH varía de 30 a 100mg/g. La temperatura de pirolisis Tmax presenta una variación entre 422 y 445°C, no presentando correlación con los valores de Ro. Esta secuencia, al igual que la anterior presenta un potencial muy limitado en cuanto a aceite, con potencial de generación de gas.

- Secuencia Oligoceno inferior-Mioceno inferior, representada por las Formaciones Ciénaga de Oro, Porquero Inferior, Carmen Inferior y Formación Perdices. Los valores más altos de COT(0,75%) de esta Formación se ubican hacia la región central y norte del cinturón de San Jacinto; al sur de la Cuenca de Plato y en el extremo norte de la misma; en el Alto de Cicuco y en la región norte de la Cuenca de San Jorge. A partir de la relación HI/OI, el kerógeno es tipo III y IV, por lo tanto esta secuencia tiene un potencial de generación para gas seco.

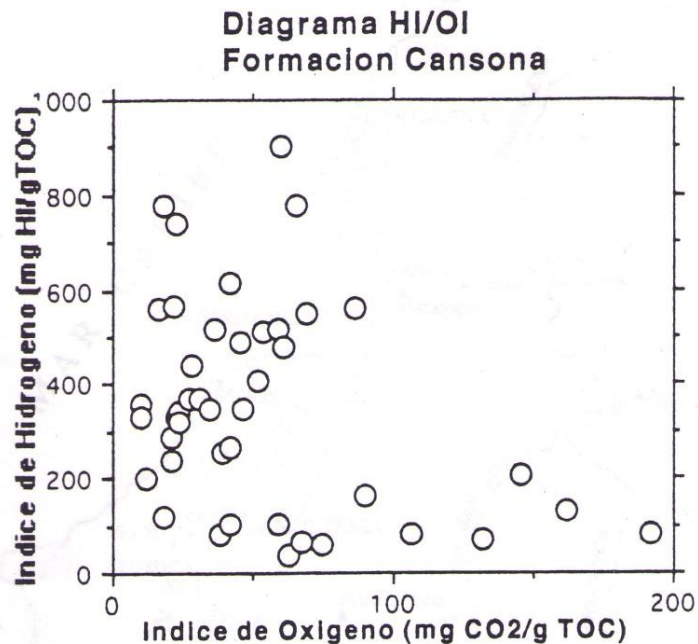


Figura C-11. Diagrama de Van Krevelen para las muestras de la Formación Cansona (ESRI-ILEX, 1995).

AÑO 1999. *EVALUACION DEL POTENCIAL PETROLIFERO DEL AREA SINU-URABA.* En este trabajo no fueron tomadas muestras de campo ni de pozo para la Formación Cansona, sino que fueron empleados los datos previos tomados por

Chevron (1986). Con esta información se concluyó que esta formación presenta valores de COT hasta del 11% con algunos intervalos de buena calidad de kerógeno ($HI > 300$). El grado de madurez es variable, la formación se encuentra inmadura en el Cerro Cansona y en ventana de generación de hidrocarburos en las Canteras de San Sebastián y Purgatorio.

AÑO 2003. MUESTREO REALIZADO POR ECOPEPETROL S.A. SECTORES DE MONTERIA, LORICA, SINCELEJO, FINCA VIEJA, CERRO CANSONA. La metodología llevada a cabo para realizar este proyecto fue la siguiente: 1) recolección de muestras y datos; 2) se seleccionaron y recolectaron las muestras de núcleos de afloramiento, muestras de mano y fluidos en la Litoteca Nacional; 3) se realizó análisis de carbono orgánico y Pirólisis rock-eval; 4) selección de muestras para concentración de materia orgánica; 5) análisis visual del kerógeno y madurez de la materia orgánica; 6) selección de muestras para extracción y cromatografía líquida.

A partir de los afloramientos fueron obtenidos los datos consignados en el anexo 4. Los resultados obtenidos para la *Cantera Golf* indican que el contenido de carbono orgánico de las muestras es de regular a bueno (0,1084 a 6,466%wt), la media de los resultados es de 2,521%wt (figura C-12). Los valores de Índice de hidrogeno de estas muestras indican que tienen potencial para generar hidrocarburos líquidos y aceite. Para la sección de *Cerro Cansona*, los valores de COT se encuentran catalogados en términos de potencial de generación como regular, los valores oscilan entre 0,599 y 0,7409%wt. Para el caso de la sección *Quebrada Columbita*, los valores de COT indican un potencial de regular a bueno, predominando valores por debajo de 1%wt. Por último, en la Quebrada Chalan se encontró que el contenido de carbono orgánico es regular (0,6039-0,8439%wt). En general, la sección que tiene mejor potencial para generar hidrocarburos es la *Cantera Golf*. La figura C-13 muestra un diagrama de van krevelen, donde se relacionan todas las muestras analizadas en este estudio, con esto se concluye que la mayoría de las muestras caen en el rango del kerógeno tipo I y II.

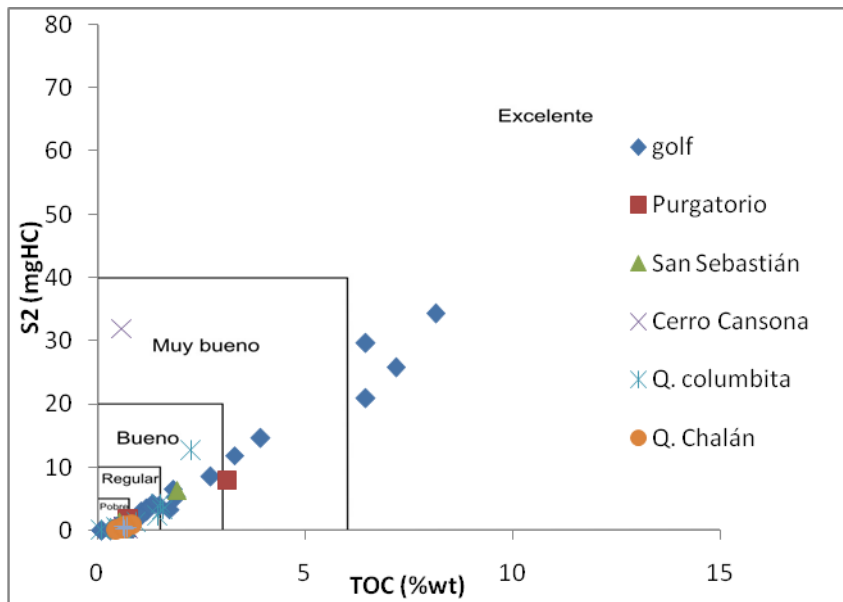


Figura C-12. Relación S2 vs COT de las muestras de las secciones Cerro Cansona, Quebrada Columbita, Quebrada Chalan, Finca Vieja Cerro Cansona, Cantera San Sebastián, Cantera golf, Cantera Purgatorio (Ecopetrol, 2003).

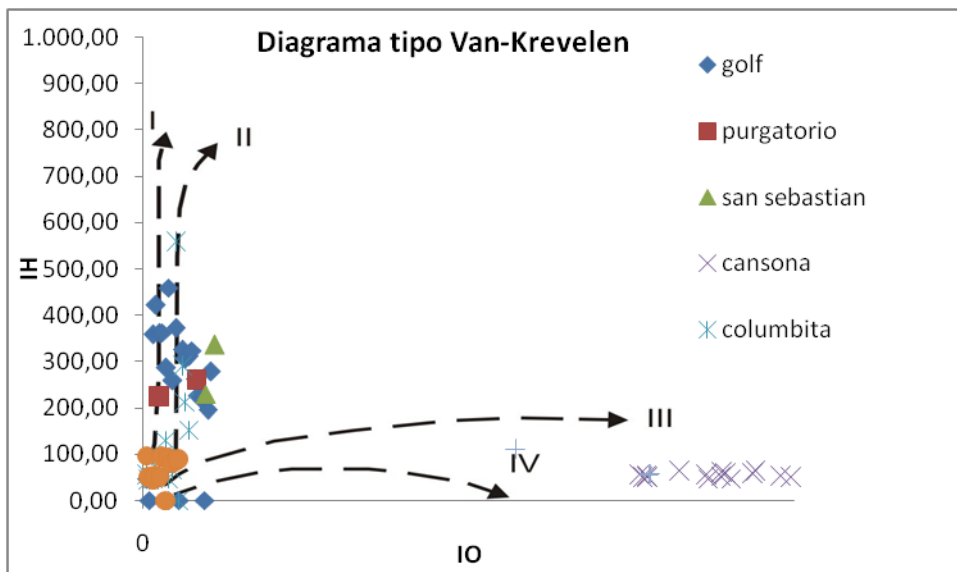


Figura C-13. Diagrama de Van Krevelen para las muestras de la Formación Cansona de las secciones Cerro Cansona, Quebrada Columbita, Quebrada Chalan, Finca Vieja Cerro Cansona, Cantera San Sebastián, Cantera golf, Cantera Purgatorio (Ecopetrol, 2003).

ANEXO D. LEVANTAMIENTO ESTRATIGRÁFICO DE SEIS SECCIONES ESTRATIGRÁFICAS

DESCRIPCIÓN ESTRATIGRÁFICA

La Formación Cansona fue descrita en seis localidades a lo largo de la Cuenca Sinú-San Jacinto durante una campaña de campo realizada por la empresa contratista de Ecopetrol-ICP, UT. DTH-EOS, estas localidades fueron:

- ✓ Cerro Cansona, Montes de María, municipio del Carmen de Bolívar, Bolívar
- ✓ Arroyos Peñitas, municipio de Chalán, Sucre
- ✓ Arroyo Columbita, municipio de Chalán, Sucre
- ✓ Cantera El Clan, municipio de Montería, Córdoba
- ✓ Cantera El Purgatorio, municipio de Montería, Córdoba
- ✓ Cantera San Carlos, municipio de Loricá, Córdoba

El reporte entregado del trabajo de campo propone la correlación que se muestra en la figura E.1, entre ambas correlaciones se observan una serie de diferencias principalmente hacia el área de Chalán, sin embargo, no se tiene certeza total de la veracidad de una u otra correlación, por lo que se sugiere sea realizado el estudio bioestratigráfico de estas secciones.

Cerro Cansona. En este sector fueron levantadas cinco secciones estratigráficas. En general, la Formación Cansona en Cerro Cansona consiste hacia la base de areniscas de grano medio con laminación plano paralela interestratificada con limolitas y areniscas de grano fino, cuyos contactos son principalmente ondulados o irregulares. Hacia la parte media y el tope consta sucesiones de limolitas muy monótonas cuya laminación es plano-paralela, aunque en la sección Cansona 7 se observa un cambio lateral de facies, pasando de facies limosas a facies de chert y ligeramente calcárea (Reporte interno Ecopetrol-ICP, 2010).

Arroyo Peñitas. Esta sección se describe en la base como una sucesión muy potente (50 m aproximadamente) de arenitas calcáreas de grano fino de color gris oliva con matriz lodosa en capas gruesas, estratificación maciza y baja bioturbación. Hacia su parte media, se presentan limolitas silíceas de color gris claro en capas tabulares delgadas a medias con laminación ondulosa y esporádica laminación plano-paralela. En el tope de la sección se observa una sucesión monótona de liditas de color gris oscuro, en capas tabulares delgadas a medias en contacto neto, moderada bioturbación con ichnofósiles y cuarzoarenitas de grano muy fino, en capas medias granocrecientes (modificado de Reporte interno Ecopetrol-ICP, 2010).

Arroyo Columbita. En esta sección la Formación Cansona consiste hacia la base de calizas y limolitas calcáreas de color gris oscuro en capas delgadas, con laminación planoparalela, en contacto neto, baja bioturbación, estratificación ondulosa planoparalela con niveles delgados de chert negro macizo; en su parte media y tope se encuentran paquetes gruesos de limolitas silíceas de color gris claro con intercalaciones de chert, limolitas calcáreas y limolitas. La laminación predominante es paralela y los contactos son netos. Hacia el tope la Formación Cansona consta de Shale de color gris claro en capas delgadas (3 a 10 cm) a medias (10 a 30 cm) contacto onduloso, baja bioturbación, estratificación ondulosa planar, intercalado con arenita de grano fino color gris claro, con cemento calcáreo, en capas delgadas (3 a 10 cm) a medias (10 a 30 cm), tabular, matriz lodosa, buena selección, pobre porosidad (Reporte interno Ecopetrol-ICP, 2010). En esta localidad no se describe la Formación Cansona en su totalidad, sino que fue levantada solo la parte intermedia de dicha unidad. De acuerdo con trabajos previos realizados en la quebrada Columbita (ANH, 2006), en esta quebrada solo aflora el tope de la Formación Cansona, suprayacida por la Formación Arroyo Seco.

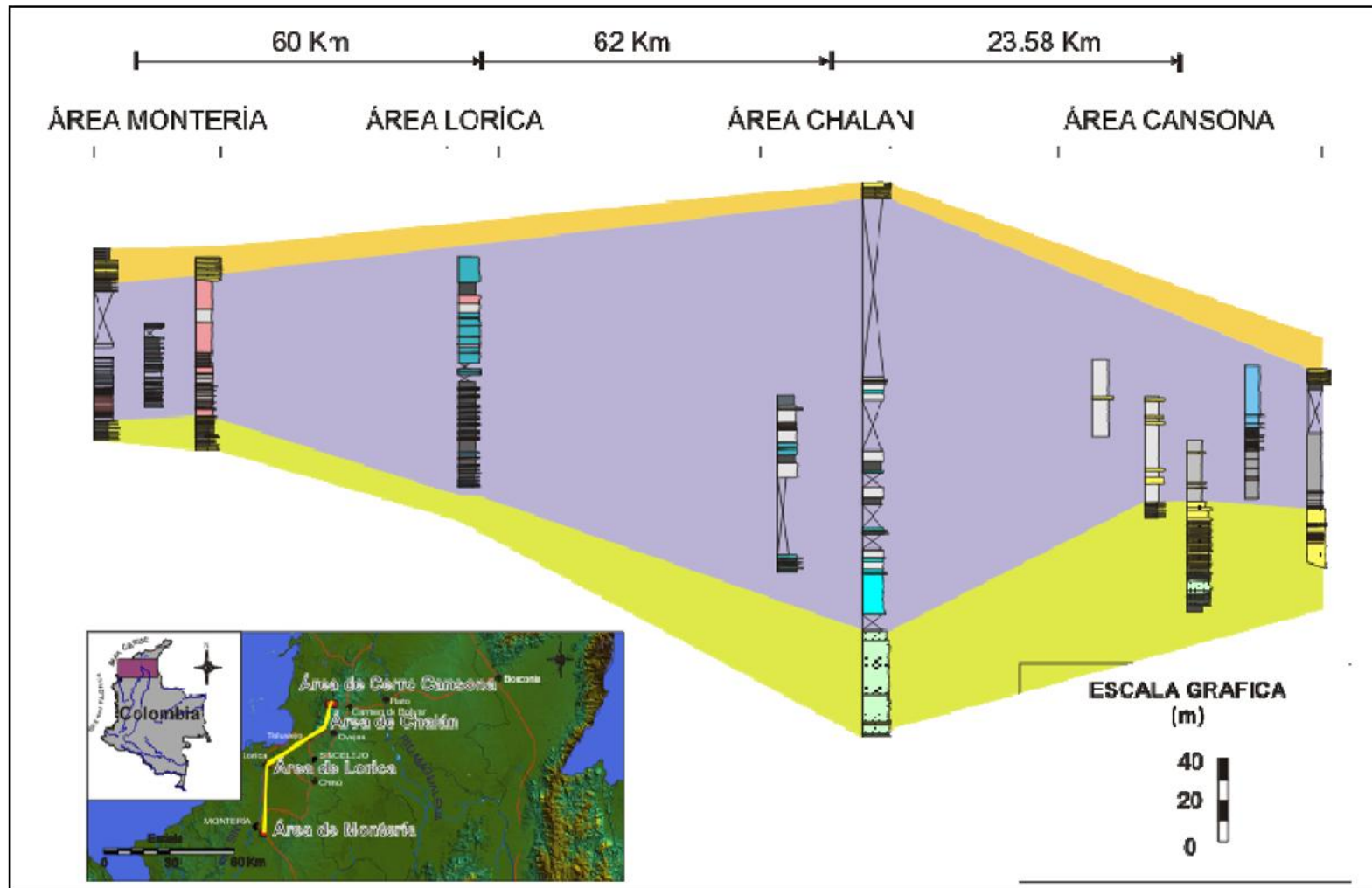


Figura D.1. Correlación litoestratigráfica de las secciones levantadas en campo de la Formación Cansona. (Tomado de reporte interno Ecopetrol-ICP, 2010).

Cantera San Carlos. La Formación Cansona fue descrita en esta sección como una Intercalación de capas gruesas tabulares en contacto neto ondulado, con laminación interna ondulosa plano-paralela y estratificación maciza de caliza con capas medias de (10-20 cm) de chert con pirita diseminada y fosfatos; capa medias (10-20 cm) de shale negro calcáreo hacia la base y su parte media, así como también niveles de limolitas calcáreas con laminación interna plano-paralela. Localmente se observan niveles medios de chert con pirita diseminada y fosfatos. En el tope se encuentran capas muy delgadas (2 a 3 cm), delgadas de 10 cm y medias (20 a 30 cm) tabulares en contacto neto, con laminación interna plano-paralela y estratificación plano-paralela de limolita rojo violáceo. Moderada bioturbación (adaptado de Reporte interno Ecopetrol-ICP, 2010).

Cantera El Purgatorio. En esta cantera fueron levantadas dos secciones estratigráficas. Aquí la Formación Cansona consta en la base de una Sucesión de intercalaciones de: (1) capas medias a gruesas (30 a 40 cm) subtabulares en contacto neto ondulado, con estratificación maciza de arenita de grano medio con moscovita, granos subredondeados, buena selección, baja porosidad, matriz lodosa y cemento silíceo; (2) capas medias (10 a 20 cm) de shale negro muy alterado. Baja bioturbación. En el tope se observa una sucesión de intercalaciones de: (1) capas delgadas (5 a 10 cm) a gruesas (30 a 50 cm) tabulares en contacto neto, con estratificación maciza de arenita de grano medio con granos de cuarzo (93%), líticos (5%) y moscovita (2%), granos subredondeados, buena selección, baja porosidad, matriz lodosa y cemento silíceo. Baja bioturbación; (2) Capas delgadas (5 a 10 cm) de shale negro y limolita silícea (Reporte interno Ecopetrol-ICP, 2010). La sección Purgatorio 2 complementa la sección Purgatorio 1, ubicándose hacia la parte media de esta última sección.

Cantera El Clan. Hacia la base de esta sección, la Formación Cansona es descrita como una “sucesión de intercalaciones de: (1) capas medias (20 a 30 cm) a gruesas (30 a 80 cm) tabulares en contacto neto ondulado, con laminación interna ondulosa planoparalela de arenita de grano fino. Baja bioturbación con

restos de hojas. Con pirita diseminada y glauconita; (2) capas medias (20 a 30 cm) tabulares de lodolita calcárea y shale lustroso. En su parte media consta de intercalaciones de: (1) capas medias (20 a 30 cm) tabulares en contacto neto ondulado, con laminación planoparalela de chert negro; (2) capas medias (20 a 30 cm) tabulares en contacto neto ondulado, con laminación interna planoparalela de arenitas cuarzosas. Con moderada bioturbación presentando foraminíferos. El chert cambia a lidita en bandas nucleadas por chert. Por último, el tope de la sección consiste de capas gruesas (40 a 100 cm) tabulares en contacto inferido de cuarzoarenita de grano medio en contacto discordante con la Formación Cansona (Reporte interno Ecopetrol-ICP, 2010).

ANEXO E. ANALISIS VISUAL DEL KEROGENO

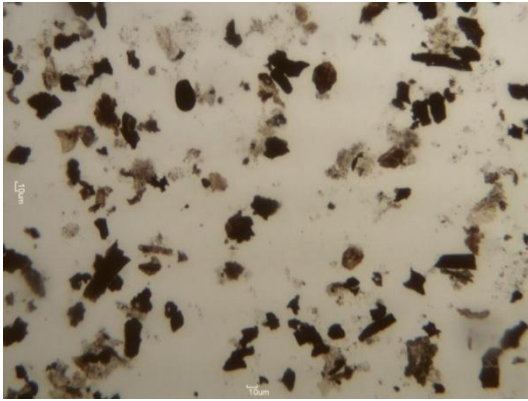


Lámina E.1

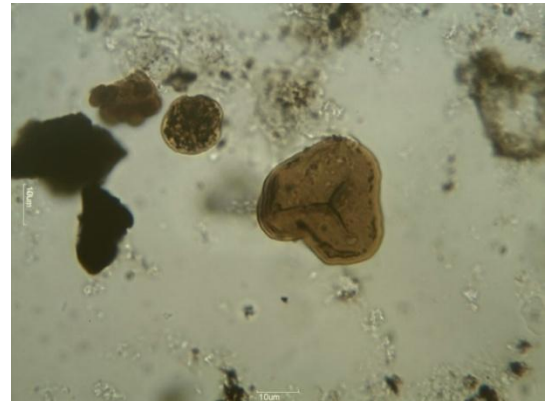


Lámina E.2

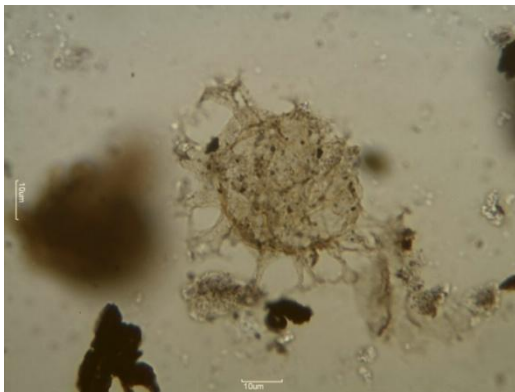


Lámina E.3



Lámina E.4



Lámina E.5

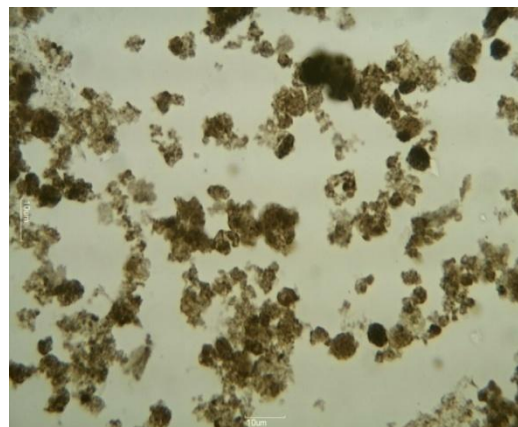


Lámina E.6

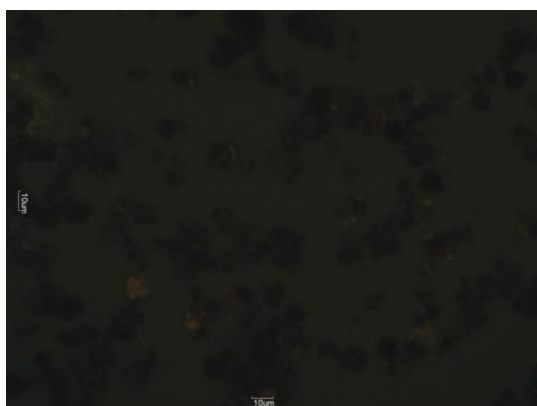


Lámina E.7

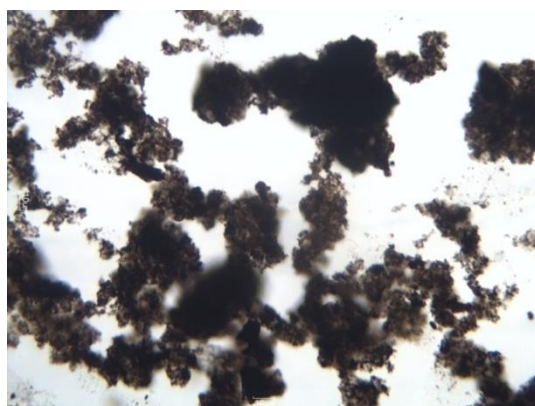


Lámina E.8

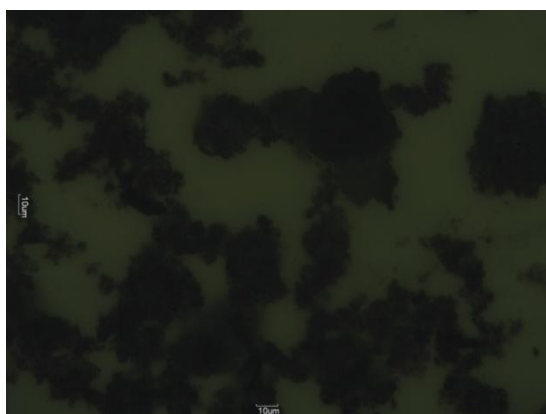


Lámina E.9

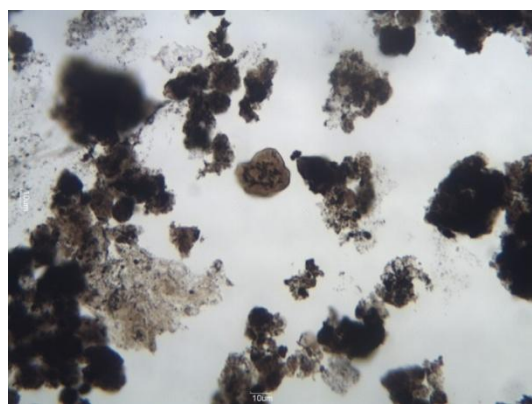


Lámina E.10

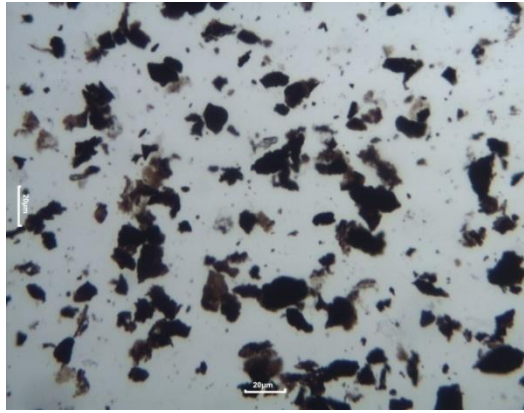


Lámina E.11

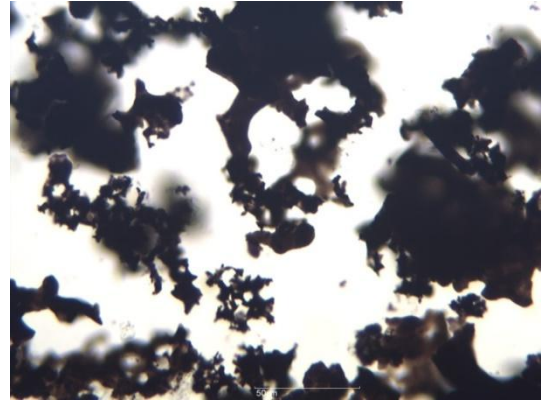


Lámina E.12

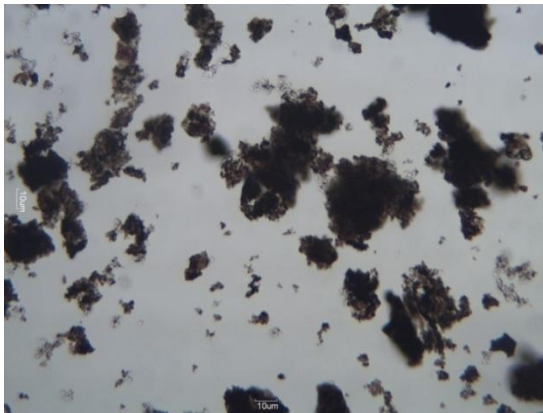


Lámina E.13

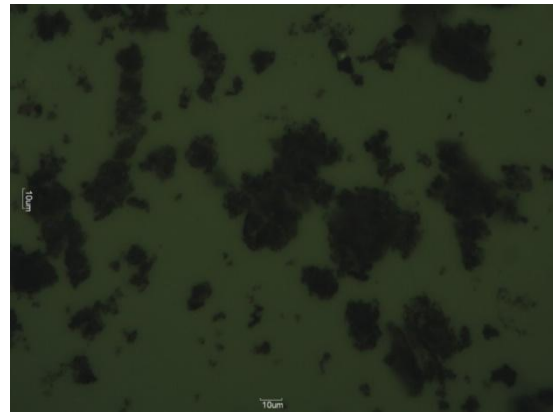


Lámina E.14

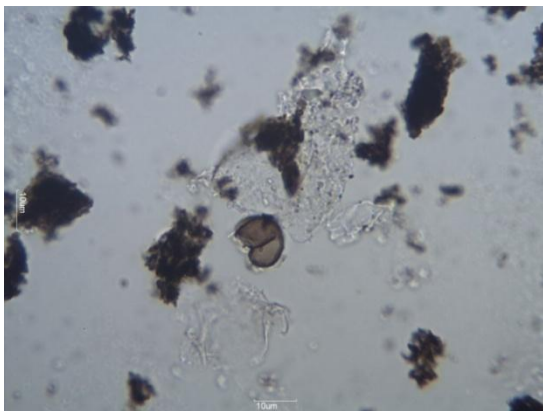


Lámina E.15

DESCRIPCION DE LAS LÁMINAS

Lámina E.1. Materia orgánica de la muestra AP-C-69,1. Se observa predominio en el contenido de fitoclastos opacos; así como también de translucidos.

Lámina E.2. En esta imagen se aprecia la presencia de una espora trilete, un fragmento de una espora verrugada y la cianobacteria *gloeocapsomorpha prisca*, esta última es indicadora de un ambiente marino. Muestra AP-C-114,7.

Lámina E.3. Dinoflagelado Corado en la muestra AP-C-69,1

Lámina E.4. Espora verrugada con ICE de 5-5,5 muestra AP-C-69,1.

Lámina E.5. Foram Test Lining en la muestra AP-C-69,1.

Lámina E.6. Materia orgánica de la sección Columbita. Se aprecia la predominancia de materia orgánica amorfa con fluorescencia moderada. En esta sección fue encontrada también la cianobacteria *gloeocapsomorpha prisca*.

Lámina E.7. MOA de la sección Arroyo Columbita apreciada a través de luz azul ultravioleta incidente.

Lámina E.8. Materia orgánica característica de la Formación Cansona en la sección San Carlos, se caracteriza por presentar materia orgánica amorfa principalmente derivada de fitoclastos, así como fitoclastos amorfizados. Observada con luz normal y objetivo de 20X. Muestra SC-C-3.

Lámina E.9. Materia orgánica de la Formación Cansona en la sección San Carlos observada con luz azul fluorescente. Se aprecia la fluorescencia nula de las partículas. Muestra SC-C-3.

Lámina E.10. Abundante presencia de fitoclastos amorfizados. En la zona central de la imagen se aprecia la presencia de la cianobacteria *gloeocapsomorpha prisca*. Muestra SC-C-15.

Lámina E.11. Materia orgánica característica de la cantera El Clan, predominando los fitoclastos translucidos no bioestructurados.

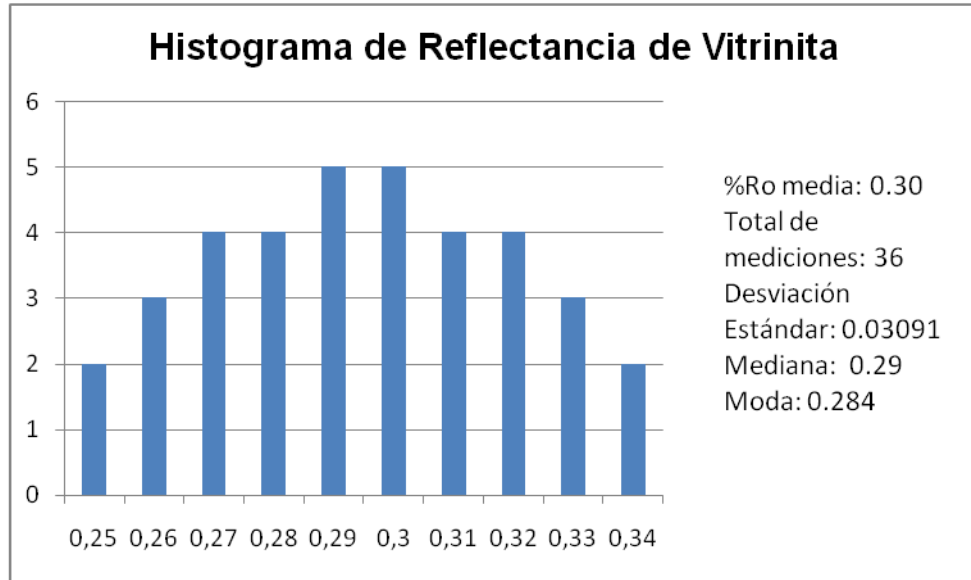
Lámina E.12. Fitoclastos amorfizados debido a alteración termal en la base de la sección Cantera Purgatorio 2.

Láminas M.13 y 14. Materia orgánica de la cantera Purgatorio. Dicha materia orgánica se caracteriza por ser principalmente fitoclastos amorfizados y materia orgánica amorfa derivada de fitoclastos.

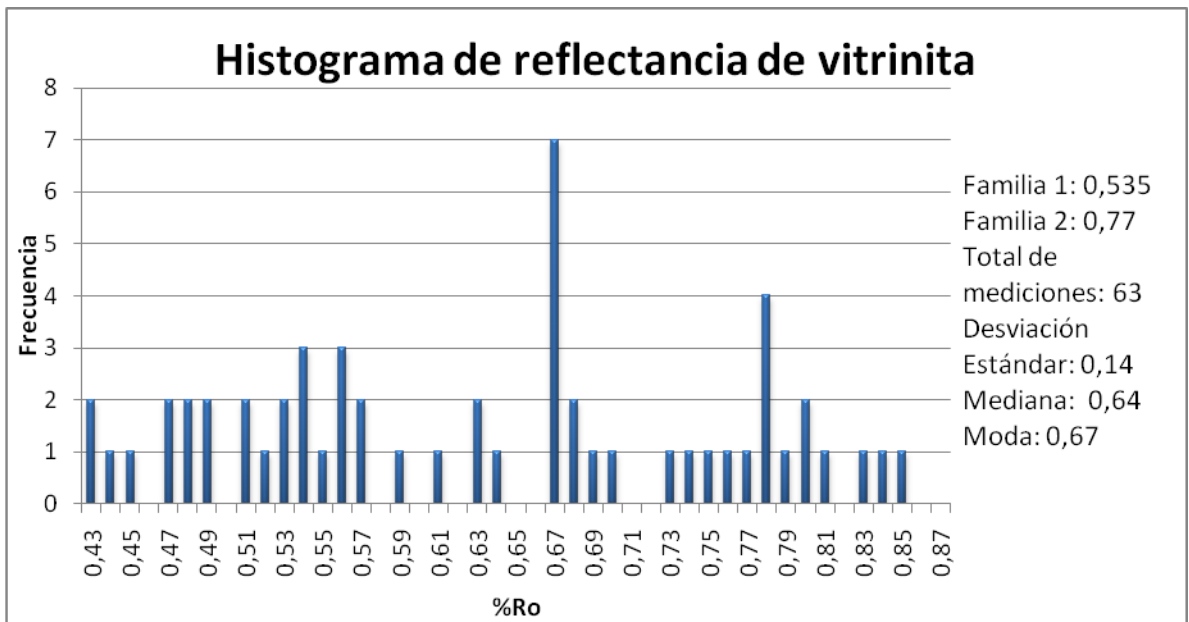
Lámina E.15. Grano de polen roto encontrado en la muestra CP-C-29 de la cantera El Purgatorio.

ANEXO F. HISTOGRAMAS DE REFLECTANCIA DE VITRINITAS PARA TODAS LAS SECCIONES

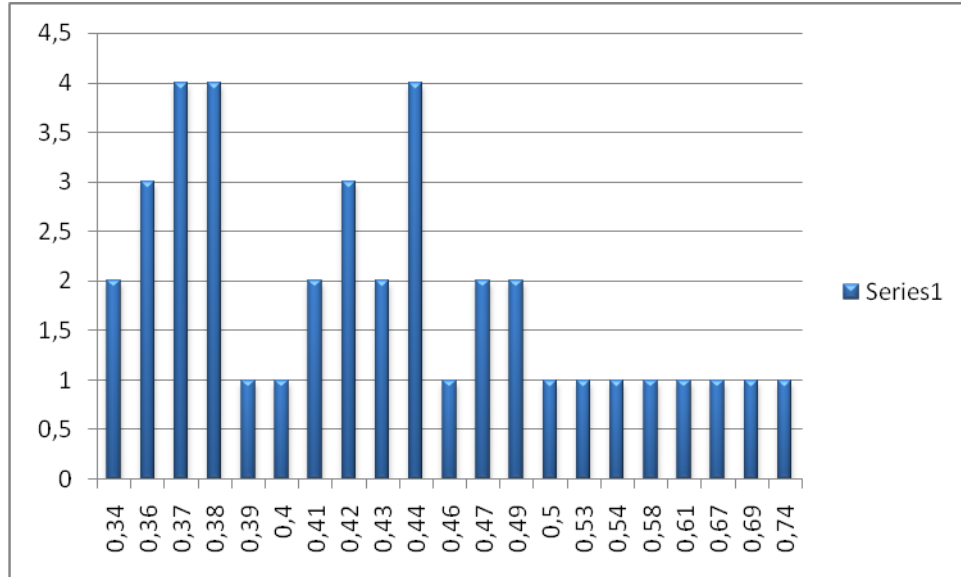
Anexo F-1. Histograma Cerro Cansona CC6-C-8,2



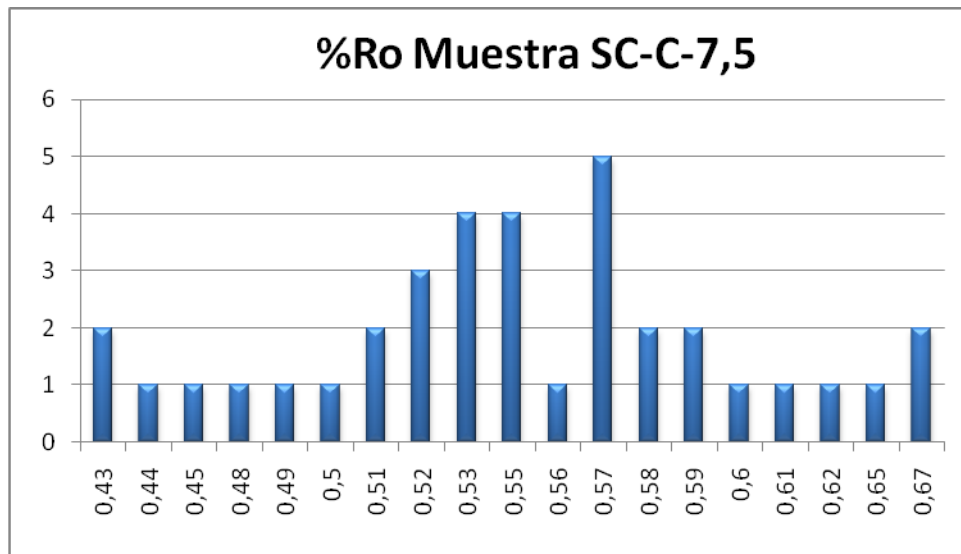
ANEXO F-2. Histograma de la reflectancia de vitrinita de la muestra AP-C-69,1 de la sección Arroyo Peñitas. Se aprecia la presencia de dos familias de vitrinitas, una de una reflectancia promedio de 0,5%Ro y una de 0,73%Ro.



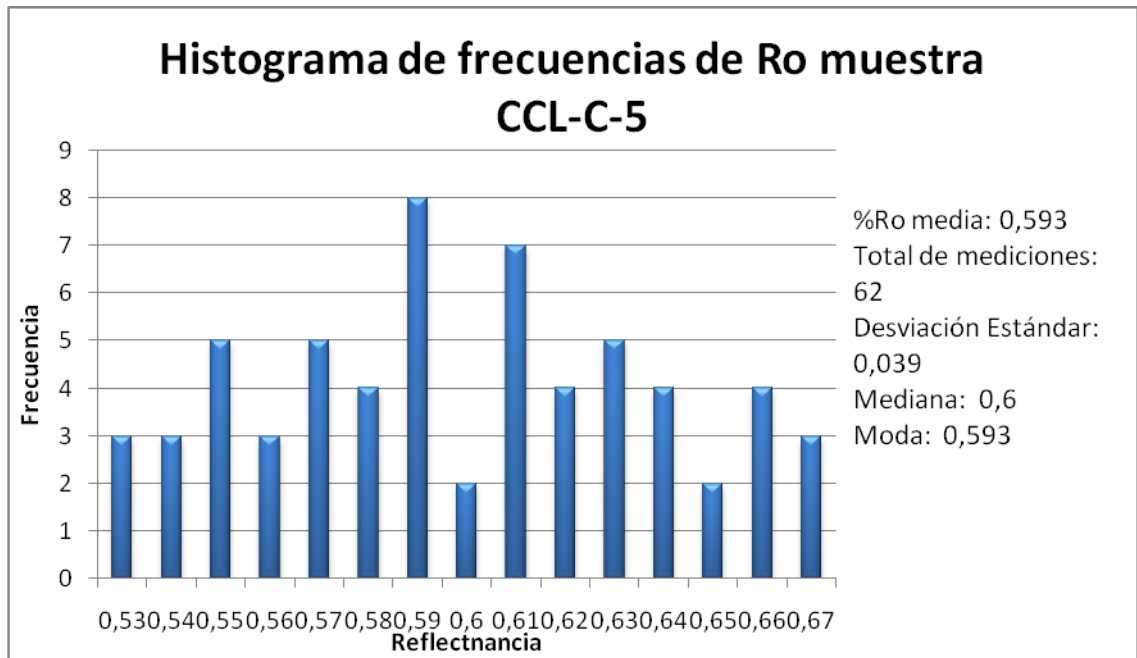
ANEXO F-3. Histograma de reflectancia de la muestra AP-C-114,7.



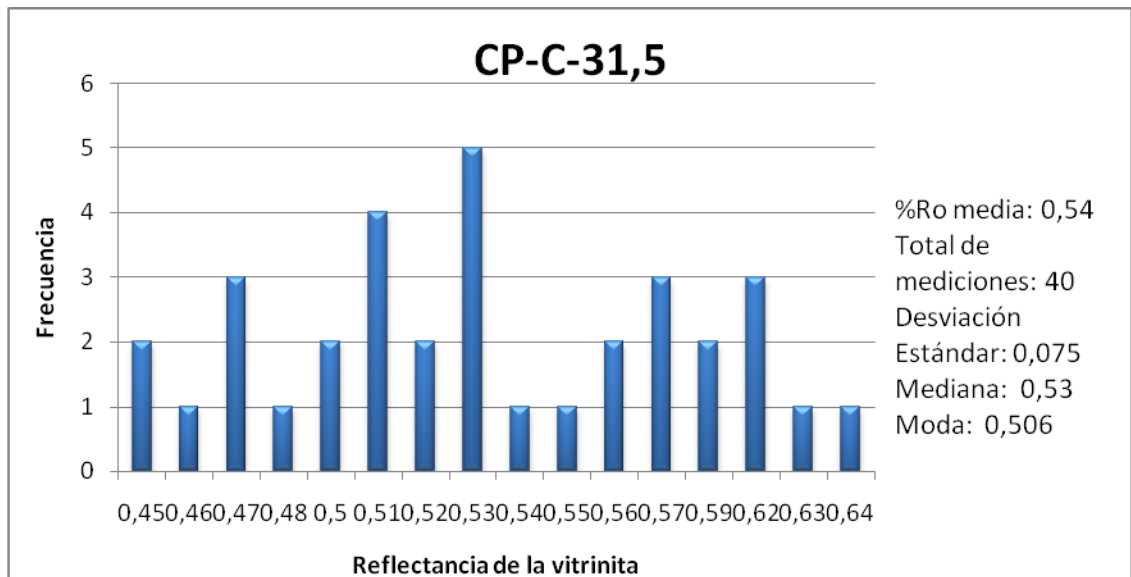
ANEXO F-4. Histograma de distribución de reflectancia de vitrinita de la muestra SC-C-7,5 de la sección Cantera San Carlos.



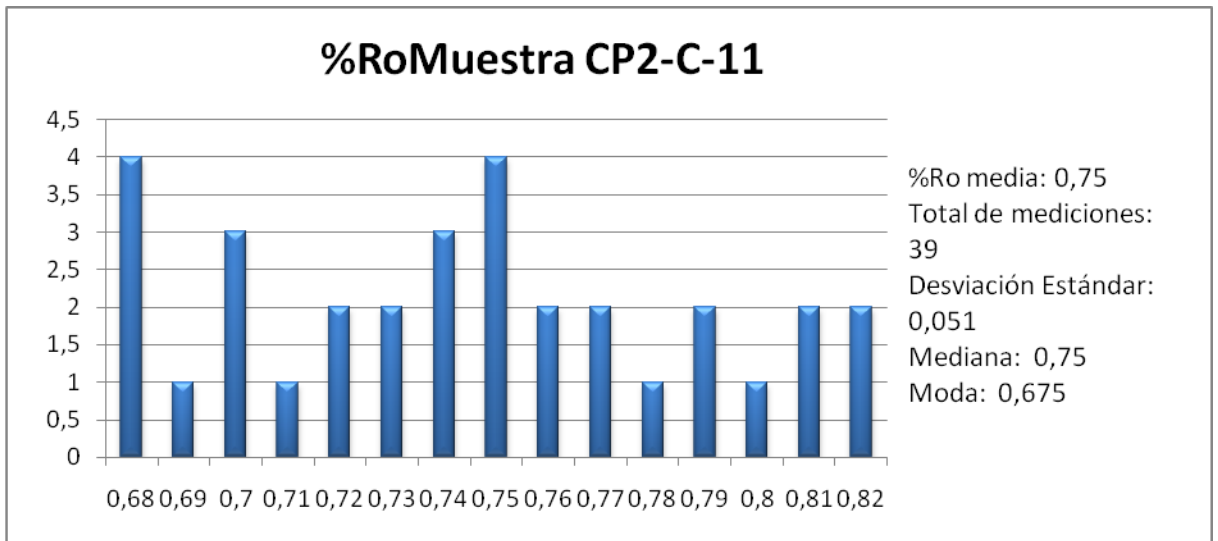
ANEXO F-5. Histograma de frecuencias para la reflectancia de vitrinita de la muestra CCL-C-5 de la sección Cantera El Clan.



ANEXO F-6. Histograma de frecuencias de la reflectancia de vitrinita de la muestra CP-C-31,5 de la cantera El Purgatorio.



ANEXO F-7. Histograma de frecuencia de la reflectancia de la vitrinita de la muestra CP2-C-11



**ANEXO G. ESCALA DE INDICE DE COLORACION DE ESPORAS VS.
REFLECTANCIA DE VITRINITA.**

INDICE DE COLORACIÓN DE ESPORAS

