



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

EVALUACIÓN LITOGEOQUÍMICA DE LA SECUENCIA PERFORADA POR EL POZO MOAMBO-1 CUENCA SINÚ, SAN JACINTO, COLOMBIA

Yeny Milanyela Cortés Puentes


Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias, Departamento de Geociencias
Bogotá, Colombia
2021

EVALUACIÓN LITOGEOQUÍMICA DE LA SECUENCIA PERFORADA POR EL POZO MOAMBO-1 CUENCA SINÚ, SAN JACINTO, COLOMBIA

Yeny Milanyela Cortés Puentes

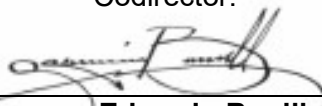
Tesis de investigación presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ciencias Geología

Director:



PhD. Gustavo Adolfo Sarmiento

Codirector:



MSc. German Eduardo Bonilla Osorio

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias, Departamento de Geociencias

Bogotá, Colombia

2021

Dedicatoria

A Dios por llevarme de la mano y guiarme en este camino llamado vida; a mi esposo Óscar por la paciencia, comprensión y ayuda incondicional; a mis angelitos, Gabriel y Lucas, por regalarme una razón más para vivir; a mi familia, en especial a mi madre, y a esos ángeles que me cuidan desde el más allá.

Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.



Yeny Milanyela Cortés Puentes

Fecha 21/01/2021

Agradecimientos

En primer lugar, quiero expresar mi agradecimiento al director de esta tesis de Maestría, el doctor Gustavo Sarmiento, por brindarme las herramientas y el apoyo constante para completar este estudio, y a Germán Bonilla, mi tutor, por todas sus enseñanzas y contribución a mi crecimiento profesional. Agradezco a Inclay, Geología Especializada, y al grupo de investigación Litogeoquímica Aplicada Lattice por el incondicional soporte técnico brindado en este largo proceso.

También quiero expresar mi agradecimiento a la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH), y en especial a Jairo Osorio por el apoyo técnico para este proyecto. A ExxonMobil Exploration, Colombia Limited por el apoyo técnico, financiero y profesional brindado. A Mario García González, quien me brindó sus conocimientos y su apoyo hasta alcanzar los resultados que buscaba.

Por último, quiero agradecer a todos mis amigos y colegas que siempre estuvieron abiertos a discutir dudas técnicas sin esperar nada a cambio.

Resumen

Evaluación litogeoquímica de la secuencia perforada por el pozo Moambo-1 Cuenca Sinú, San Jacinto, Colombia

Para el análisis de las características sedimentarias de la secuencia perforada por el pozo estratigráfico Moambo-1 se usaron técnicas de análisis estratigráfico y sedimentario, lo que permitió definir que el pozo perforó parcialmente las unidades Cansona y San Cayetano, de edades cretácico y paleoceno-eoceno respectivamente, en la cuenca Sinú-San Jacinto. Características como las facies sedimentarias, el índice de cristalinidad de la caolinita y el contenido calcáreo, permitieron determinar que la Formación Cansona se depositó en un ambiente marino *offshore* somero, y que la Formación San Cayetano se depositó en un ambiente transicional que varía de llanura costera hacia la base de las secuencias, a *shoreface* medio hacia el tope de los paquetes. El índice de cristalinidad de la illita (índice de Kübler-IC) permite definir que la secuencia se encuentra en fase de diagénesis baja ($IC < 0.45 \cdot 2\theta$).

Los análisis de geoquímica inorgánica realizados en la Formación San Cayetano permiten definir que los sedimentos tuvieron influencia de flujos volcánicos durante su depositación, esto dado por la presencia de minerales arcillosos de estilbita y cristobalita, los cuales son característicos de episodios volcánicos, adicional a lo anterior, a partir de la ocurrencia del mineral sepiolita, se definieron episodios evaporíticos que se dan por la somerización del ambiente de depósito y colmatación de los flujos sedimentarios, ocasionando evaporación de los sedimentos. Finalmente, a partir de datos existentes en el pozo, de geoquímica orgánica y petrografía, es posible definir que la sección perforada no presenta características de roca fuente (con potencial de generación de hidrocarburos), ni de roca reservorio (dada alta cementación) lo que hace difícil establecer un posible sistema petrolífero activo en la cuenca, a partir de la información obtenida del pozo.

Palabras clave: Ambiente de depositación, Geoquímica Inorgánica, Formación Cansona, Formación San Cayetano, sistema petrolífero.

Abstract

Lithogeochemical Evaluation of the Sequence Drilled by Moambo-1 Well in the Sinú-San Jacinto Basin, Colombia

For the analysis of the sedimentary characteristics of the sequence drilled by the Moambo-1 well, stratigraphic and sedimentary analysis techniques were used, which allowed defining that the well partially drilled the Cansona and San Cayetano formations, of Cretaceous and Paleocene-Eocene ages respectively, in the Sinú-San Jacinto basin. Characteristics such as the sedimentary facies, the kaolinite crystallinity index and the calcareous content, allowed determining that the Cansona Formation was deposited in a shallow offshore marine environment, and that the San Cayetano Formation was deposited in a transitional environment that varies from coastal plain towards the base of the sequences, to middle shoreface towards the top of the packages. The illite crystallinity index (Kübler-IC index) allows defining that the sequence is in a low diagenesis phase (IC $<0.45^\circ 2\theta$).

The inorganic geochemistry analysis conducted in the San Cayetano Formation, allow defining that the sediments were influenced by volcanic flows during their deposition, this given by the presence of stilbite and cristobalite clay minerals, which are characteristic of volcanic episodes, in addition to the above, from the occurrence of the mineral sepiolite, evaporitic episodes were defined which occur due to the shallowness of the deposition environment and filling of the sedimentary flows, causing evaporation of the sediments. Finally, based on existing data in the well, organic geochemistry and petrography, it is possible to define that the drilled section does not present characteristics of source rock (with potential to generate hydrocarbons), nor of reservoir rock (given high cementation), which makes it difficult to establish a possible active oil system in the basin, based on the information obtained from the well.

Keywords: Deposition Environment, Inorganic Geochemistry, Cansona Formation, San Cayetano Formation, Organic Geochemistry, Petroleum System,

Contenido

	Pág.
Resumen	IX
Lista de figuras	XII
Lista de tablas	XV
Introducción	1
Objetivos	5
1. Marco teórico	7
1.1 Evolución tectónica	7
1.2 Geología estructural	9
1.3 Estratigrafía.....	10
1.4 Localización del área de estudio	13
1.5 Información geológica del pozo Moambo-1	15
2. Metodología	25
2.1 Material geológico y muestreo	25
2.2 Descripción litológica.....	27
2.3 Difracción de rayos X	28
2.3.1 Preparación de la muestra	30
2.3.2 Cálculo de cristalinidades en illitas y caolinitas	31
2.4 Fluorescencia de rayos X.....	33
2.5 Geoquímica orgánica	35
3. Resultados	41
3.1 Descripción litológica de base a techo del pozo estratigráfico Moambo-1	41
3.2 Composición mineralógica y análisis elemental.....	48
3.2.1 Análisis de difracción de rayos X	48
3.2.2 Análisis de fluorescencia de rayos X.....	55
4. Discusión	61
4.1 Formaciones Perforadas por el pozo.....	61
4.2 Análisis de incidencia volcánica	63
4.3 Análisis del ambiente de depósito	65
4.4 Análisis geoquímica orgánica	72
5. Conclusiones	77

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1: Diagrama esquemático de la evolución tectónica del noroeste de Colombia ..	8
Figura 1-2: Mapa tectónico del noroccidente de Colombia. CW, cordillera occidental; CC, cordillera central; CO, cordillera oriental; SP, serranía Perijá; MS, macizo de Santa Marta	9
Figura 1-3: Columna estratigráfica generalizada del norte de la cuenca Sinú-San Jacinto	10
Figura 1-4: Superior: localización del pozo estratigráfico Moambo-1 en el mapa tectónico del noroccidente de Colombia, Inferior: localización del pozo estratigráfico Moambo-1. Geología de la Plancha 51 (Lorica)	14
Figura 1-5. Diagrama de Folk de los resultados de la petrografía de la Formación San Cayetano en el pozo estratigráfico Moambo-1.	20
Figura 1-6. Columna estratigráfica del pozo a partir de la descripción litológica, y su respectiva variación en profundidad desde el análisis de petrografía	21
Figura 2-1: Relación de muestras tomadas en el pozo para los propósitos de este estudio	27
Figura 2-2: Relación de la cristalinidad de la caolinita dada por el valor FWHM del pico y el ambiente de depósito	29
Figura 2-3: Superposición de barrido de muestra 1.069 pies, en natural (N), con etilenglicol (EG) y sometida a tratamiento térmico (C). Para el caso de la sepiolita, colapsa al someterse al tratamiento térmico como resultado de la pérdida de H ₂ O en su estructura	31
Figura 2-4: Espectro tratado matemáticamente en la muestra 280' (ajuste lineal en rojo oscuro), pico de interestratificado illita/esmectita en azul, y medida del FWHM para el pico de illita (rojo claro)	32
Figura 2-5: Espectro tratado matemáticamente en la muestra 280' (ajuste lineal en rojo), en donde se muestra el tratamiento aplicado a los picos, separando la fase alterada de la no alterada de la caolinita para obtener un FWHM limpio (línea verde)	33
Figura 2-6: Diagrama de Van Krevelen - cambios de kerógeno por el incremento de calor	37
Figura 3-1: Muestra a 1.134 pies, conglomerado arenoso color pardo con clastos angulares. En el núcleo se evidencian cristales de mica moscovita	41
Figura 3-2. Muestra a 1.051 pies, conglomerado arenoso con clastos angulares, de hasta 2 cm, compuestos por lodolitas	42

Figura 3-3. Muestra a 1.045 pies, litoarenita feldespática, con granos subredondeados a subangulosos, tamaño arena gruesa, moderadamente seleccionados. Granos: cuarzo monocristalino (Qm), cuarzo policristalino, líticos plutónicos, metamórficos (cuarcita y esquistos, LmS), chert, plagioclasas (Pl) y otros líticos	42
Figura 3-4. Muestra a 998,3 pies, litoarenita feldespática, con granos subredondeados a subangulosos tamaño arena gruesa, moderadamente seleccionados. Se observa estratificación plano-paralela	43
Figura 3-5. Muestra a 886 pies, contacto erosivo entre conglomerado arenoso y litoarenita feldespática.....	43
Figura 3-6. Muestra a 854,5 pies, arenisca de grano medio con intraclastos angulares de hasta 10 cm, en la figura se observa un intraclasto de lodolita con laminación plano-paralela	44
Figura 3-7. Muestra a 830,5 pies, areniscas de grano fino con laminación plano-paralela, afectadas por estratificación convoluta	44
Figura 3-8. Muestra a 793,5 pies, areniscas de grano medio con intraclastos subangulares de hasta 5 cm. Se observa un intraclasto de lodolita.....	45
Figura 3-9. Muestra a 769,5 pies arriba y 748 abajo, areniscas cementadas de grano medio con estratificación ondulosa.....	45
Figura 3-10. Muestra a 639 pies, areniscas grano grueso con impregnación de hidrocarburo en los espacios vacíos.....	46
Figura 3-11. Muestra a 518 pies; conglomerado arenoso, clastos angulares de hasta 0,5 cm	46
Figura 3-12. Muestra a 457,8 pies; estructura gravitacional “slump” posdeposicional con estratificación convoluta	47
Figura 3-13. Muestra a 292,5 pies; conglomerado clastosoportado con matriz arenosa. Los clastos son de tamaños de hasta 15 cm, y se componen principalmente de lodolitas	47
Figura 3-14. Corazones a profundidades de 95,5 pies a 117 pies; lodolita silícea, gris oscura	48
Figura 3-15. Corazones a profundidades de 85,7 pies a 94,7 pies; zona de falla, caracterizada por presentar una textura arenosa con fragmentos angulares.....	48
Figura 3-16: Patrón de XRD de la muestra Moambo-1 profundidad 425 pies en análisis de composición de roca total (<i>bulk</i>)	49
Figura 3-17. Mineralogía a partir del análisis de XRD en el pozo estratigráfico Moambo-1 y resultados de medida de cristalinidad de Kübler y caolinita	50
Figura 3-18: Detalle de la sección de 1.281 a 863 pies del pozo estratigráfico Moambo-1.	52
Figura 3-19. Detalle de la sección de 863 a 188 pies del pozo estratigráfico Moambo-1.53	
Figura 3-20. Incidencia de minerales de sepiolita, estilbita, cristobalita, anatasa y albita en el pozo estratigráfico Moambo.1, todos ellos relacionados con el aporte volcánico durante la depositación de la secuencia.....	54
Figura 3-21: Detalle de la sección de 0 a 188 pies en el pozo estratigráfico Moambo-1. 55	
Figura 3-22: Composición elemental del pozo estratigráfico Moambo-1 a partir de análisis de XRF	56

Figura 3-23: Descripción del corazón y análisis de XRD y XRF de la secuencia perforada en el pozo estratigráfico Moambo-1	59
Figura 4-1. Relaciones usadas para la interpretación estratigráfica del pozo estratigráfico Moambo-1.....	63
Figura 4-2: Incidencia de minerales de sepiolita, estilbita, cristobalita, anatasa y albita en el pozo estratigráfico Moambo-1, todos ellos relacionados con el aporte volcánico durante la depositación de la secuencia	65
Figura 4-3. Distribución ambiental de los minerales de arcilla autigénica en ambientes salinos continentales, enfatizando las diferencias entre cuencas con tasas de subsidencia baja vs. Cuencas con subsidencia rápida. Las arcillas autigénicas se forman principalmente en los márgenes de ambientes de lagos salinos.	67
Figura 4-4. Interpretación Aeromagnetogravimétrica del Litoral Caribe Colombiano – Tope del Basamento Pre-Terciario.....	70
Figura 4-5: Modelo de ambiente de depositación de la Formación San Cayetano. La depositación de los conglomerados se da por flujos de tracción y hacia el tope los sedimentos se colmatan y quedan subexpuestos	71
Figura 4-6: Análisis de tipo de kerógeno usando el diagrama de Van Krevelen	74
Figura 4-7: Contenido de materia orgánica TOC en la sección perforada	75
Figura 4-8. Diagrama de la reflectancia de vitrinita en profundidad del pozo estratigráfico Moambo-1.....	76

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1-1: Descripción petrográfica de 21 muestras de roca de los núcleos recuperados del pozo	15
Tabla 1-2. Clasificación petrográfica de las muestras del pozo estratigráfico Moambo-1.	19
Tabla 1-3: Datos de pirólisis (Rock Eval) del pozo estratigráfico Moambo-1.....	22
Tabla 1-4. Datos de reflectancia de vitrinita (Ro) del pozo estratigráfico Moambo-1.....	22
Tabla 1-5. Algunas especies de foraminíferos identificadas en el pozo ANH – Mohambo - 1X y su extensión en el tiempo.....	23
Tabla 2-1: Grado de madurez termal a partir del porcentaje de Ro	38
Tabla 3-1: Minerales presentes interpretados en las muestras del pozo estratigráfico Moambo-1 mediante análisis de XRD	51
Tabla 3-2: Resultados de análisis de fluorescencia de rayos X	57
Tabla 4-1: Principales minerales de arcilla autigénicos en ambientes continentales evaporíticos.....	66

Introducción

En el cinturón plegado Sinú-San Jacinto se ha documentado a las formaciones Cansona y San Cayetano como las unidades sedimentarias más antiguas descritas en la cuenca (Duque-Caro, 1967, 1972, 1973, 1979; Guzmán *et al.*, 1994; Duque-Caro *et al.*, 1996; Geotec, 1997; Guzmán, 2007); sin embargo, estas presentan escasos afloramientos y en la mayoría de los casos se encuentran tectonizadas, con material altamente meteorizado (Guzmán, 2007), lo que impide un estudio estratigráfico detallado el cual es importante para tener un mejor entendimiento de la historia geológica de la cuenca.

La Formación Cansona en la cantera San Carlos se describe en la Memoria explicativa planchas 50, 51, 59, 60, 61, 69, 70, 71, 79 y 80, (Ingeominas, 2003) como una unidad constituida por una secuencia de chert a limolitas de color gris, verde, negro, pardo y rojo interestratificados con lutitas que presentan colores similares, la cual fue depositada en un ambiente marino, que según diversos autores varía de batial profundo con slumps submarinos (Guzmán, 2007) a nerítico medio a batial (Geotec, 1997). Estas características de depositación junto con contenido orgánico total de entre 2 y 11% (Olaya, 1994), permite describir esta unidad como potencial roca generadora de hidrocarburos en la cuenca.

Por otro lado, la Formación San Cayetano presenta atributos de roca reservorio, caracterizada por una secuencia de litoarenitas feldespáticas y arcosas líticas intercaladas con capas gruesas de limolitas (Ingeominas, 2003). Varios autores le atribuyen un ambiente de depositación profundo, afectada por procesos sedimentarios de flujos gravitacionales, en donde las corrientes turbidíticas fueron el principal mecanismo (Duque-Caro, 1972 y 1996; Guzmán, 2007). No obstante, Hincapié *et al.* (2008) afirman que dichas secuencias turbidíticas son de frente deltaico, con areniscas y conglomerados fluviales y de frente costero.

Dadas las diferencias de los ambientes reportados y a la limitada información disponible para estas dos formaciones, aún existen dudas en cuanto al ambiente de depositación y el potencial petrolífero de las mismas.

Con el fin de realizar un análisis sedimentario y geoquímico detallado que permita ampliar el conocimiento de estas unidades y por ende mejorar la historia sedimentaria de la cuenca Sinú-San Jacinto, la ANH perforó el pozo estratigráfico Moambo-1 con recuperación continua de núcleos, el cual tenía como objetivo principal atravesar las formaciones sedimentarias más antiguas documentadas en la cuenca (principalmente la Formación Cansona).

En el presente estudio se involucran nuevos resultados analíticos de núcleos y ripios del pozo estratigráfico Moambo-1, con el fin de precisar los parámetros básicos de las unidades atravesadas por el pozo en cuanto a: 1) facies de las formaciones Cansona y San Cayetano, 2) ambientes de depositación para estas unidades, 3) Fuentes de aporte de los sedimentos, y, 4) cantidad y calidad de la materia orgánica. Esto permitirá establecer las características sedimentarias de estas unidades en el área donde se perforó el pozo, así como establecer si existe un sistema petrolífero Cansona-San Cayetano.

Con esta intención se realizó una revisión de la información existente en la cuenca, para posterior a esto llevar a cabo un análisis de la evaluación litogeoquímica de la sección perforada. Se hizo la descripción litológica y se tomaron muestras para difracción de rayos X-XRD, fluorescencia de rayos X-XRF, petrografía y geoquímica orgánica, que permitió caracterizar litológicamente la secuencia perforada y determinar un ambiente de depósito. Con esta información se asoció dicha secuencia a las unidades descritas en la cuenca y se realizó un replanteamiento del ambiente de depositación en el punto de perforación del pozo y su potencial dentro del sistema petrolífero.

La información obtenida permitió determinar que los escasos metros perforados de la Formación Cansona se depositaron en un ambiente marino offshore somero, con un potencial de generación de hidrocarburos moderado, mientras que, la Formación San Cayetano se depositó en un ambiente transicional a continental, concordante con la interpretación de Hincapié et al. (2008). Adicionalmente, se documentaron evidencias de aporte volcánico y episodios evaporíticos, los cuales se determinaron a partir de la

ocurrencia de minerales arcillosos como la sepiolita. Todas estas características junto con la alta cementación y baja porosidad encontrada en las rocas, permiten establecer que la Formación San Cayetano tiene un potencial bajo como roca reservorio.

Objetivos

- Determinar las facies sedimentarias y caracterizar el ambiente de depósito y la paleogeografía de las formaciones Cansona y San Cayetano a partir de la secuencia perforada por el pozo estratigráfico Moambo-1, mediante el análisis de mineralogía por difracción de rayos X (XRD, por sus siglas en inglés), descripción litológica de muestras, quimioestratigrafía por fluorescencia de rayos X (XRF, por sus siglas en inglés), petrografía y geoquímica orgánica.
- Establecer a partir del análisis litogeoquímico y sedimentológico la(s) unidad(es) perforada(s) por el pozo estratigráfico Moambo-1.
- Determinar mediante análisis litológicos y geoquímicos si en las rocas perforadas por el pozo se presentan características de rocas fuente o rocas reservorio que permitan establecer un sistema petrolífero activo en la cuenca.

1. Marco teórico

1.1 Evolución tectónica

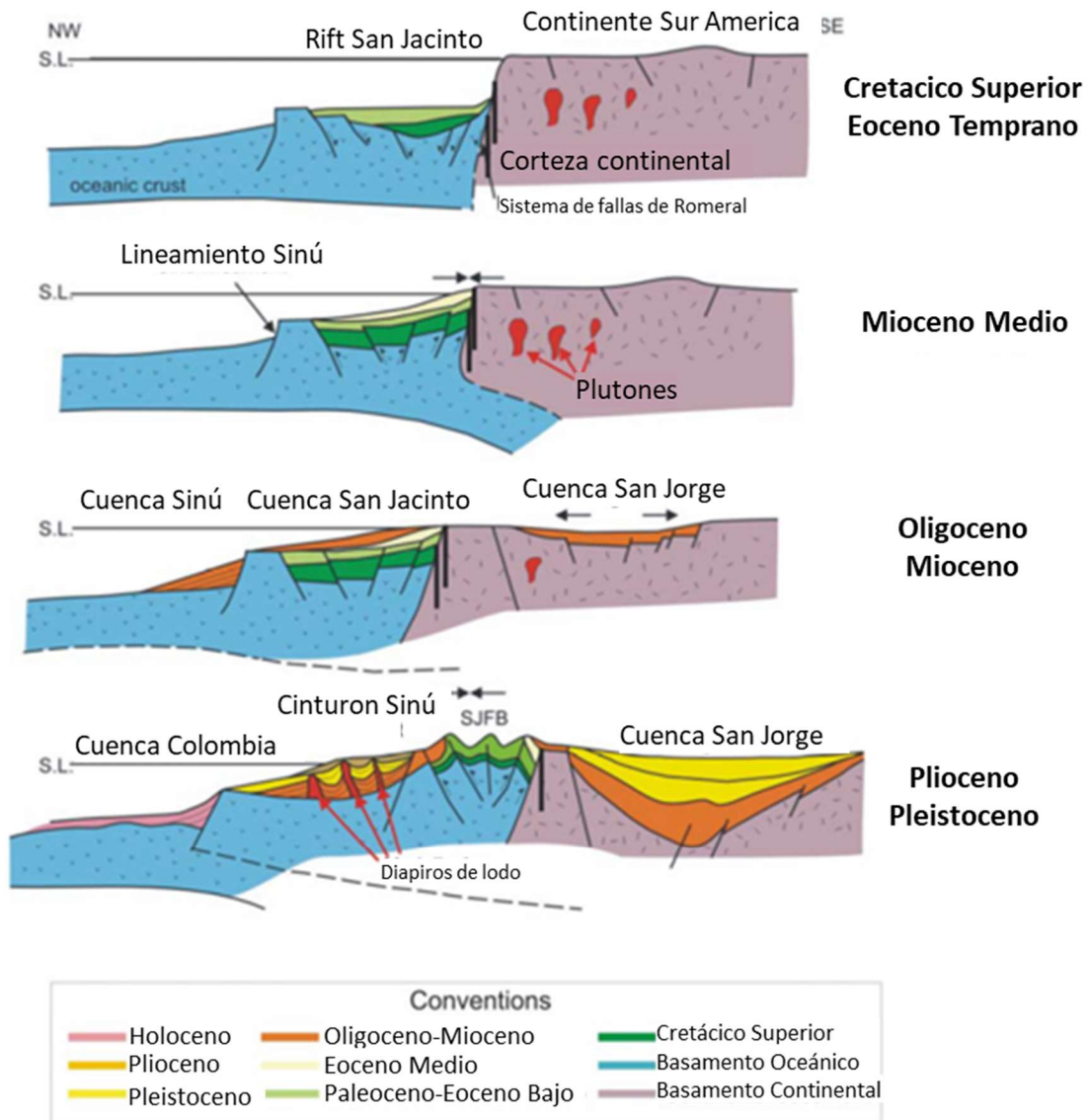
La esquina noroccidental de Colombia se ha interpretado como originada por un prisma de acreción que fue adosado al extremo noroeste de la placa Sudamericana en tres regímenes tectónicos principales: i) movimiento de desplazamiento (*strike-slip*), ii) subducción ortogonal, y iii) subducción oblicua (Pennington, 1981; Gulf, 1983; Kellogg *et al.*, 1985). Estos episodios son el resultado de la colisión entre la placa del Caribe y la placa Sudamericana y la convergencia entre ambas placas de carácter oblicuo (Sykes y Ewing, 1965).

La cuenca Sinú-San Jacinto evidencia en su configuración los eventos tectónicos a los que la misma ha estado sometida, iniciando con un *rifting* Jurásico-Cretácico, en donde se separó Norte América de Sur América (Pindell *et al.*, 1990). Durante el Coniaciano se depositaron rocas orgánicas de aguas profundas sobre gabros y basaltos de la corteza oceánica, al occidente de la falla Romeral (Duque-Caro, 1973), posteriormente, ocurre la entrada de la placa Caribe, donde la sección Cretácica Superior al Paleoceno se podría haber depositado en una zanja, relacionada con la subducción de esta placa, por debajo de la placa Sudamericana.

Durante el Eoceno Superior y el Oligoceno se presenta un movimiento, característico de la placa del Caribe al este, que genera un incremento en la transtensión en el noroeste colombiano, produce fallas oblicuas con componente dextral (falla del Sinú) y afecta sedimentos ya depositados en el nuevo prisma sedimentario activo hasta hoy (Bermúdez e Hincapié, 2008; Flinch, 2003).

Durante el Mioceno, el relleno de la cuenca tipo *piggyback* pasó de ser marino a transicional y finalmente a ser depósitos continentales. Durante el Plioceno al Presente los depocentros sedimentarios se movieron hacia *offshore* (Flinch, 2003).

Figura 1-1: Diagrama esquemático de la evolución tectónica del noroeste de Colombia



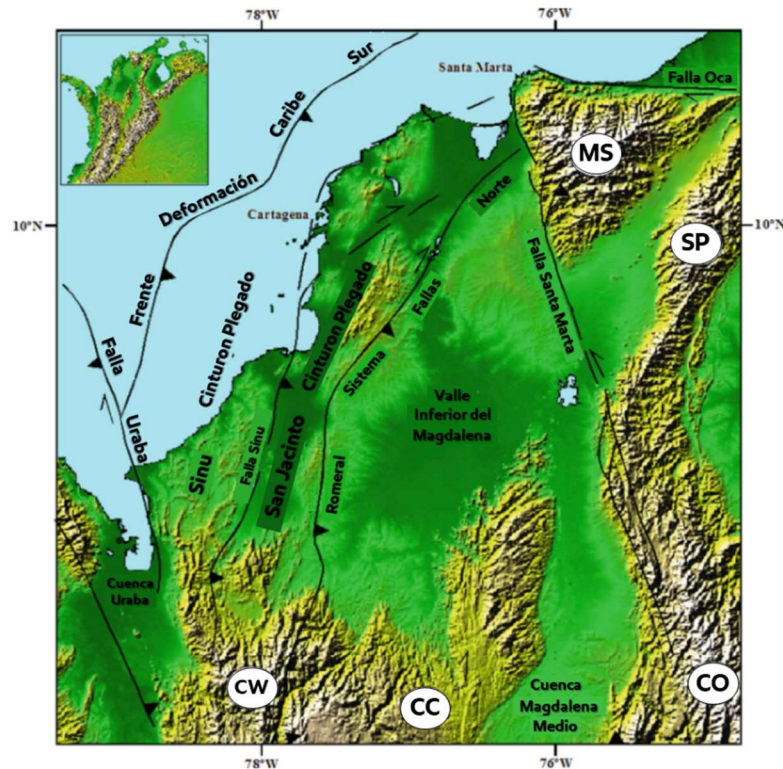
Fuente: Caro (2003).

1.2 Geología estructural

La cuña de Sinú-San Jacinto está limitada al noroeste por la placa del Caribe y al sureste por la zona de falla Romeral (Figura 1-2). La zona de la falla Romeral es una paleosutura que separa las rocas del basamento continental Paleozoico al este de las rocas del basamento oceánico Mesozoico, al oeste. La zona de la falla Sinú separa el cinturón San Jacinto al este del cinturón Sinú, al oeste (Kellogg y Toto, 1992).

En el cinturón San Jacinto se presentan plegamientos con vergencia al noroeste y fallas de cabalgamiento, con dirección aproximada N20°E (Kellogg y Toto, 1992), en contraste, el cinturón Sinú se caracteriza por la presencia de volcanes de lodo, domos y diapiros, los cuales fueron originados por la movilización de lodolitas de alta presión durante el Oligoceno-Mioceno (Kellogg y Toto, 1992).

Figura 1-2: Mapa tectónico del noroccidente de Colombia. CW, cordillera occidental; CC, cordillera central; CO, cordillera oriental; SP, serranía Perijá; MS, macizo de Santa Marta



Fuente: Mantilla-Pimiento *et al.*, 2009.

1.3 Estratigrafía

La cuenca Sinú-San Jacinto se caracteriza por las unidades representadas en la

Figura 1-3, que han sido descritas por varios autores (Duque-Caro, 1967, 1972, 1973, 1979; Guzmán *et al.*, 1994; Duque-Caro *et al.*, 1996; Geotec, 1997; Guzmán, 2007). A continuación, se describe la base de la secuencia (de base a tope), correspondiente a las unidades de interés para el presente estudio.

Figura 1-3: Columna estratigráfica generalizada del norte de la cuenca Sinú-San Jacinto

			Cinturón de San Jacinto Sur				
Tiempo			Formación	Espesor (m)	Litología	Descripción litológica	
Periodo	Época						
Cuaternario	Holoceno					Depósitos aluviales y terrazas recientes	
	Pleistoceno						
NEÓGENO	Plioceno	T	El Cerrito	300-900		Intercalaciones de arcillolitas y areniscas	
		Tm					
	Mioceno	T					
		M					
		Tm					
	PALEÓGENO	Oligoceno	T	El Floral	400		Arcillolitas y lodolitas. Hacia la base areniscas de grano fino
M							
Eoceno		T					
		M					
	Paleoceno	Tm	San Cayetano	600-1200		Secuencia de areniscas conglomeráticas a areniscas de grano fino, intercaladas con lodolitas	
Cretáceo	Superior		Cansona	100-600		Limolitas silíceas con chert, calizas, arcillolitas y areniscas de grano fino	
			Basaltos Nuevo Paraíso			Basamento oceánico	
			Peridotitas Planeta Rica				

Fuente: Caro, 2009 (Modificada de Ecopetrol, 1991)

a. Basamento

El basamento oceánico consiste en un complejo acrecionario que está expuesto al occidente de Urabá, a lo largo del istmo de Panamá y, localmente, en la parte de la región de Montería (Ingeominas, 1997). Está formado de gabro, basalto, capas de lava del Cretácico Superior, e intruído por monzodioritas, monzonitas, sienita y gabros paleocenos (Ingeominas, 1997).

b. Formación Cansona

Referencia original: la Formación Cansona fue nombrada por Duque-Caro (1972) para denominar ciclos tectono-sedimentarios. En la Cantera San Carlos se encontraron *Guembalina sp.* y *Dictyomitia* que sugieren una edad Coniaciano-Campaniano (Duque, 1972, Geotec 2003).

Espesor: en la sección tipo (cerro Cansona) se estima un espesor entre los 100 y 200 metros (Ecopetrol, 2001a y b).

Litología: constituida principalmente por cherts, limolitas silíceas y ocasionales capas de lodolitas calcáreas, de acuerdo con la cartografía del Ingeominas; planchas 36-37, 44, 51, 52, 61, 62, 72 7 80 (Guzmán *et al.*, 2004).

El pozo estratigráfico Moambo-1 se perforó en la Cantera San Carlos al oriente de Lorica, donde se reporta en superficie la Formación Cansona (Ingeominas plancha 51), en este punto se describe como una unidad con interestratificación de capas delgadas de chert, micritas, limolitas silíceas rojizas, negras, grises y verdes con shales de colores similares (Ecopetrol, 2001a y b). Los afloramientos descritos en la cantera no presentan una continuidad normal debido a fallas de compresión, a replegamientos y cambios fuertes de buzamiento, lo que permite inferir que esta formación en el punto de la Cantera se encuentra tectónicamente alterada (Ecopetrol, 2001a y b).

La discordancia entre la Formación Cansona y las formaciones suprayacentes corresponde a un hiato que indica la erosión de la misma durante el Paleoceno Temprano (Aguilera, 2011).

Ambiente de depositación: batial profundo a pelágico, por la presencia de foraminíferos planctónicos, coccolitofóridos y radiolarios (Guzmán *et al.*, 2004).

c. Formación San Cayetano

Referencia original: la Formación San Cayetano fue definida por Chenevart (1963) como una sucesión arenosa aflorante en los Montes de María y en la serranía de San Jacinto.

Edad: Paleoceno Inferior y Eoceno Medio (Duque-Caro, 1967). Guzmán *et al.* (2004) indica que la fauna de la Formación San Cayetano corresponde a las zonas planctónicas P.3 a P.9 y a las zonas bentónicas de *Rzehakina epigona* y *Spiroplectamina*, correspondientes a Paleoceno tardío-Eoceno temprano.

Espesor: según Duque-Caro (1973) tiene un espesor de 1.000 metros para lo que se denomina grupo Cansona (incluye a la Formación Cansona), con engrosamiento hacia el noroeste. Guzmán *et al.* (2004) le asigna un espesor de 240 metros, mientras que Reyes y Zapata (2001) le asignan un espesor de 500 metros.

Litología: conformada por secuencias granodecrecientes de litoarenitas arcósicas, que van desde conglomeráticas hasta grano fino, y son generalmente de color café amarillento, por alteración a verde oliva oscuro en muestra fresca, y de cemento silíceo, localmente calcáreo, mal seleccionadas (Guzmán *et al.*, 1994). Presentan 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 *et al.*, 1994). El Instituto Colombiano de Geología y Minería las caracteriza como arenitas de grano grueso, conglomeráticas hacia la base y fino hacia el techo de las capas; compuestas principalmente por cuarzo, cherts, feldespatos alterados, moscovita y glauconita y en algunos sectores presentan materia orgánica (Ingeominas, 2003). Estudios petrográficos detallados indican que la composición de las arenas corresponde, de manera

predominante, a litoarenitas feldespáticas, en las cuales los fragmentos son volcánicos (Gálvez, 1998).

Ambiente de depositación: abanico submarino en su parte media a distal, de acuerdo con Reyes y Zapata, (2001). Mientras que Duque-Caro (1973) le atribuyen un ambiente turbidítico debido a la presencia de series de Bouma. Hincapié *et al.* (2008) afirman que dichas secuencias turbidíticas son de frente deltaico, con areniscas y conglomerados fluviales, y de frente costero.

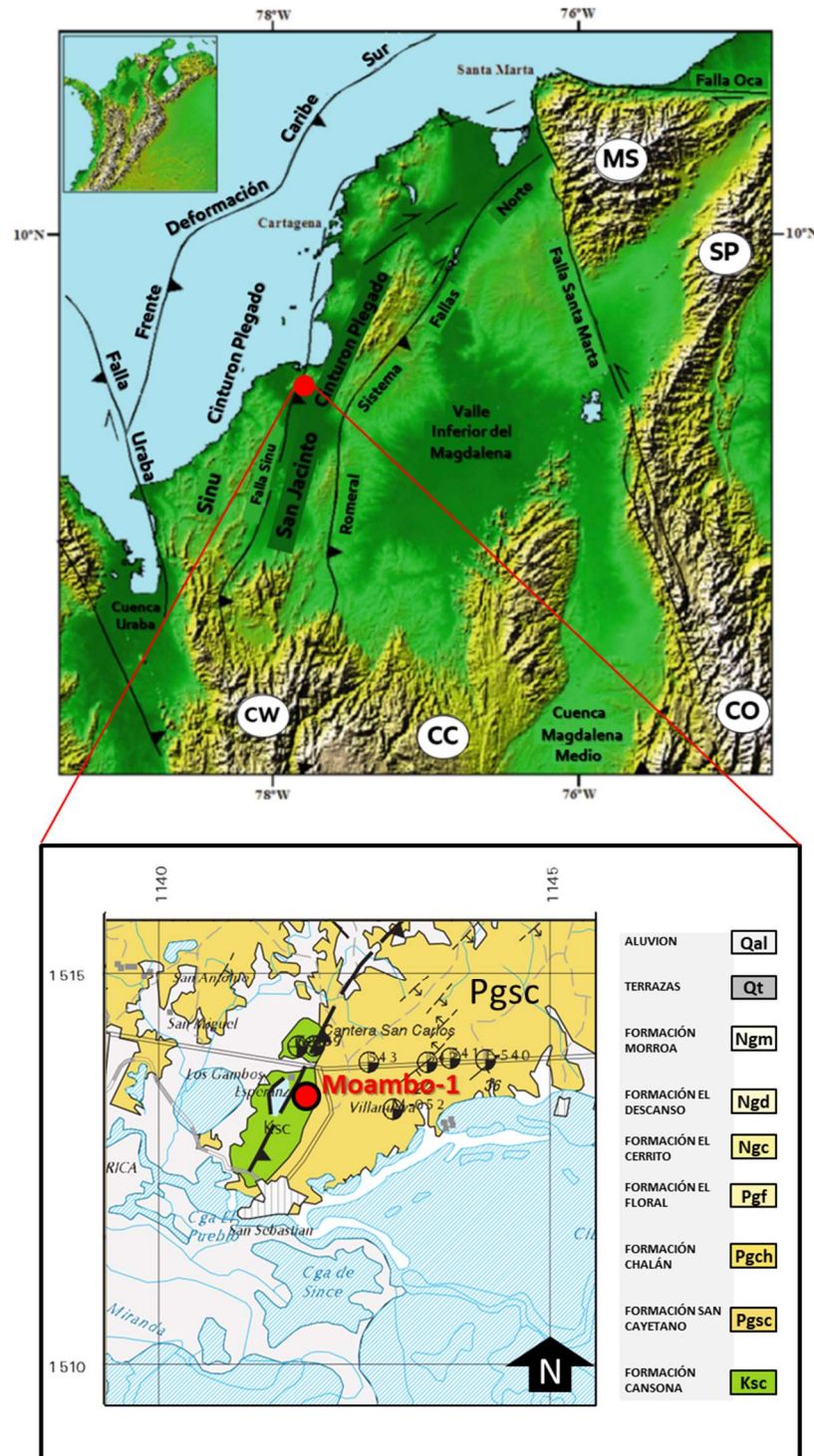
Recientemente en análisis estratigráficos detallados realizados en el área de Chalán-Toluviejo (ATG, 2009) y en pozos someros en plegamientos de San Jacinto (Universidad de Caldas, 2009) demuestran que la depositación de esta unidad se dio en ambientes relacionados con abanicos, generalmente por encima del efecto de las tormentas, donde hay una intensa actividad de organismos bentónicos. La Universidad de Caldas (2009) reporta la existencia de bivalvos y gasterópodos, con lo que se sugirió ambientes de transicionales a fluviales.

1.4 Localización del área de estudio

El área de estudio corresponde al pozo estratigráfico Moambo-1, ubicado en la cuenca Sinú-San Jacinto, al noroccidente de Colombia, dentro del departamento de Córdoba, municipio de Lorica, corregimiento de San Sebastián.

El pozo se encuentra localizado en las coordenadas planas con Datum Magna Sirgas, origen Bogotá X: 1.141.856 y Y: 1.513.333, al suroeste de la cantera San Carlos, la cual, según la memoria explicativa de la Geología de la Plancha 51 (Lorica) de Ingeominas (1999), se describe a la unidad aflorante como correspondiente a la Formación Cansona (Figura 1-4).

Figura 1-4: Superior: localización del pozo estratigráfico Moambo-1 en el mapa tectónico del noroccidente de Colombia, Inferior: localización del pozo estratigráfico Moambo-1. Geología de la Plancha 51 (Lorica)



Fuente: Arriba, Mantilla-Pimiento *et al.*, 2009. Abajo: Ingeominas (1999).

1.5 Información geológica del pozo Moambo-1

Dentro del marco del “Proyecto Caribe ANH” la Universidad de Caldas llevó a cabo análisis de petrografía, geoquímica orgánica y bioestratigrafía.

Clasificación petrográfica:

La descripción petrográfica del pozo se tomó del reporte “Informe final de Petrografía Pozo ANH-Moambo-1” (Universidad de Caldas, 2016b) donde se describe la petrografía de 21 muestras de roca de los núcleos recuperados del pozo. La siguiente tabla resume los resultados contenidos en el reporte mencionado:

Tabla 1-1: Descripción petrográfica de 21 muestras de roca de los núcleos recuperados del pozo

Muestra (Prof. en pies)	Descripción petrográfica	Tamaño de grano (mm)	Porosidad (%)
208,0	Arcosa lítica: granos subredondeados a subangulosos y bien seleccionados. Matriz arcillosa, texturalmente inmadura. Compuesta por cuarzo monocristalino; en menor proporción ocurren las plagioclasas, los líticos plutónicos, granos reemplazados y las micas.	Arena muy fina (0,113)	No se observa
292,5	Arcosa lítica: texturalmente submadura. La roca sufrió intenso fracturamiento y cementación, dándole aspecto de microbrecha. Compuesta por cuarzo monocristalino.	Arena muy fina (0,080)	0,7
335,5	Arcosa lítica: con granos subredondeados a subangulosos bien seleccionados, y con abundantes fracturas rellenas de cemento calcáreo, que localmente le dan aspecto de microbrecha. Roca sea texturalmente inmadura. Compuesta de cuarzo monocristalino. Se observan fracturas rellenas de bitumen.	Arena muy fina (0,080)	Baja
404,8	Arcosa lítica: subangulares a subredondeados, y moderadamente bien seleccionados. Roca texturalmente inmadura. Compuesta de cuarzo monocristalino (Qm), plagioclasa, chert y micas. Los minerales calcáreos generalmente ocurren como cementos y reemplazando granos.	Arena muy fina (0,097)	Baja

Muestra (Prof. en pies)	Descripción petrográfica	Tamaño de grano (mm)	Porosidad (%)
462,0	Litoarenita feldespática: con granos subredondeados a subangulosos, bien seleccionados. Roca texturalmente inmadura. Compuesta por cuarzo monocristalino (Qm), micas, granos reemplazados, cuarzo policristalino, feldespatos, materia orgánica y fragmentos lutíticos.	Arena muy fina (0,080)	Baja
604,6	Mudstone: la matriz es predominantemente calcárea, pero son comunes los granos de cuarzo dispersos en ella. Son evidentes las galerías (icnofósiles, lcn; posible <i>Phycosiphon</i>), generadas por la actividad biológica. Fósiles, micas, materia orgánica y feldespatos son componentes menores de la roca.	N/A	No se observa
658,2	Litoarenita feldespática: con granos subredondeados a subangulares de tamaño medio, pobremente seleccionados. Roca texturalmente inmadura. Compuesta de cuarzo monocristalino, cuarzo policristalino, plagioclasas, chert, y líticos cuarcíticos, volcánicos, y de lutitas.	Arena media (0,418)	0,3
727,5	Litoarenita feldespática: de grano medio inferior; los granos son subangulares a angulares y pobremente seleccionados. Roca texturalmente inmadura. Compuesta de cuarzo monocristalino, cuarzo policristalino, plagioclasas y fragmentos líticos, comúnmente chert, líticos plutónicos y metamórficos.	Arena media (0,250)	0,7
786,5	Subarcosa: granos subredondeados a redondeados de tamaño muy fino y selección moderada. Roca texturalmente submadura. Compuesta de cuarzo monocristalino, cuarzo policristalino y micas. También ocurren plagioclasas, fragmentos líticos y materia orgánica.	Arena muy fina (0,100)	No se observa
791,8	Grawaca feldespática-subarcosa: localmente fosilífera, con granos muy finos, subangulares a subredondeados, y moderadamente seleccionados. Roca texturalmente inmadura. La roca es muy calcárea, y las frecuentes fracturas rellenas de carbonatos de manera local le dan aspecto de microbrecha. Compuesta de cuarzo monocristalino, fósiles (radiolarios) y plagioclasas. También se encuentran micas y materia orgánica.	Arena muy fina (0,073)	Baja
830,5	Grawaca feldespática-subarcosa: texturalmente inmadura, con granos subangulares a subredondeados muy finos y moderadamente bien seleccionados. Compuesta de cuarzo monocristalino y micas, acompañados en cantidades menores por plagioclasas, cuarzo policristalino y materia orgánica.	Arena muy fina (0,124)	Baja
856,7	Litoarenita feldespática: granos subredondeados gruesos, pobremente seleccionados. Roca texturalmente inmadura. Compuesta de cuarzo monocristalino, cuarzo policristalino,	Arena gruesa	0,4

Muestra (Prof. en pies)	Descripción petrográfica	Tamaño de grano (mm)	Porosidad (%)
	fragmentos líticos plutónicos y de cuarcita, al igual que de feldespatos. Los fósiles (foraminíferos bentónicos) y la materia orgánica son accesorios comunes.	(0,602)	
859,5	Litoarenita feldespática: texturalmente submadura, con granos subredondeados de tamaño medio pobremente seleccionados. Compuesta de cuarzo monocristalino, cuarzo policristalino, chert, líticos plutónicos, metamórficos, lutitas y plagioclasas. Accesorios comunes incluyen fósiles, como foraminíferos bentónicos y algas rojas, al igual que glauconita y micas.	Arena media (0,463)	No se observa
868,5	Litoarenita feldespática: granos subangulares a angulares de tamaño medio, moderadamente seleccionados. Roca texturalmente inmadura. Compuesta de cuarzo monocristalino, cuarzo policristalino, plagioclasas, chert y otros fragmentos líticos. Las micas constituyen accesorios muy comunes.	Arena media (0,293)	Trazas
875,5	Litoarenita feldespática: con granos subredondeados a angulares de tamaño muy fino. Roca texturalmente madura. Compuesta de cuarzo monocristalino y, en menos proporción, por micas, cuarzo policristalino, chert, plagioclasa, granos reemplazados y líticos variados; la pirita ocurre en cantidades menores. Las múltiples fracturas rellenas de carbonatos le dan a la muestra, localmente, aspecto de microbrecha.	Arena muy fina (0,100)	No se observa
885,8	Arcosa lítica: ligeramente arcillosa de grano fino; los granos son subredondeados a subangulares y bien seleccionados. Roca texturalmente inmadura. Compuesta de cuarzo monocristalino, plagioclasas, granos reemplazados, cuarzo policristalino y fragmentos líticos varios. La calcita (cal) es abundante, relleno espacios intergranulares y fracturas, así como de manera local reemplazando granos.	Arena fina (0,131)	No se observa
936,2	Arcosa lítica: granos predominantemente subangulares de tamaño medio, y moderadamente seleccionados. Roca texturalmente submadura. Compuesta de cuarzo monocristalino, cuarzo policristalino, plagioclasas, chert y, en menor proporción, otros fragmentos de roca, como líticos volcánicos.	Arena media (0,329)	No se observa
984,5	Arcosa lítica: texturalmente submadura, con granos finos predominantemente subangulares, moderadamente bien seleccionados. Compuesta de cuarzo monocristalino, plagioclasas, cuarzo policristalino; en menor proporción fragmentos líticos, granos reemplazados.	Arena fina (0,133)	No se observa

Muestra (Prof. en pies)	Descripción petrográfica	Tamaño de grano (mm)	Porosidad (%)
1040,5	Litoarenita feldespática: texturalmente submadura, con granos subredondeados a subangulosos. Arena gruesa, granos moderadamente seleccionados. Compuesta de cuarzo monocristalino, cuarzo policristalino, líticos plutónicos, metamórficos (cuarcita y esquisto), chert, plagioclasas y otros líticos. El cemento de calcita (cal) es abundante, y ocluye casi todo el espacio intergranular y las fracturas que atraviesan la muestra. Baja porosidad.	Arena gruesa (0,644)	0,7
1103,4	Mudstone: ligeramente limosa y localmente fosilífera. La abundante matriz calcárea, compuesta de cuarzo monocristalino, de plagioclasa y micas. Igualmente, ocurren algunos fósiles, entre ellos de radiolarios y foraminíferos aglutinantes. También ocurren glauconita, y materia orgánica.	N/A	Baja
1113,9	Litoarenita feldespática: con tamaño promedio arena muy fina; los granos son angulosos a subangulosos, bien seleccionados. Roca texturalmente inmadura. Compuesta de cuarzo monocristalino, plagioclasas, cuarzo policristalino, chert, y otros líticos varios. Los accesorios consisten de micas, glauconita, materia orgánica y fósiles (foraminífero bentónico).	Arena muy fina (0,093)	No se observa

Fuente: Modificado Universidad de Caldas (2016b).

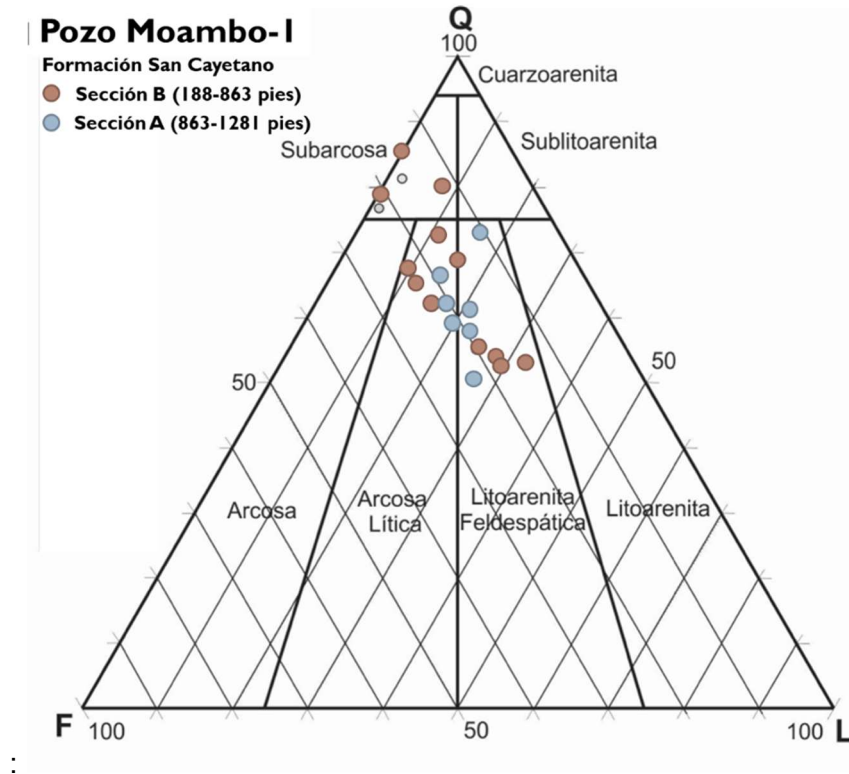
La clasificación petrográfica de las muestras se resume en la Tabla 1-2 y la Figura 1-5

Tabla 1-2. Clasificación petrográfica de las muestras del pozo estratigráfico Moambo-1.

Fm	Segmento	Prof (ft)	Clasificación Petrográfica	Tamaño de Grano (mm)		Porosidad (%)	Curva Granulométrica
San Cayetano	B	208	Arcosa Lítica	0,113	Arena Muy Fina		
		292,5	Arcosa Lítica	0,08	Arena Muy Fina	0,7	
		335,5	Arcosa Lítica	0,08	Arena Muy Fina		
		404,8	Arcosa Lítica	0,097	Arena Muy Fina		
		462	Litoarenita Feldespática	0,08	Arena Muy Fina		
		604,6	Mudstone		N/A		
		658,2	Litoarenita Feldespática	0,418	Arena Media	0,3	
		727,5	Litoarenita Feldespática	0,25	Arena Media	0,7	
		786,5	Subarcosa	0,1	Arena Muy Fina		
		830,5	Subarcosa	0,124	Arena Muy Fina		
		856,7	Litoarenita	0,602	Arena	0,4	
	858,5	Litoarenita	0,294	Arena Media	1,27%		
	885,8	Litoarenita	0,131	Arena Fina			
	A	936,2	Arcosa Lítica	0,329	Arena Media		
		984,5	Arcosa Lítica	0,133	Arena Fina		
		1040,5	Litoarenita Feldespática	0,644	Arena Gruesa	0,7	
1103,4		Mudstone		N/A			
1113,9		Litoarenita Feldespática	0,093	Arena Muy Fina			

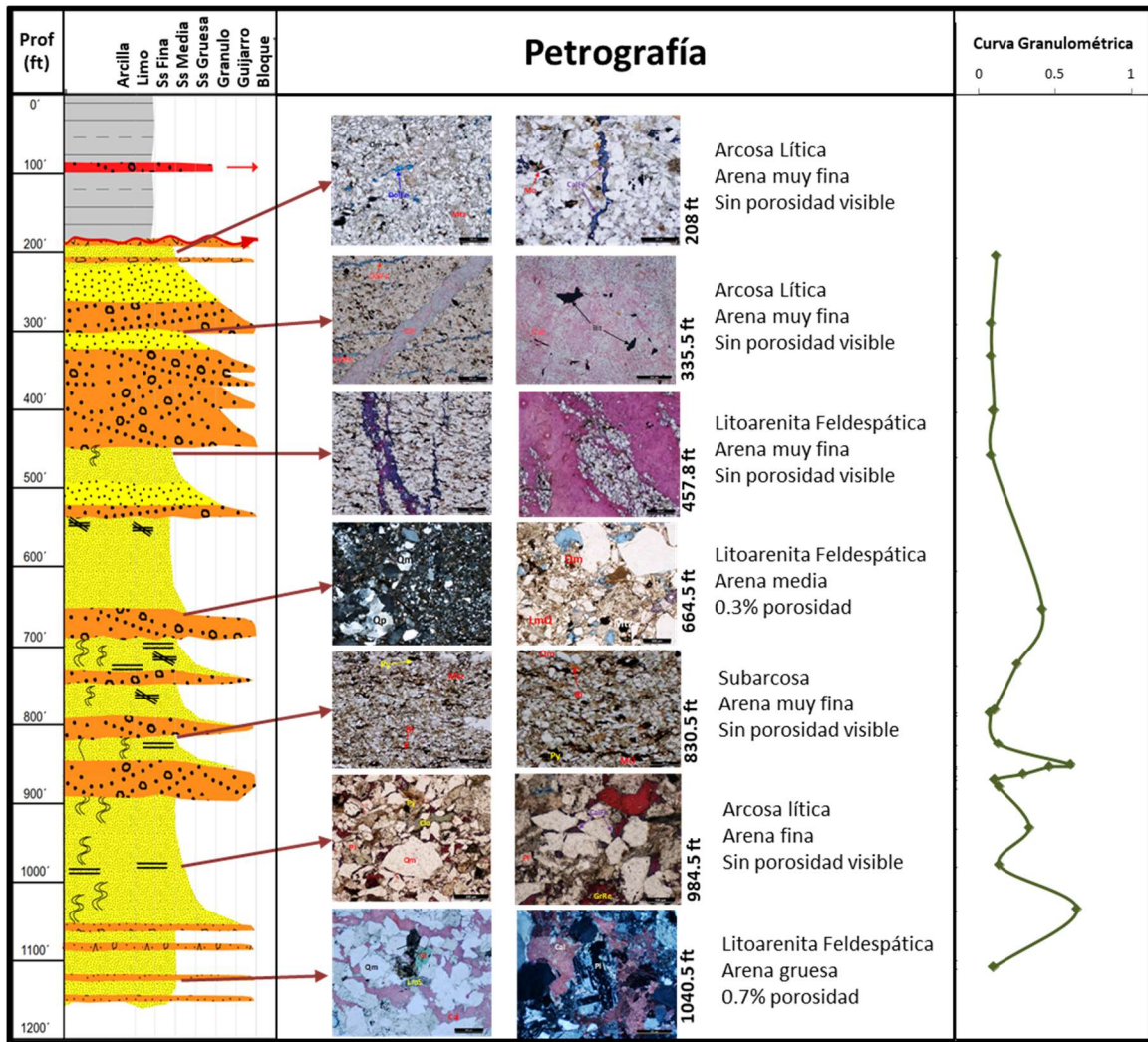
Fuente: Modificado Universidad de Caldas (2016b).

Figura 1-5. Diagrama de Folk de los resultados de la petrografía de la Formación San Cayetano en el pozo estratigráfico Moambo-1.



Fuente: Modificado Universidad de Caldas (2016b).

Figura 1-6. Columna estratigráfica del pozo a partir de la descripción litológica, y su respectiva variación en profundidad desde el análisis de petrografía



Fuente: Modificado Universidad de Caldas (2016b).

Geoquímica orgánica

Dentro del marco del proyecto Caribe ANH 2016 se obtuvieron datos de reflectancia de vitrinita en 22 muestras (Tabla 1-4) y datos de pirólisis en 12 muestras (Tabla 1-3) (Universidad de Caldas, 2016a y 2016c).

Tabla 1-3: Datos de pirólisis (Rock Eval) del pozo estratigráfico Moambo-1

Prof (ft)	TOC (%)	S1 (mg/g)	S2 (mg/g)	S3 (mg/g)	Tmax °C	HI	OI	S2/S3	S1/TOC*100	PI
248,5	0,77	0,41	0,45	0,28	427	58.4	36.4	1,6	53,2	0,48
287,0	0,71	0,54	1,00	0,36	441	140.1	50.4	2,8	76	0,35
368,0	1,29	0,48	0,89	0,37	437	69	28.7	2,4	37	0,35
489,3	1,06	0,44	0,73	0,25	428	68.9	23.6	2,9	42	0,38
532,6	1,30	0,97	1,25	0,25	424	96.2	19.2	5,0	75	0,44
592,5	1,90	0,72	1,39	0,23	439	73.2	12.1	6,0	38	0,34
654,5	1,48	0,30	0,67	0,30	412	45.3	20.3	2,2	20	0,31
702,5	1,24	0,38	0,46	0,31	429	37.1	25	1,5	31	0,45
754,0	1,57	0,34	0,67	0,34	417	42.7	21.7	2,0	22	0,34
866,5	3,93	1,43	5,24	0,37	408	133.3	9.4	14,2	36	0,21
987,0	1,84	5,01	5,39	0,21	409	292.9	11.4	25,7	272	0,48
1016,9	1,16	0,97	1,13	0,36	420	97.4	31	3,1	84	0,46

Fuente: Modificado Universidad de Caldas (2016a).

Tabla 1-4. Datos de reflectancia de vitrinita (Ro) del pozo estratigráfico Moambo-1

Prof (ft)	Ro %
248,5	0,63
265	NA
287	0,63
368	0,62
489,3	0,63
532,6	0,64
592,5	0,67
702,5	0,58
709,3	0,6
719,5	0,64
732,5	0,62
754	0,66
810,3	0,65
825,7	0,65
843,2	0,64
852,3	NA
863,6	0,61
866,5	0,63
987	0,65
1016,9	0,72
1057,6	NA
1093,2	0,7

Fuente: Modificado Universidad de Caldas (2016c).

Bioestratigrafía

Dentro del marco del proyecto Caribe ANH 2016 se llevaron a cabo análisis de foraminíferos en 39 muestras del pozo estratigráfico Moambo-1, de las cuales 10 muestras tuvieron recobro muy bajo de foraminíferos, en la Tabla 1-5 se reportan algunas de las especies identificadas en el pozo (Universidad de Caldas, 2016d).

Tabla 1-5. Algunas especies de foraminíferos identificadas en el pozo ANH – Mohambo - 1X y su extensión en el tiempo.

Especie	Profundidad (pies)	Rango de edad
<i>Ammobaculites agglutinans</i>	409,6 592,7	Cretácico tardío al reciente
<i>Psammosphaera ? irregularis</i>	574,5	Cretácico tardío a Eoceno
<i>Rhabdammina cf. discreta</i>	592,7	Cretácico al reciente
<i>Saccamina ? globosa</i>	592,7	Cenomaniano temprano a Turoniano
<i>Ammomarginulina ? auberta</i> o <i>Popovia ? beckmanni</i>	810,3	Paleoceno a Eoceno medio
<i>Rzehakina ? epigona</i>	1057,5	Cretácico tardío a Eoceno temprano en la biozona E9 (~42 Ma)

Fuente: Tomado de Universidad de Caldas (2016d).

2. Metodología

2.1 Material geológico y muestreo

El pozo estratigráfico Moambo-1 fue perforado en el 2014 como parte de la campaña de perforación de la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH) para entender el sistema petrolífero y la historia geológica de la cuenca Sinú-San Jacinto. Este pozo alcanzó una profundidad total de 1.281 pies. La profundidad que se pretendía lograr en el pozo era de 3.200 pies, objetivo que no fue posible alcanzar debido a problemas con altas presiones y contenidos de gas, que impidieron continuar con el plan de perforación (LT Geoperforaciones y Minería Ltda, 2015).

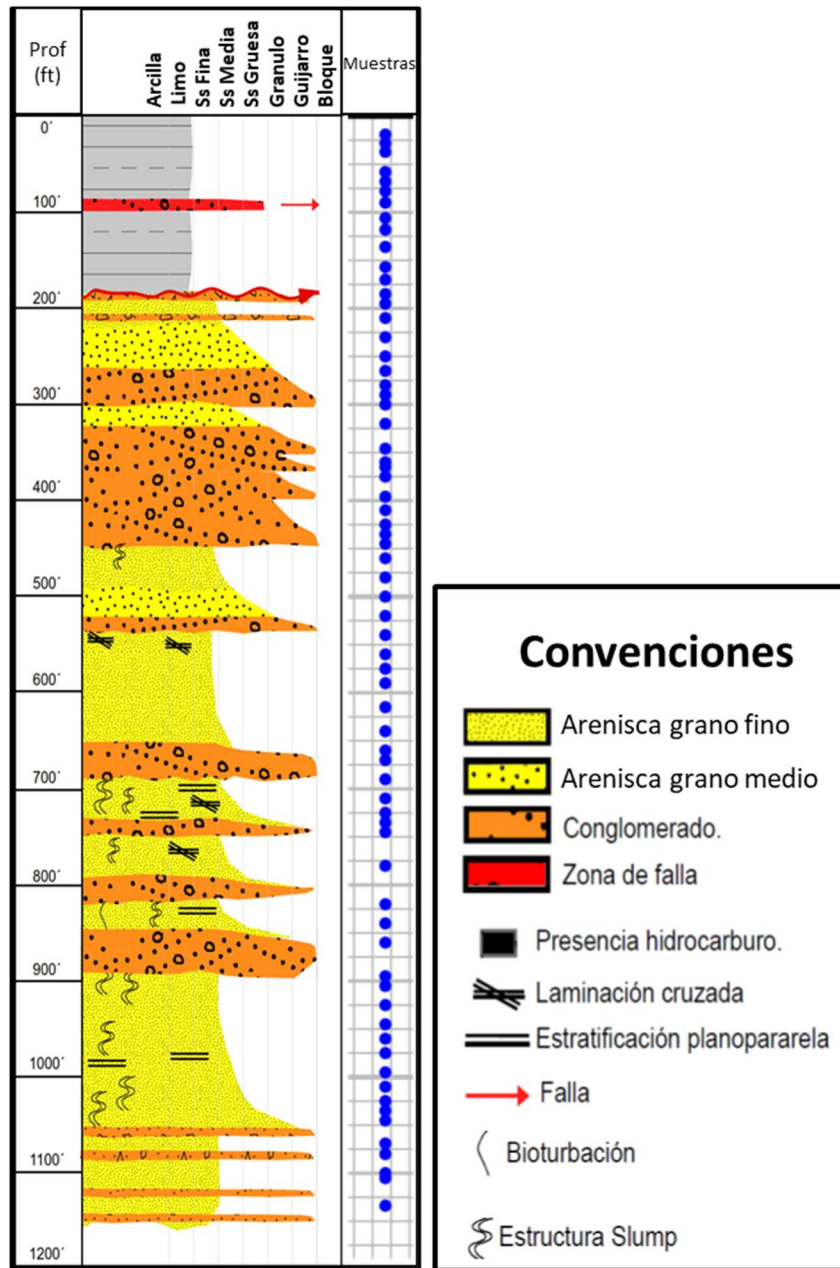
Dentro del marco del “Proyecto Caribe ANH” la Universidad de Caldas llevó a cabo análisis de petrografía, geoquímica orgánica y bioestratigrafía (Universidad de Caldas, 2016a, 2016b, 2016c y 2016d). Los resultados de estos análisis fueron integrados con los resultados del presente trabajo con el fin de complementar el análisis litogeoquímico acá presentado.

La información disponible del pozo para los análisis del objeto de este trabajo corresponde a los 1.135 pies de corazón recuperado.

El corazón recuperado fue descrito y muestreado en intervalos aleatorios para obtener un total de 68 muestras (

Figura 2-1). Se tomaron *chips* del corazón de, aproximadamente, 2 centímetros.

Figura 2-1: Relación de muestras tomadas en el pozo para los propósitos de este estudio



Fuente: Elaboración propia, resultado de la descripción litológica de los núcleos.

2.2 Descripción litológica

De los 1.281 pies perforados en el pozo, se corazonaron 1.135 pies, de los cuales se hizo una descripción litológica generalizada para la identificación de las facies sedimentarias.

La descripción de los corazones se realizó mediante análisis visual, identificando las diferentes características observadas en el corazón completo, siguiendo la metodología propuesta por Folk (1954 y 1974) tanto para clasificación composicional como para clasificación textural de las rocas, los siguientes atributos fueron tenidos en cuenta durante la descripción litológica:

1. Espesor de las capas y orientación de los estratos
2. Contactos entre los diferentes estratos (concordantes o discordantes)
3. Estructuras sedimentarias, las cuales incluyen la disposición de los granos en las capas identificadas (granocreciente, granodecreciente, laminación paralela, laminación cruzada, fallas o fracturas, bioturbación)
4. Componentes accesorios como concreciones, fósiles, restos orgánicos, etc
5. Análisis textural de las rocas el cual incluye una estimación del tamaño de grano
6. Color sedimentario
7. Descripción de porosidad visual (si existe)

A la descripción litológica se integraron los análisis de petrografía, bioestratigrafía y geoquímica orgánica, realizados por la Universidad de Caldas en el marco del Proyecto Caribe ANH de 2016.

2.3 Difracción de rayos X

La difracción de rayos X (XRD, siglas en inglés) se utilizó para identificar y cuantificar minerales y otros materiales cristalinos presentes en las muestras a partir de la medida del ángulo de difracción, 2θ , la cual es definida entre el rayo de incidencia y el detector, estos análisis se llevaron a cabo en el laboratorio de caracterización litológica de la Universidad Nacional de Colombia con el soporte del grupo de investigación Lattice Litogeoquímica Aplicada.

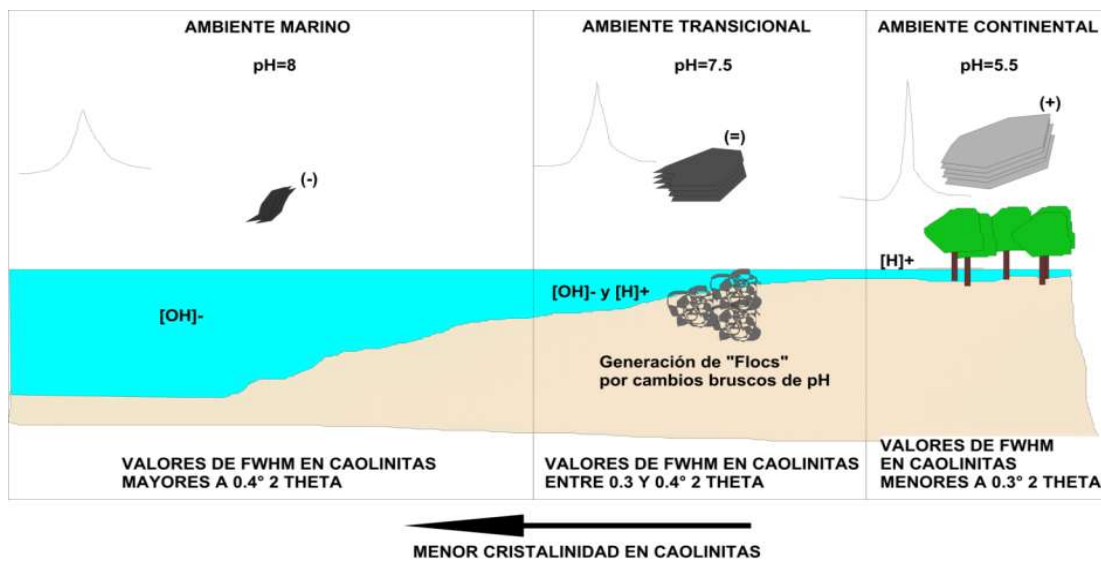
En este trabajo se utilizó el método de Relación de Intensidad de Referencia RIR, (en inglés, Reference Intensity Ratio) de Chung (1974), para cuantificar los minerales presentes en las rocas. Este método se basa en la relación existente entre las intensidades de los picos de difracción de una fase de la mezcla mineral con la abundancia de dicha

fase en la misma (Chung, 1974), es así como si se conoce el RIR de los minerales y relacionándolos con los picos de difracción, es posible tener un análisis cuantitativo de los componentes de la muestra (David et al. (1990).

Para determinar el ambiente de depósito se utilizó el índice de cristalinidad de la caolinita, donde, a partir del grado de cristalinidad es posible determinar si los sedimentos se depositaron en ambientes marinos, transicionales o continentales (Bonilla, 2008), esto debido a que los cristales de las caolinitas se ven afectados en sus bordes de fractura en ambientes marinos, mientras que tienden a conservarse en ambientes continentales (Bonilla, 2008) (Figura 2-2).

El grado de cristalinidad de la caolinita se determinó a partir de los valores de FWHM (medida del ensanchamiento del pico a la altura media del mismo), siendo las de mejor cristalinidad aquellos con valores de FWHM menores a $0,3^\circ\theta$ (ambiente continental), y las que presentan cristalinidades pobres o bajas, las correspondientes a valores de FWHM mayores a $0,4\Delta^\circ 2\theta$ (ambientes marinos), mientras valores de FWHM entre $0,3 \Delta^\circ 2\theta$ y $0,4 \Delta^\circ 2\theta$, representan cristalinidades medias (ambiente transicional) (Bonilla, 2008),

Figura 2-2: Relación de la cristalinidad de la caolinita dada por el valor FWHM del pico y el ambiente de depósito



Fuente: Bonilla (2008).

En cuanto al análisis de las condiciones diagenéticas de las unidades perforadas, se usó el índice de cristalinidad de la illita (Warr y Rice, 1994). El método más común usado para determinar este índice es el de Kübler, el cual mide los cambios en las formas de los cristales de illita y su relación en profundidad respecto a la presencia de esmectita (Warr y Rice, 1994).

Kübler (1964) observó una relación entre la forma del pico de la illita (10\AA) y el grado de metamorfismo de las rocas, dado que la illita al ser un filosilicato, consiste de paquetes de interestratificados de 10\AA , su proporción en estos paquetes varía respecto al enterramiento de las rocas, por lo tanto, la medición del índice de cristalinidad (IC) permite determinar el grado de metamorfismo, es así como Kübler (1967) clasifica zonas de bajo grado de metamorfismo según los IC observados como: diagénesis ($IC > 0.45 \text{ } ^\circ 2\theta$), anquizona (IC entre 0.42 y $0.25 \text{ } ^\circ 2\theta$) y epizona ($IC < 0.25 \text{ } ^\circ 2\theta$),

2.3.1 Preparación de la muestra

Para el análisis de minerales se preparó la muestra siguiendo el procedimiento descrito por Hauff *et al.*, (2008), el cual consiste en analizar 2g de una muestra pulverizada (tamaño entre 2 y $62 \mu\text{m}$), este análisis se llevó a cabo en un equipo Bruker Tracer GeoQuant y con un rango de barrido de entre $2,5$ y $70 \text{ } ^\circ 2\theta$ con el fin de identificar la mayoría de los planos cristalinos presentes a partir de minerales conocidos.

La preparación de las muestras para el análisis de arcillas se realizó siguiendo la metodología propuesta por Moore y Reynolds (1997), la cual incluye tratamientos que pueden cambiar la estructura cristalina de las arcillas (Milosevic *et al.*, 1992).

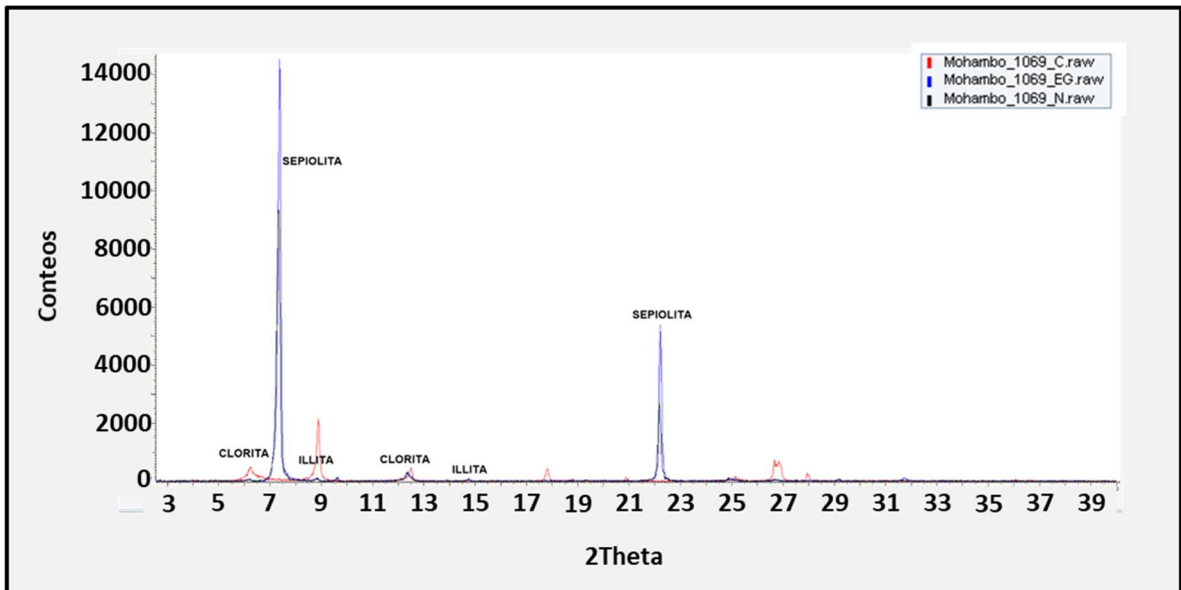
En este trabajo se realizaron las siguientes lecturas, las cuales se graficaron para identificar los minerales arcillosos a partir de las respuestas de los picos en los diferentes tratamientos.

1. Lectura de XRD en muestra orientada.

2. Lectura XRD posterior a tratamiento con etilenglicol para simular condiciones de humedad, permitiendo el hinchamiento de los minerales expansivos, como las esmectitas (Szczerba M. *et al.*, 2014).
3. Lectura de XRD posterior a tratamiento térmico, donde la muestra se lleva a una mufla a 500 °C durante tres horas, generando efectos de deshidratación y pérdida de OH⁻ en las estructuras de los minerales (Bala *et al.*, 2012).

Por ejemplo, el mineral de sepiolita, cuyo plano principal se encuentra a 12 Å, no reacciona a la saturación con etilenglicol, al calentarse a 500 °C pierde el H₂O presente en la estructura y su señal colapsa (Figura 2-3)

Figura 2-3: Superposición de barrido de muestra 1.069 pies, en natural (N), con etilenglicol (EG) y sometida a tratamiento térmico (C). Para el caso de la sepiolita, colapsa al someterse al tratamiento térmico como resultado de la pérdida de H₂O en su estructura



Fuente: Elaboración propia.

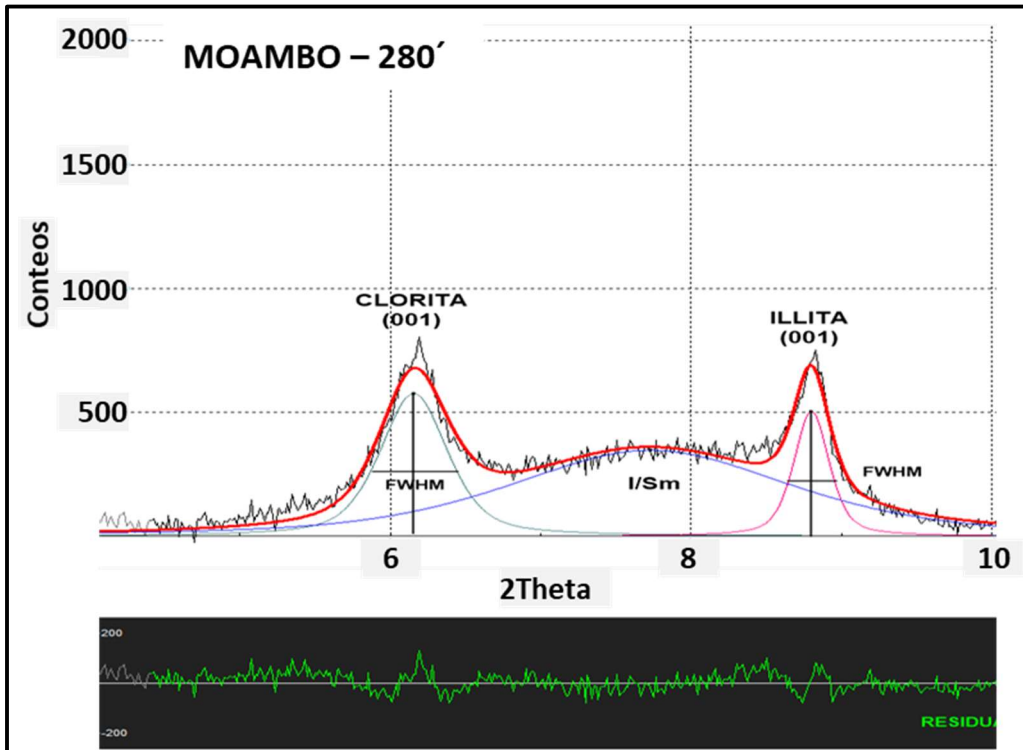
2.3.2 Cálculo de cristalinidades en illitas y caolinitas

Para el cálculo de las cristalinidades de las illitas y caolinitas, se realizaron tratamientos matemáticos a las curvas provenientes de las mediciones de XRD para eliminar el ruido producido por la interferencia o interestratificación con otros minerales. Este tratamiento permite discriminar las fases de los interestratificados presentes en la muestra y medir el

ancho de los picos (FWHM) de las illitas y las caolinitas (Howard y Preston, 1989) (Figura 2-4 y Figura 2-5).

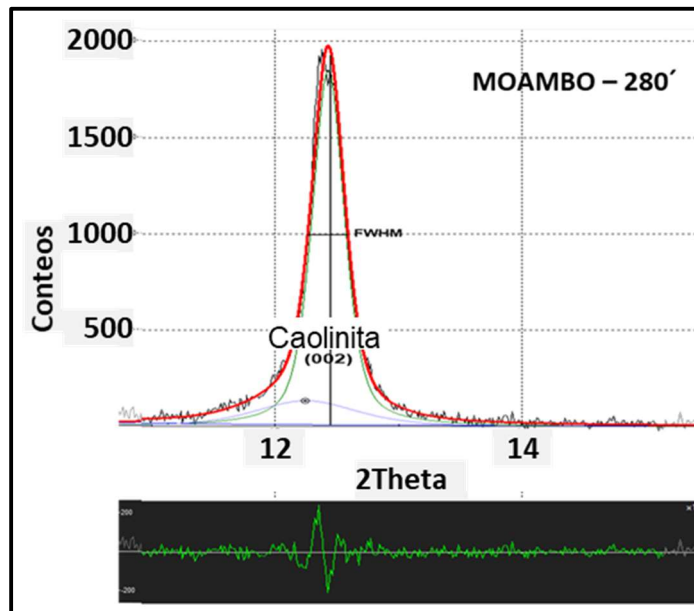
El ancho del pico está directamente relacionado con el grado de cristalinidad de los minerales, cuanto más cristalino es un material, más aguda es la respuesta por XRD, es decir, los anchos de los picos (FWHM) son menores (Warr y Rice, 1994).

Figura 2-4: Espectro tratado matemáticamente en la muestra 280' (ajuste lineal en rojo oscuro), pico de interstratificado illita/esmectita en azul, y medida del FWHM para el pico de illita (rojo claro)



Fuente: Elaboración propia, producto del tratamiento matemático de la muestra del pozo estratigráfico Moambo-1.

Figura 2-5: Espectro tratado matemáticamente en la muestra 280' (ajuste lineal en rojo), en donde se muestra el tratamiento aplicado a los picos, separando la fase alterada de la no alterada de la caolinita para obtener un FWHM limpio (línea verde)



Fuente: Elaboración propia producto del tratamiento matemático de la muestra del pozo estratigráfico Moambo-1

2.4 Fluorescencia de rayos X

La composición elemental de los sedimentos es altamente variable y dependiente de la composición de la fuente de aporte, las facies, el paleoclima y la diagénesis (Ratcliffe *et al.*, 2008; Pearce *et al.*, 2010). La identificación de estos elementos en las rocas ha sido ampliamente usada y es conocida como quimioestratigrafía o estratigrafía química, donde a partir de elementos mayores y elementos traza es posible asociar las rocas con ambientes anóxicos-óxicos, modelar niveles de carbono orgánico total (TOC, por sus siglas en inglés), proveer mineralogía, identificar zonas de sílice biogénica en *shales*, y proveer información acerca de ciclos transgresivos-regresivos (Taylor y Cortes, 2013).

Las composiciones químicas de las rocas perforadas fueron determinadas usando un espectrómetro de fluorescencia de rayos X (XRF, por sus siglas en inglés), el cual es una técnica utilizada para análisis rutinarios relativamente no destructivos de estudios químicos de las rocas (Brouwer, 2010).

La abundancia de elementos mayores en porcentaje en peso (%wt) (Mg, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Mn y Fe) y de elementos menores o traza en partes por millón (ppm) (Ti, V, Cr, Co, Cu, Zn, As, Se, Rb, Sr, Mo, Ag, Cd, Sn, Sb, W, Hg, Pb, Bi, Th y U), fue medida en las muestras usando un equipo portable de fluorescencia de rayos X por energía dispersiva (EDXRF por sus siglas en inglés), de referencia X-5000 de Olympus. El equipo consta de tubos de rayos X, una cámara de circuito de haz cerrado, un equipo PC, una pantalla y un teclado virtual (Olympus, 2012). Las mediciones se realizaron en las oficinas de Nexen Petroleum (hoy Cnooc Energy), cada análisis se calibró con estándares certificados NIST (National Institute of Standards and Technology).

Las muestras fueron lavadas y secadas a temperatura ambiente con agua para eliminar el lodo de perforación existente. Una vez seco el material, se tomaron muestras de 10 g y se ubicaron en recipientes de muestreo de 2,2 cm de alto y 3 cm de diámetro, cubiertos con láminas de Mylar® de 6µm (Bourke y Ross, 2015).

A partir de los elementos mayores, se realizó el cálculo del porcentaje en peso (%wt) de los óxidos SiO₂, TiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, MgO, CaO, K₂O, P₂O₅, y, MnO, mediante el programa "Minthlith" el cual está integrado con el equipo portable de fluorescencia de rayos X (Olympus-5000).

Para determinar la relación entre los elementos mayores y trazas con las condiciones de depositación de los sedimentos, se tuvieron en cuenta los siguientes grupos elementales

- En este trabajo se usaron como indicadores de derivados de carbonatos las siguientes relaciones elementales: CaO/MgO, MgO/Al₂O₃ (Ratcliffe y Wright, 2012).
- Elementos asociados a enriquecimiento autigénico bajo condiciones anóxicas: Mo, U, Ni, V, Cu, Zn y Co. (Tribovillard *et al.*, 2006) y (Ratcliffe y Wright, 2012).

En este trabajo se usó la siguiente relación como indicador de derivados autigénicos: $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{MgO}$ (Ratcliffe y Wright, 2012).

- Elementos asociados a minerales terrígenos: Al_2O_3 , K_2O , Th; cuarzo, SiO_2 ; feldespatos, Na_2O , y elementos pesados como el Zr (Ratcliffe y Wright, 2012).

Para este trabajo se utilizó el contenido de SiO_2 para relacionar el tamaño de grano, dado que este es el componente principal del cuarzo y es comúnmente asociado a granulometría gruesa en los sedimentos (Cuven *et al.*, 2010).

Como indicadores de derivados terrígenos se usaron las siguientes relaciones: Zr/Cr, Rb/ K_2O , K (Driskill *et al.*, 2018; Ratcliffe y Wright, 2012).

- Para el análisis de condiciones óxicas-anóxicas del ambiente de depósito se tuvo en cuenta los metales traza. El ciclo de reducción del manganeso (Mn) y del hierro (Fe) es de gran importancia para el enriquecimiento de metales traza en sistemas subóxicos-anóxicos, debido a que estos desencadenan o aceleran la transferencia de los elementos traza del suelo marino a los sedimentos (Morford *et al.*, 2005); de esta forma, los elementos traza que están influenciados por el ciclo Fe-Mn, son: Ni, Cu, Zn, Co, Pb, Mo, V y Cr. (Tribovillard *et al.*, 2006). Adicional a estos elementos, en este trabajo se usó el contenido de torio (Th) para la determinación de intervalos orgánicos, dado que en rocas orgánicas el contenido de torio tiende a ser bajo (Orem y Finkelman, 2004).

2.5 Geoquímica orgánica

La geoquímica orgánica es usada en el sector del petróleo para entender las características de las rocas fuente. De acuerdo con Lafargue *et al.*, (1998) distintos tipos de materia orgánica generan diferentes cantidades y tipos de hidrocarburos, los cuales están influenciados por el ambiente de depósito de los sedimentos (Tissot y Welte, 1984).

Para la caracterización de la materia orgánica, en este trabajo se usaron datos de pirólisis y de reflectancia de vitrinita (R_o), los cuales fueron obtenidos por la Universidad de Caldas, dentro del marco del Proyecto Caribe ANH de 2016.

El método de pirólisis consiste en el aumento de temperatura programado en una atmósfera inerte (helio) de una pequeña muestra (100 mg) para determinar de manera

cuantitativa y selectiva los hidrocarburos libres contenidos en la muestra y la capacidad de generación de hidrocarburos de esta (Nuñez-Betelu y Baceta, 1994). En resumen, de acuerdo con Tissot y Welte, (1984), los cuatro parámetros básicos obtenidos por pirólisis son los siguientes:

S1: corresponde a la cantidad de hidrocarburos libres (gas y petróleo) en la muestra (en miligramos de hidrocarburo por gramo de roca-mg HC/g roca). Si $S1 > 1$ mg/g, puede ser indicativo de una muestra de aceite. S1 normalmente aumenta con la profundidad. (McCarthy *et al.*, 2011).

S2: corresponde a la cantidad de hidrocarburos generados a través del craqueo térmico de la materia orgánica no volátil. S2 es una indicación de la cantidad de hidrocarburos que la roca tiene el potencial de producir, en caso de que continúe el enterramiento y la maduración (McCarthy *et al.*, 2011).

S3: corresponde a la cantidad de CO_2 (en miligramos de CO_2 por gramo de roca) producido durante la pirólisis. S3 es una indicación de la cantidad de oxígeno en el kerógeno, y se utiliza para calcular el índice de oxígeno (McCarthy *et al.*, 2011).

T-máx: corresponde a la temperatura a la que se produce la liberación máxima de hidrocarburos por craqueo del kerógeno durante la pirólisis (parte superior del pico S2). T-máx es una indicación de la maduración de la materia orgánica (McCarthy *et al.*, 2011).

A partir de estos parámetros es posible determinar el índice de hidrógeno (HI) y el índice de oxígeno (OI), los cuales se describen a continuación:

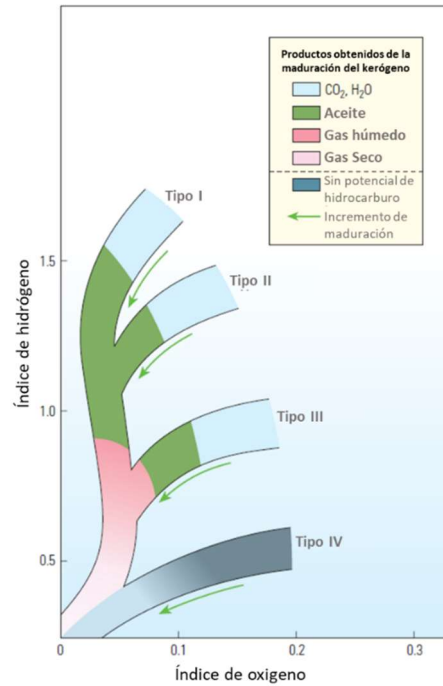
HI: Índice de hidrógeno ($HI = [100 \times S2]/TOC$). HI es un parámetro utilizado para caracterizar el origen de la materia orgánica. Los organismos marinos y las algas, en general, se componen de materia orgánica rica en lípidos y proteínas, donde la proporción de H a C es mayor que en los componentes ricos en carbohidratos de las plantas terrestres (**Error! Reference source not found.**) (McCarthy *et al.*, 2011).

OI: Índice de oxígeno (OI - $[100 \times S3]/TOC$). OI es un parámetro que se correlaciona con la proporción de O a C, que es alta en restos ricos en polisacáridos de plantas terrestres y material orgánico inerte (materia orgánica residual), y que es encontrado como fondo en sedimentos marinos (Figura 2-6) (McCarthy *et al.*, 2011).

Estos índices son usuales para determinar el tipo de kerógeno y su maduración cuando se plotean en un diagrama de Van Krevelen (Figura 2-6). De acuerdo con Tissot *et al.*, (1974) el kerógeno tipo I tiene alto HI y bajo OI asociado a ambientes marinos; los kerógenos tipo III están caracterizados por bajo HI y alto OI asociados a ambientes terrestres, y entre estos dos extremos se encuentra el kerógeno tipo II asociado a ambientes marinos. La tendencia general en la transformación termal del kerógeno a hidrocarburo está caracterizada por progresar a aceite, gas húmedo y gas seco en la medida que la materia orgánica está sometida a mayores temperaturas. Durante esta progresión, el kerógeno pierde principalmente el oxígeno generando CO_2 y H_2O , y más tarde este empieza a perder más hidrógeno, a medida que evolucionan los hidrocarburos (McCarthy *et al.*, 2011).

El carbono orgánico total (TOC, por sus siglas en inglés): es importante en la evaluación de la roca fuente. Típicamente el contenido de TOC es determinado por el método de combustión directa (Peters, 1986).

Figura 2-6: Diagrama de Van Krevelen - cambios de kerógeno por el incremento de calor



Fuente: McCarthy *et al.*, 2011.

La vitrinita es uno de los tres macerales (vitrinita, liptinita e inertita) o tipos de partículas orgánicas que están presentes en las rocas sedimentarias. Este es el maceral más abundante, y se forma a partir de la alteración termal de lignita y celulosa existente en los tejidos (McCarthy *et al.*, 2011). De otra parte, la reflectancia de vitrinita es una medida de la intensidad de la luz que se refleja sobre una superficie pulida de este maceral, y su medida se designa como Ro (McCarthy *et al.*, 2011). Esta medida representa la relación que tiene la roca con la evolución diagenética de la materia orgánica y la generación de hidrocarburos (McCarthy *et al.*, 2011) (Tabla 2-1).

Tabla 2-1: Grado de madurez termal a partir del porcentaje de Ro

Madurez	% Ro
Inmaduro	<0,6
Aceite	0,6 a 1,3
Condensado a gas húmedo	1,3 a 2,0
Gas seco	>1,5

Fuente: Tissot y Welte, (1984).

3. Resultados

3.1 Descripción litológica de base a techo del pozo estratigráfico Moambo-1

i. Sección de 1.281 a 863 pies:

Esta sección se caracteriza por presentar secuencias granodecrecientes que varían, de base a techo, de areniscas pardas conglomeráticas de grano grueso con clastos angulares a areniscas de grano fino, al tope, las cuales se encuentran altamente cementadas sin porosidad aparente. Las areniscas al tope de las secuencias presentan en algunos casos laminación plano-paralela con granos subredondeados. Adicional a lo anterior, se evidencian cristales de plagioclasa al tope de las secuencias.

A continuación, se presentan algunas descripciones realizadas en este intervalo.

Figura 3-1: Muestra a 1.134 pies, conglomerado arenoso color pardo con clastos angulares. En el núcleo se evidencian cristales de mica moscovita



Figura 3-2. Muestra a 1.051 pies, conglomerado arenoso con clastos angulares, de hasta 2 cm, compuestos por lodolitas



Figura 3-3. Muestra a 1.045 pies, litoarenita feldespática, con granos subredondeados a subangulosos, tamaño arena gruesa, moderadamente seleccionados. Granos: cuarzo monocristalino (Qm), cuarzo policristalino, líticos plutónicos, metamórficos (cuarcita y esquisto, LmS), chert, plagioclasas (Pl) y otros líticos



Figura 3-4. Muestra a 998,3 pies, litoarenita feldespática, con granos subredondeados a subangulosos tamaño arena gruesa, moderadamente seleccionados. Se observa estratificación plano-paralela



Figura 3-5. Muestra a 886 pies, contacto erosivo entre conglomerado arenoso y litoarenita feldespática



- ii. Sección de 863 a 188 pies:
consta de conjuntos de areniscas gravosas en paquetes granodecrecientes hacia el tope. Presenta una intercalación de un paquete de lodolitas calcáreas, ligeramente bioturbadas. En algunos de estos materiales se evidencia estratificación convoluta. Hacia la base de cada uno de los conjuntos son

comunes los fragmentos volcánicos angulares y los contactos erosivos con el inmediatamente anterior. Al tope de la sección los paquetes presentan granulometría angular.

A continuación, se presentan algunas descripciones realizadas en este intervalo.

Figura 3-6. Muestra a 854,5 pies, arenisca de grano medio con intraclastos angulares de hasta 10 cm, en la figura se observa un intraclasto de lodolita con laminación plano-paralela



Figura 3-7. Muestra a 830,5 pies, areniscas de grano fino con laminación plano-paralela, afectadas por estratificación convoluta



Figura 3-8. Muestra a 793,5 pies, areniscas de grano medio con intraclastos subangulares de hasta 5 cm. Se observa un intraclasto de lodolita



Figura 3-9. Muestra a 769,5 pies arriba y 748 abajo, areniscas cementadas de grano medio con estratificación ondulosa



Figura 3-10. Muestra a 639 pies, areniscas grano grueso con impregnación de hidrocarburo en los espacios vacíos



Figura 3-11. Muestra a 518 pies; conglomerado arenoso, clastos angulares de hasta 0,5 cm



Figura 3-12. Muestra a 457,8 pies; estructura gravitacional “slump” posdeposicional con estratificación convoluta



Figura 3-13. Muestra a 292,5 pies; conglomerado clastosoportado con matriz arenosa. Los clastos son de tamaños de hasta 15 cm, y se componen principalmente de lodolitas



Sección de 0 a 188 pies:

Esta sección se interpreta como lodolitas silíceas de color gris oscuro, con alto contenido de carbonato hacia la base de la secuencia; hacia el tope de la secuencia perforada se presenta estratificación plano-paralela.

Hacia la base de la sección se identificó lo que potencialmente podría corresponder a una zona de falla, la cual está caracterizada por presentar una textura arenosa con fragmentos angulares.

Figura 3-14. Corazones a profundidades de 95,5 pies a 117 pies; lodolita silíceo, gris oscura



Figura 3-15. Corazones a profundidades de 85,7 pies a 94,7 pies; zona de falla, caracterizada por presentar una textura arenosa con fragmentos angulares

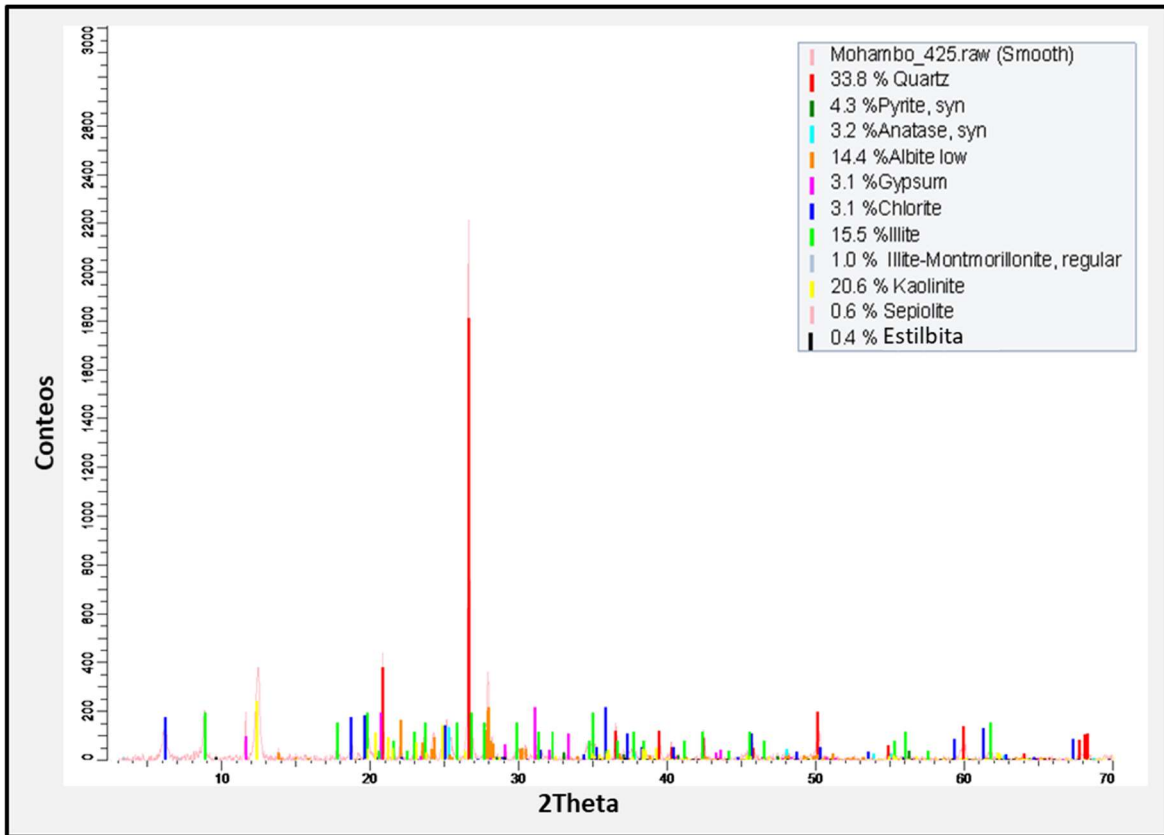


3.2 Composición mineralógica y análisis elemental

3.2.1 Análisis de difracción de rayos X

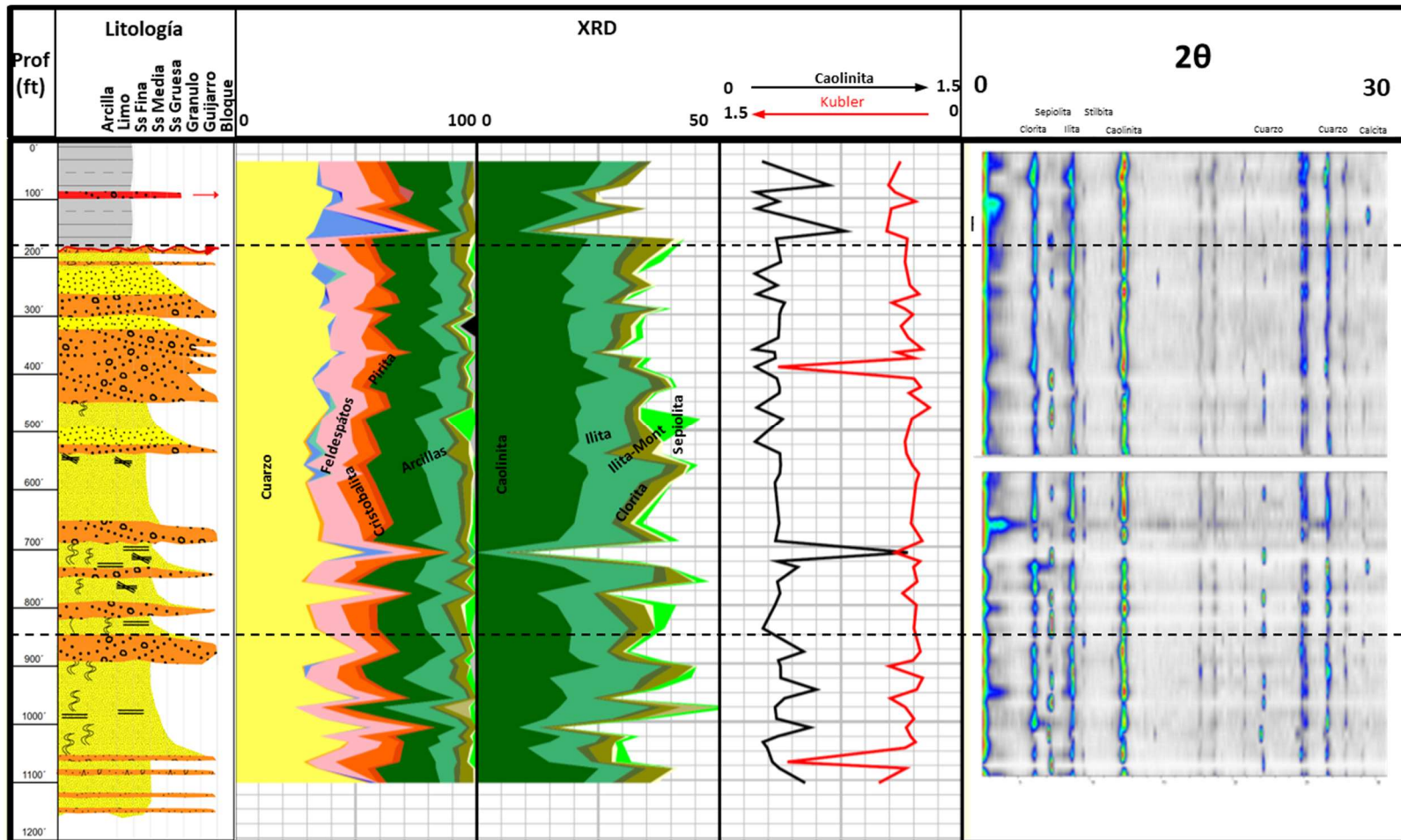
En la secuencia perforada por el pozo estratigráfico Moambo-1 el porcentaje de minerales (determinado por XRD) varía de base a techo. Los minerales más comunes en las muestras analizadas son cuarzo, albita, pirita y minerales de arcilla. Las reflexiones fuertes de estos minerales aparecen desde $2,5^{\circ} 2\theta$ hasta los $20^{\circ} 2\theta$. (Figura 3-16 y Figura 3-17).

Figura 3-16: Patrón de XRD de la muestra Moambo-1 profundidad 425 pies en análisis de composición de roca total (*bulk*)



Fuente: Elaboración propia resultado del análisis de XRD

Figura 3-17. Mineralogía a partir del análisis de XRD en el pozo estratigráfico Moambo-1 y resultados de medida de cristalinidad de Kübler y caolinita



Fuente: Elaboración propia, resultado del análisis de XRD

Para la fracción fina se tiene que los minerales de arcilla corresponden, principalmente, a caolinita, illita y clorita. En menor cantidad se observa el mineral de sepiolita, cuyas reflexiones 001 se encuentran en $\sim 15 \text{ \AA}$; $12,04 \text{ \AA}$; y $10,5 \text{ \AA}$. Las características de los picos de la caolinita y la sepiolita son particulares, dado que estos colapsan después de someterlos a tratamientos de calor de $500 \text{ }^\circ\text{C}$ (por pérdida de H_2O en su estructura).

La Tabla 3-1 resume los principales minerales presentes, determinados a partir del análisis de XRD para la sección perforada en el pozo estratigráfico Moambo-1.

Tabla 3-1: Minerales presentes interpretados en las muestras del pozo estratigráfico Moambo-1 mediante análisis de XRD

MINERAL	Distancias en Armstrong (\AA)		
	ORIENTADA	ETILEN-GLICOL	500 $^\circ\text{C}$
CAOLINITA	7,17	7,17	-----
CLORITA	14,1	14,1	13,9
ILLITA	10,1	10,1	10,1
ILLITA/ESMECTITA	12,5	13,3	10,1
SEPIOLITA	12,1	12,1	-----
CUARZO	3,34	3,34	3,34
FELDESPATO	3,19	3,19	3,19

Fuente: Modificado de Moore y Reynolds (1997).

A continuación, se da una descripción mineralógica de las diferentes secciones encontradas en el pozo de base a techo.

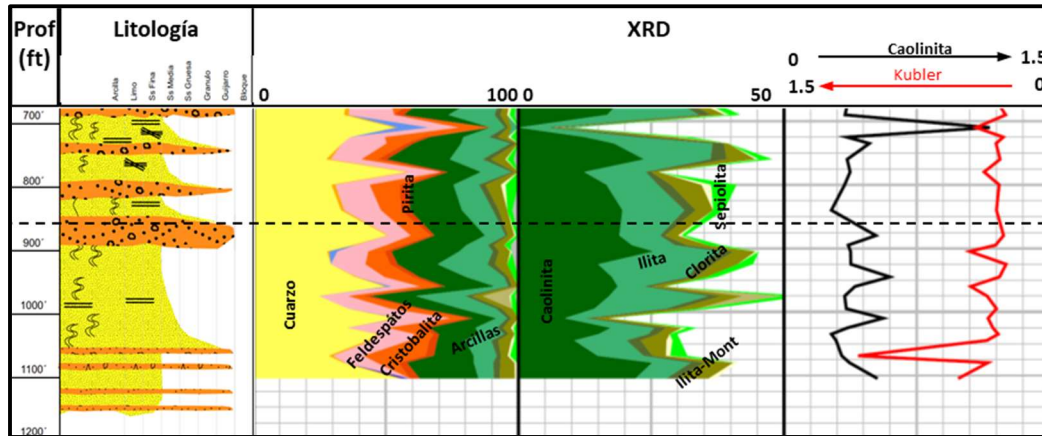
Sección de 1.281 a 863 pies:

Resumen de los resultados mineralógicos de las 15 muestras analizadas en esta sección:

- Predomina el contenido de cuarzo en las muestras con un valor promedio aproximado de 40%, con picos que alcanzan 53% en los puntos de las intercalaciones con las capas de areniscas (Figura 3-18).
- El contenido de carbonatos tiende a ser prácticamente nulo (Figura 3-18).

- El contenido de arcilla presenta altas intercalaciones, con valores que varían de 30 % a 55 % (Figura 3-18).
- Se presenta una alta ocurrencia de sepiolita y estilbita (Figura 3-20).
- Cristalinidad de la caolinita: valores promedios de FWHM de $0,35^\circ\theta$ (Figura 3-18).

Figura 3-18: Detalle de la sección de 1.281 a 863 pies del pozo estratigráfico Moambo-1.



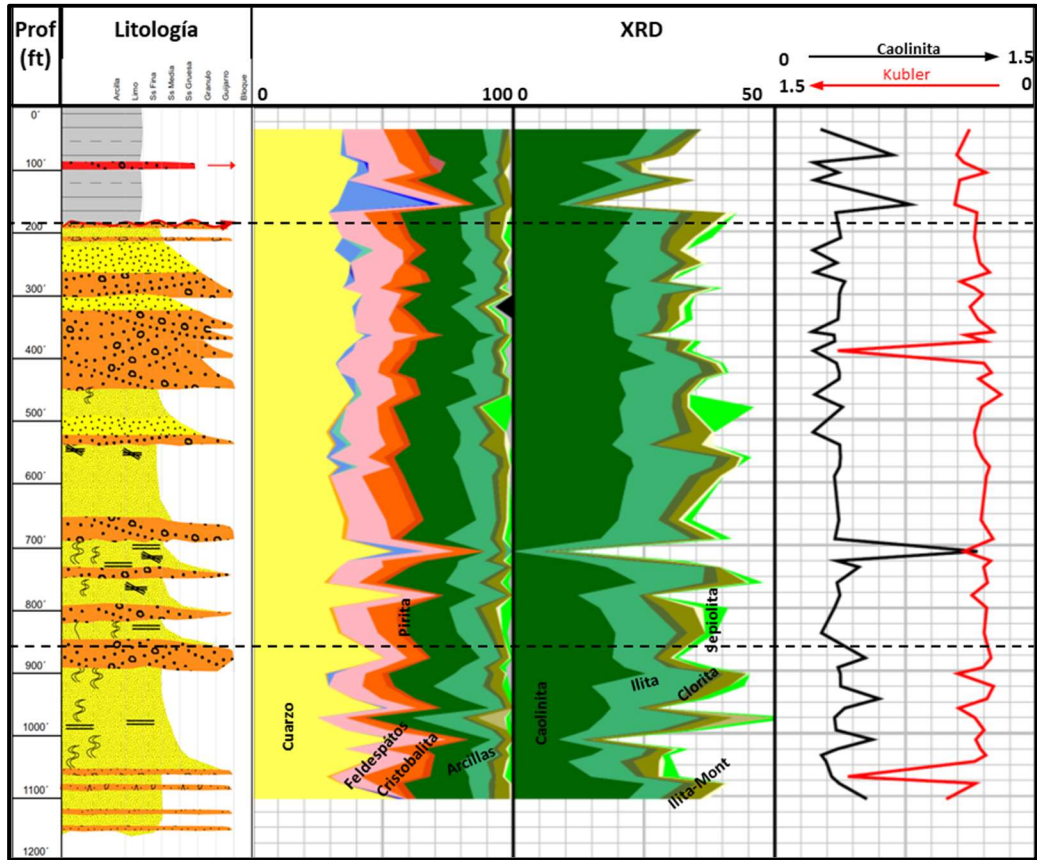
Fuente: Elaboración propia, a partir de los resultados de XRD.

Sección de 863 a 188 pies:

A continuación, se presenta un resumen de los resultados mineralógicos de las 34 muestras analizadas en este segmento:

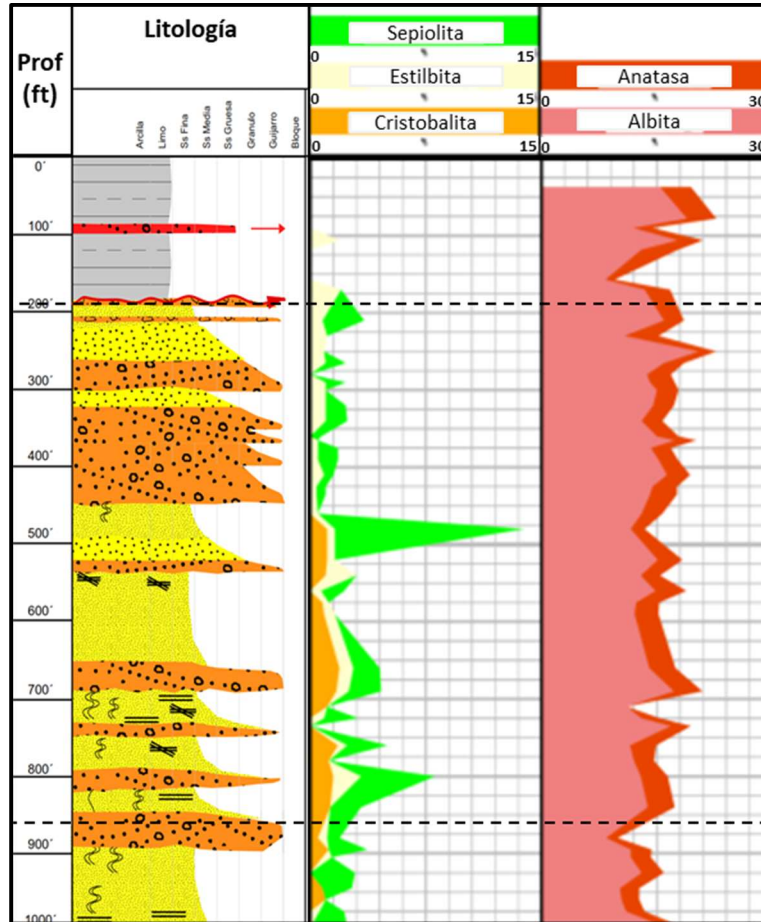
- Predomina el contenido de cuarzo en las muestras, con un valor promedio de 40 % (Figura 3-19).
- El contenido de carbonatos tiende a ser muy bajo, en su mayoría es nulo (Figura 3-19).
- El contenido de arcilla presenta un valor promedio de 34 % y valores máximos de hasta 48 % (Figura 3-19).
- Se presenta una alta ocurrencia de sepiolita y estilbita (Figura 3-20).
- La cristalinidad de la caolinita presenta valores promedios de FWHM de $0,35^\circ\theta$ (Figura 3-19).

Figura 3-19. Detalle de la sección de 863 a 188 pies del pozo estratigráfico Moambo-1.



Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados de XRD.

Figura 3-20. Incidencia de minerales de sepiolita, estilbita, cristobalita, anatasa y albita en el pozo estratigráfico Moambo.1, todos ellos relacionados con el aporte volcánico durante la depositación de la secuencia.



Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados de XRD.

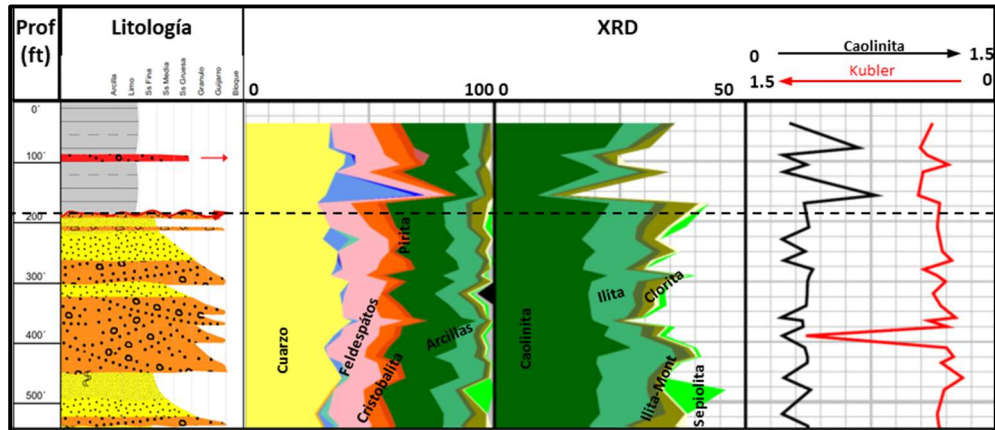
Sección de 0 a 188 pies:

A continuación, se presenta un resumen de los resultados mineralógicos de las 7 muestras analizadas en esta unidad.

- Predomina el contenido de cuarzo en las muestras, con un valor promedio de 35 % (Figura 3-21).
- Se presentan valores de calcita de hasta 35 % (Figura 3-21).
- El contenido de arcilla tiene un valor promedio de 55 %. En las muestras analizadas no se encontró presencia de sepiolita (Figura 3-21).

- En relación con la cristalinidad de la caolinita esta formación presenta valores promedios de FWHM de $0,45^\circ\theta$ (Figura 3-21).

Figura 3-21: Detalle de la sección de 0 a 188 pies en el pozo estratigráfico Moambo-1.



Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados de XRD.

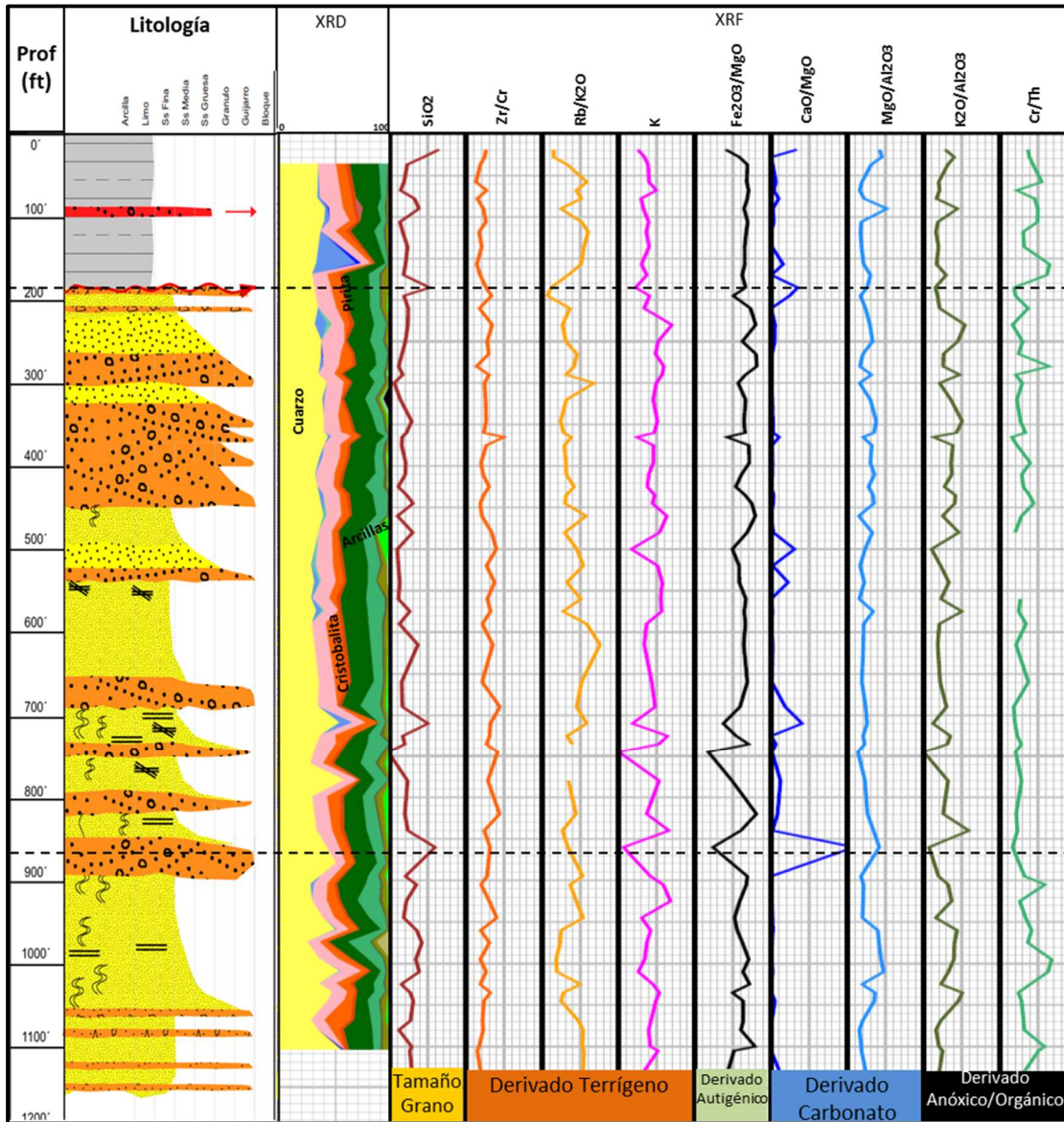
3.2.2 Análisis de fluorescencia de rayos X

Las concentraciones de elementos mayores y traza en la secuencia perforada presentan pequeñas variaciones de base a techo (

Figura 3-22).

A continuación, se presentan los resultados de las 68 muestras analizadas.

Figura 3-22: Composición elemental del pozo stratigráfico Moambo-1 a partir de análisis de XRF



Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados de XRD y XRF.

Tabla 3-2: Resultados de análisis de fluorescencia de rayos X

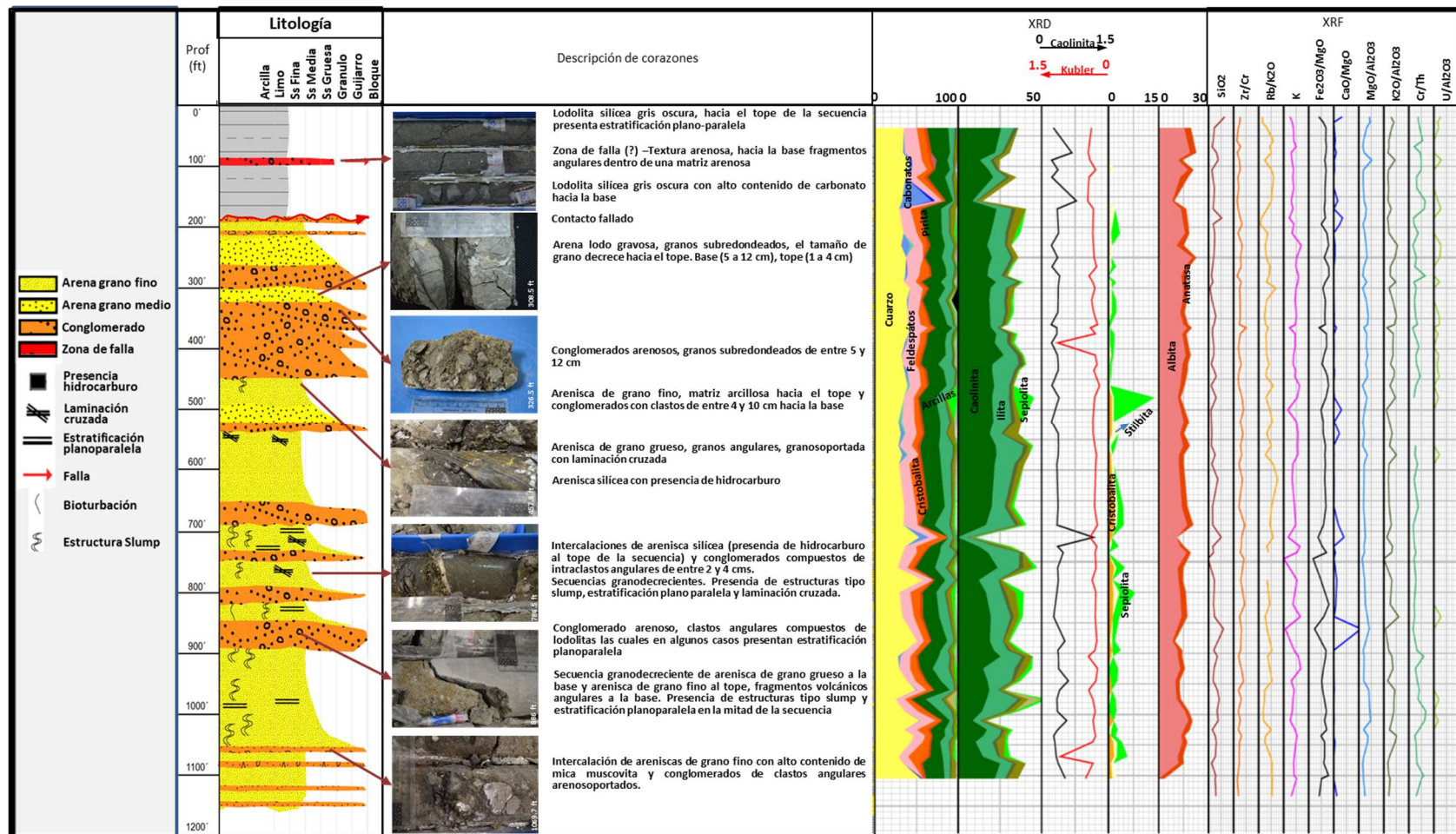
Prof (pies)	Mg (%wt)	Al (%wt)	Si (%wt)	P (%wt)	S (%wt)	K (%wt)	Ca (%wt)	Mn (%wt)	Fe (%wt)	SiO ₂ (%wt)	TiO ₂ (%wt)	Al ₂ O ₃ (%wt)	Fe ₂ O ₃ (%wt)	MgO (%wt)	CaO (%wt)	K ₂ O (%wt)	P ₂ O ₅ (%wt)	MnO (%wt)
19	0,02	5,74	19,96	0,10	0,06	0,76	3,33	0,09	2,35	67,09	1,24	17,03	5,27	0,04	7,33	1,43	0,37	0,19
28	0,02	5,40	15,86	0,11	0,12	1,02	0,03	0,03	3,37	65,79	2,03	19,77	9,34	0,05	0,08	2,39	0,49	0,07
37	0,02	7,78	18,43	0,10	0,83	1,16	0,21	0,03	3,97	62,78	1,59	23,41	9,04	0,04	0,47	2,22	0,38	0,07
58	0,02	12,82	29,06	0,01	5,88	1,19	0,62	0,03	3,93	65,08	1,18	25,35	5,88	0,03	0,91	1,50	0,02	0,04
68	0,02	15,13	32,34	0,00	2,50	1,48	0,35	0,05	4,07	64,59	1,06	26,70	5,43	0,03	0,46	1,67	0,01	0,06
78	0,02	11,16	29,28	0,01	5,80	0,88	0,98	0,04	3,97	67,28	1,25	22,66	6,09	0,03	1,48	1,14	0,02	0,05
90	0,02	4,67	13,00	0,12	0,62	0,98	0,22	0,03	3,73	62,24	1,96	19,76	11,94	0,06	0,69	2,64	0,63	0,09
106	0,02	13,35	28,28	0,01	3,16	1,18	0,35	0,03	4,01	63,88	1,34	26,62	6,05	0,03	0,52	1,50	0,01	0,05
118	0,02	14,22	31,46	0,00	0,75	1,09	0,00	0,04	3,89	65,84	1,08	26,29	5,44	0,03	0,00	1,28	0,00	0,05
136	0,02	13,12	31,24	0,00	1,78	1,20	0,12	0,04	3,77	67,01	1,03	24,86	5,40	0,03	0,17	1,46	0,01	0,05
157	0,02	11,36	26,27	0,00	0,90	0,90	1,54	0,06	3,79	64,33	1,06	24,56	6,20	0,03	2,47	1,24	0,01	0,09
170	0,02	8,01	18,02	0,12	0,72	1,11	0,04	0,03	3,59	62,70	1,48	24,63	8,36	0,04	0,09	2,18	0,46	0,06
185	0,02	9,38	29,53	0,01	2,59	0,67	3,42	0,11	3,84	67,93	0,90	19,05	5,90	0,03	5,15	0,87	0,01	0,15
195	0,02	14,13	31,92	0,01	3,57	1,21	2,39	0,11	2,92	65,04	0,81	25,43	3,97	0,03	3,19	1,39	0,01	0,14
210	0,02	10,26	24,71	0,01	1,92	1,01	0,00	0,03	4,22	65,46	1,44	24,02	7,48	0,03	0,00	1,50	0,02	0,05
230	0,02	8,20	19,63	0,11	1,09	2,10	0,50	0,06	4,61	61,18	1,41	22,58	9,59	0,04	1,02	3,68	0,37	0,12
250	0,02	7,40	17,05	0,10	1,20	1,56	0,47	0,05	3,59	61,38	1,70	23,51	8,64	0,05	1,10	3,15	0,37	0,10
265	0,02	11,89	26,04	0,01	4,50	1,45	0,12	0,03	4,62	63,18	1,55	25,48	7,50	0,03	0,20	1,98	0,04	0,05
280	0,02	14,79	30,72	0,01	2,25	1,78	0,00	0,04	4,70	62,99	1,66	26,78	6,43	0,03	0,00	2,06	0,01	0,04
290	0,02	7,69	17,02	0,12	0,80	1,71	0,10	0,04	3,84	60,77	1,56	24,25	9,16	0,05	0,24	3,44	0,44	0,09
300	0,02	15,20	29,20	0,00	1,33	1,49	0,00	0,04	3,28	63,17	1,17	29,03	4,74	0,03	0,00	1,81	0,00	0,05
320	0,02	8,11	17,33	0,09	1,12	1,36	0,17	0,04	3,84	60,81	1,51	25,15	9,00	0,05	0,38	2,68	0,35	0,08
346	0,02	6,43	16,25	0,10	0,93	1,53	0,24	0,05	3,73	62,45	1,68	21,81	9,57	0,05	0,59	3,30	0,43	0,11
360	0,02	6,98	16,37	0,12	1,19	1,40	0,24	0,03	3,80	61,53	1,61	23,17	9,53	0,05	0,60	2,96	0,47	0,08
365	0,02	11,92	26,15	0,00	3,16	0,71	1,04	0,17	2,41	57,48	13,21	23,15	3,54	0,03	1,49	0,87	0,01	0,23
375	0,02	7,63	16,63	0,10	1,43	1,37	0,12	0,03	4,09	60,32	1,76	24,43	9,91	0,05	0,29	2,80	0,37	0,06
396	0,02	8,07	18,74	0,11	0,99	1,36	0,19	0,04	4,13	62,01	1,80	23,60	9,13	0,04	0,42	2,54	0,39	0,08
410	0,02	6,87	15,87	0,10	0,88	1,19	0,15	0,03	3,53	61,83	1,79	23,64	9,20	0,05	0,39	2,61	0,40	0,08
425	0,02	8,80	18,13	0,12	0,65	1,13	0,00	0,03	3,10	62,28	1,19	26,70	7,11	0,04	0,00	2,19	0,43	0,05
435	0,02	7,25	17,12	0,11	1,82	1,42	0,33	0,03	3,80	61,71	1,85	23,10	9,16	0,05	0,77	2,88	0,42	0,06
445	0,02	6,98	17,98	0,09	1,51	1,33	0,24	0,03	4,32	62,92	1,80	21,57	10,10	0,05	0,56	2,62	0,32	0,07
460	0,02	16,21	33,00	0,00	1,16	1,89	0,00	0,04	4,59	63,40	1,09	27,51	5,89	0,02	0,00	2,05	0,00	0,04
480	0,02	7,43	19,10	0,11	1,02	1,61	0,28	0,05	3,96	63,67	1,48	21,87	8,82	0,04	0,61	3,03	0,39	0,09
500	0,02	10,48	21,28	0,00	4,75	0,51	3,04	0,05	2,85	60,66	0,91	26,39	5,43	0,04	5,66	0,81	0,01	0,08
520	0,02	14,57	30,06	0,00	1,08	1,53	0,20	0,06	3,35	64,43	0,96	27,59	4,79	0,03	0,28	1,85	0,00	0,08
540	0,02	11,01	23,30	0,02	3,07	1,71	2,21	0,14	3,36	60,84	1,30	25,40	5,86	0,03	3,77	2,52	0,05	0,22
560	0,02	15,49	31,94	0,00	1,99	1,65	0,00	0,04	3,87	64,35	0,93	27,56	5,21	0,03	0,00	1,87	0,01	0,05
575	0,02	7,18	17,71	0,09	0,84	1,70	0,18	0,04	3,74	62,73	1,68	22,47	8,86	0,05	0,41	3,39	0,33	0,08
590	0,02	11,33	23,81	0,00	1,25	1,09	0,00	0,03	3,82	63,49	1,28	26,68	6,81	0,03	0,00	1,64	0,00	0,05
615	0,02	11,62	31,86	0,01	3,39	1,01	0,20	0,03	3,70	69,58	0,99	22,42	5,39	0,03	0,28	1,24	0,02	0,04
640	0,02	4,11	7,47	0,09	14,02	0,42	0,17	0,00	0,79	61,70	0,24	29,94	4,37	0,11	0,90	1,95	0,78	0,00
660	0,02	12,84	27,94	0,01	1,72	1,30	0,08	0,06	3,97	64,60	1,10	26,22	6,13	0,03	0,13	1,69	0,02	0,08
670	0,02	2,58	4,71	0,11	16,64	0,22	0,09	0,00	0,32	62,51	0,14	30,28	2,83	0,17	0,78	1,67	1,61	0,00
690	0,02	10,19	22,49	0,01	8,48	1,43	1,83	0,04	3,41	61,83	1,51	24,75	6,27	0,04	3,28	2,22	0,04	0,07
710	0,02	9,41	29,17	0,00	2,10	0,54	4,00	0,08	2,16	69,04	0,81	19,68	3,41	0,03	6,19	0,72	0,00	0,12
725	0,02	11,75	26,02	0,01	3,07	1,93	0,00	0,03	3,13	64,82	1,31	25,86	5,20	0,03	0,00	2,70	0,03	0,04
735	0,02	10,81	24,75	0,01	5,93	1,57	0,62	0,03	4,10	63,27	1,88	24,42	7,00	0,03	1,04	2,27	0,04	0,05
745	0,02	17,51	29,85	0,00	2,57	0,00	0,11	0,04	1,01	63,79	1,49	33,04	1,44	0,03	0,16	0,00	0,00	0,05
780	0,02	10,58	25,21	0,01	5,98	1,59	1,20	0,03	2,81	65,22	1,28	24,18	4,86	0,03	2,03	2,32	0,02	0,05
820	0,02	9,23	21,11	0,02	8,08	1,11	0,84	0,03	4,66	62,04	1,28	23,95	9,15	0,04	1,61	1,83	0,05	0,05
840	0,02	7,09	16,99	0,10	1,23	1,99	0,19	0,04	3,49	61,83	1,84	22,79	8,48	0,05	0,46	4,07	0,39	0,09
860	0,02	5,82	19,46	0,01	1,53	0,19	10,72	0,09	1,36	59,25	0,40	15,65	2,77	0,04	21,35	0,33	0,04	0,17
895	0,02	13,66	31,55	0,00	2,24	1,25	0,00	0,03	3,97	66,43	1,01	25,41	5,59	0,03	0,00	1,48	0,01	0,04
905	0,02	11,56	31,14	0,00	1,34	1,75	0,05	0,05	3,91	68,30	1,23	22,40	5,73	0,03	0,07	2,17	0,01	0,06
925	0,02	11,84	27,71	0,01	2,19	2,04	0,10	0,03	3,40	65,61	1,28	24,76	5,37	0,03	0,16	2,72	0,02	0,05
945	0,02	12,35	27,84	0,00	3,78	0,91	0,19	0,03	3,00	66,47	1,07	26,06	4,79	0,03	0,30	1,22	0,01	0,04
960	0,02	6,08	16,40	0,11	1,22	1,26	0,24	0,03	3,21	64,55	1,87	21,13	8,45	0,05	0,62	2,79	0,45	0,08
975	0,02	5,87	16,93	0,10	1,62	1,11	0,11	0,02	3,60	65,54	1,88	20,08	9,32	0,05	0,27	2,42	0,40	0,05
995	0,02	5,52	14,72	0,09	2,32	1,03	0,08	0,02	4,09	62,34	2,27	20,64	11,57	0,05	0,21	2,45	0,40	0,06
1010	0,02	5,12	14,29	0,12	2,80	0,78	0,21	0,02	3,65	63,51	2,29	20,11	10,84	0,06	0,60	1,95	0,58	0,05
1025	0,02	12,63	27,32	0,01	2,10	1,35	0,00	0,03	4,15	64,01	1,48	26,14	6,50	0,03	0,00	1,78	0,01	0,04
1035	0,02	6,71	16,63	0,10	1,04	1,60	0,04	0,03	2,84	63,89	1,98	22,76	7,30	0,05	0,09	3,47	0,39	0,07
1045	0,02	6,85	17,67	0,13	1,80	1,46	0,48	0,06	3,67	63,12	1,80	21,60	8,75	0,05	1,13	2,95	0,48	0,13
1069	0,02	12,16	30,18	0,01	3,96	1,27	0,09	0,03	3,68	67,23	1,55	23,93	5,47	0,03	0,14	1,59	0,02	0,05
1080	0,02	15,52	32,35	0,00	2,03	1,18	0,00	0,04	3,48	65,20	1,08	27,61	4,69	0,03	0,00	1,34	0,01	0,04
1100	0,02	13,21	33,42	0,01	3,27	1,24	0,00	0,04	4,58	67,16	1,74	23,46	6,15	0,03	0,00	1,41	0,02	0,05
1105	0,02	13,17	32,45	0,00	1,42	1,54	0,00	0,05	2,97	68,08	1,44	24,40	4,17	0,03				

Prof (pies)	Cr (ppm)	Co (ppm)	Cu (ppm)	Zn (ppm)	Rb (ppm)	Sr (ppm)	Mo (ppm)	Cd (ppm)	Ba (ppm)	Th (ppm)	U (%wt)	Ni (ppm)	Zr (ppm)	Tl (%WT)
19	132,00	7,30	0,00	0,00	21,80	219,00	0,00	0,00	119,00	9,00	9,00	46,00	52,00	0,47
28	186,00	21,90	87,00	0,00	35,60	105,00	0,00	0,00	219,00	12,00	6,00	36,00	68,00	0,63
37	191,00	30,80	66,00	67,00	72,20	82,60	0,00	0,00	307,00	11,00	9,00	48,00	54,00	0,60
58	241,00	31,40	86,00	125,00	87,70	127,00	0,00	0,00	349,00	11,00	0,00	39,00	47,00	0,67
68	182,00	19,60	49,00	51,00	74,30	365,00	0,00	0,00	340,00	21,00	0,00	56,00	74,00	0,68
78	226,00	33,30	52,00	127,00	58,50	115,00	0,00	0,00	308,00	12,40	0,00	39,00	50,00	0,70
90	159,00	24,90	53,00	32,00	63,70	110,00	0,00	0,00	323,00	8,00	12,00	39,00	54,00	0,52
106	197,00	26,60	82,00	120,00	77,20	146,00	0,00	0,00	405,00	10,00	0,00	49,00	77,00	0,76
118	207,00	26,00	78,00	119,00	76,90	122,00	3,00	0,00	498,00	17,00	0,00	53,00	53,00	0,66
136	177,00	26,40	61,00	127,00	79,70	117,00	0,00	4,80	683,00	14,00	0,00	47,00	55,00	0,61
157	208,00	23,30	69,00	73,00	63,10	146,00	0,00	0,00	296,00	8,00	8,00	54,00	44,00	0,56
170	197,00	25,40	74,00	89,00	73,60	162,00	0,00	0,00	334,00	8,00	14,00	31,00	55,00	0,55
185	149,00	0,00	0,00	0,00	10,10	716,00	0,00	0,00	157,00	20,00	0,00	79,00	59,00	0,50
195	146,00	0,00	0,00	0,00	9,50	926,00	0,00	0,00	743,00	18,00	0,00	255,00	73,00	0,51
210	193,00	22,10	45,00	36,00	54,30	127,00	0,00	0,00	331,00	13,00	0,00	31,00	51,00	0,70
230	156,00	21,50	25,00	25,00	97,70	212,00	0,00	0,00	420,00	24,00	13,00	34,00	80,00	0,58
250	166,00	21,20	39,00	31,00	97,30	166,00	0,00	0,00	444,00	14,00	11,00	45,00	69,00	0,60
265	156,00	18,10	47,00	82,00	89,60	114,10	0,00	0,00	503,00	16,00	0,00	49,00	70,00	0,82
280	312,00	34,30	98,00	125,00	85,60	146,00	0,00	0,00	263,00	12,00	0,00	56,00	64,00	1,04
290	157,00	23,00	48,00	48,00	106,50	160,00	0,00	0,00	422,00	19,00	11,00	41,00	71,00	0,56
300	187,00	22,80	54,00	148,00	123,60	139,00	0,00	0,00	534,00	16,00	0,00	78,00	68,00	0,69
320	151,00	24,70	43,00	74,00	84,70	128,00	0,00	0,00	342,00	17,00	0,00	39,00	58,00	0,55
346	150,00	17,60	55,00	24,00	79,00	124,00	0,00	0,00	386,00	14,00	9,00	45,00	59,00	0,56
360	174,00	19,90	49,00	47,00	82,40	151,00	0,00	0,00	376,00	13,00	10,00	47,00	61,00	0,55
365	104,00	10,60	37,00	0,00	33,50	989,00	0,00	0,00	27284,00	17,00	0,00	198,00	78,00	7,71
375	171,00	25,10	49,00	45,00	81,50	119,00	0,00	0,00	325,00	19,00	8,00	40,00	68,00	0,62
396	207,00	27,10	85,00	85,00	78,60	135,00	0,00	0,00	343,00	13,00	0,00	54,00	61,00	0,70
410	171,00	21,70	57,00	55,00	81,80	125,00	0,00	0,00	375,00	15,00	9,00	38,00	57,00	0,59
425	123,00	25,90	89,00	24,00	91,30	118,00	0,00	0,00	481,00	10,00	7,00	39,00	56,00	0,44
435	186,00	24,70	78,00	12,00	89,90	137,00	0,00	0,00	387,00	12,00	7,00	41,00	64,00	0,66
445	213,00	28,70	38,00	50,00	78,10	125,00	0,00	0,00	303,00	12,00	9,00	40,00	60,00	0,66
460	204,00	22,70	51,00	77,00	117,50	137,00	0,00	0,00	483,00	18,00	0,00	37,00	63,00	0,72
480	143,00	24,60	64,00	289,00	88,90	118,00	0,00	0,00	403,00	18,00	8,00	46,00	72,00	0,57
500	99,00	24,20	0,00	0,00	36,80	164,00	0,00	0,00	457,00	0,00	0,00	46,00	59,00	0,41
520	147,00	21,50	37,00	43,00	99,20	115,00	0,00	0,00	475,00	15,00	0,00	47,00	59,00	0,58
540	120,00	14,90	9,00	0,00	80,80	251,00	0,00	0,00	504,00	0,00	0,00	49,00	67,00	0,64
560	150,00	23,10	42,00	70,00	94,40	106,80	0,00	0,00	509,00	14,00	0,00	49,00	63,00	0,59
575	157,00	20,40	30,00	22,00	92,40	136,00	0,00	0,00	452,00	16,00	10,00	27,00	76,00	0,61
590	178,00	25,50	62,00	91,00	95,40	116,00	0,00	0,00	436,00	13,00	0,00	47,00	57,00	0,62
615	135,00	31,50	34,00	58,00	94,20	218,00	0,00	0,00	593,00	16,00	0,00	45,00	71,00	0,58
640	62,00	0,00	0,00	62,50	8,50	27,30	17,20	0,00	0,00	0,00	0,00	1313,00	8,00	0,04
660	183,00	23,10	38,00	93,00	87,00	154,00	0,00	0,00	393,00	12,30	0,00	61,00	58,00	0,61
670	56,00	0,00	0,00	51,80	4,80	6,30	17,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1665,00	0,00	0,01
690	129,00	29,00	7,00	72,00	99,80	155,00	0,00	0,00	575,00	18,00	0,00	61,00	86,00	0,70
710	103,00	4,80	0,00	0,00	41,90	140,00	0,00	0,00	250,00	12,90	0,00	51,00	49,00	0,44
725	164,00	12,60	23,00	17,00	87,20	113,00	0,00	0,00	417,00	18,00	0,00	28,00	76,00	0,67
735	180,00	26,70	31,00	62,00	89,80	138,00	0,00	0,00	391,00	16,00	0,00	44,00	72,00	0,94
745	50,00	6,80	0,00	32,50	25,50	134,30	0,00	0,00	6140,00	6,10	0,00	58,00	31,00	0,89
780	121,00	15,30	8,00	26,00	79,10	98,20	0,00	0,00	464,00	10,70	0,00	40,00	52,00	0,63
820	111,00	8,50	43,00	33,00	80,60	97,80	0,00	0,00	542,00	13,00	0,00	57,00	73,00	0,56
840	192,00	19,20	64,00	70,00	107,00	117,00	0,00	0,00	447,00	21,00	13,00	45,00	69,00	0,65
860	53,00	0,00	0,00	0,00	11,10	240,00	0,00	0,00	599,00	8,00	0,00	47,00	25,00	0,17
895	168,00	19,40	44,00	116,00	78,70	106,00	0,00	0,00	465,00	13,00	0,00	40,00	69,00	0,62
905	213,00	17,30	46,00	79,00	79,50	181,00	0,00	0,00	404,00	9,00	0,00	38,00	63,00	0,72
925	166,00	12,40	25,00	50,00	121,40	118,00	0,00	0,00	606,00	16,00	0,00	50,00	76,00	0,69
945	121,00	21,80	15,00	0,00	65,40	179,00	0,00	0,00	459,00	9,00	0,00	38,00	73,00	0,57
960	183,00	19,10	47,00	25,00	68,80	114,00	0,00	0,00	474,00	11,00	0,00	40,00	53,00	0,61
975	146,00	18,90	31,00	20,00	57,00	93,00	0,00	0,00	349,00	10,00	8,00	29,00	67,00	0,62
995	216,00	17,30	65,00	41,00	44,70	113,00	0,00	0,00	340,00	8,00	0,00	50,00	61,00	0,69
1010	177,00	16,40	36,00	0,00	37,50	103,00	0,00	0,00	322,00	7,00	7,00	43,00	70,00	0,66
1025	211,00	15,70	43,00	88,00	89,10	116,50	0,00	0,00	502,00	13,30	0,00	64,00	59,00	0,81
1035	144,00	11,30	24,00	26,00	95,50	95,50	0,00	0,00	540,00	15,00	0,00	44,00	69,00	0,66
1045	170,00	10,20	50,00	0,00	72,60	189,00	0,00	0,00	454,00	15,00	0,00	47,00	60,00	0,65
1069	222,00	23,90	46,00	50,00	75,60	158,00	0,00	0,00	533,00	18,00	0,00	50,00	72,00	0,89
1080	166,00	21,70	75,00	25,00	71,80	138,00	0,00	0,00	595,00	13,00	0,00	55,00	56,00	0,69
1100	281,00	27,20	49,00	115,00	73,60	166,00	0,00	0,00	433,00	12,00	0,00	61,00	72,00	1,11
1105	264,00	14,80	163,00	66,00	99,90	243,00	0,00	0,00	706,00	13,00	0,00	57,00	58,00	0,88
1134	152,00	18,50	67,00	25,00	74,20	194,00	0,00	0,00	665,00	13,00	0,00	40,00	45,00	0,54

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados de XRF.



Figura 3-23: Descripción del corazón y análisis de XRD y XRF de la secuencia perforada en el pozo estratigráfico Moambo-1



Fuente: Elaboración propia a partir de análisis litológico, XRD y XRF.

4. Discusión

4.1 Formaciones Perforadas por el pozo

Formación San Cayetano

La unidad perforada por el pozo en el intervalo de 1.281 a 188 pies, corresponde a secuencias granodecrecientes desde arenitas conglomeráticas hasta litoarenitas de grano medio/fino, con diagénesis baja (Figura 3-23), en algunos casos en este intervalo se presentan rasgos de diagénesis tardía deducida a partir de los datos de cristalinidad de Kübler (Figura 3-19) y soportado por la incidencia de elementos característicos de derivados autigénicos Fe_2O_3/MgO (Figura 3-22). Estos paquetes están altamente cementados, lo que hace que las rocas tengan una baja porosidad, tanto microscópicamente como macroscópicamente.

En la base de la unidad perforada (1057,5 pies) se reporta la especie *Rzehakina epigona* (Universidad de Caldas, 2016d), esta especie fue documentada por Duque-Caro (1967) en la Plancha 44 en sedimentos provenientes de la Formación San Cayetano, y se indica que esta especie es característica del Paleoceno inferior.

A partir de la descripción litológica y bioestratigrafía se interpreta que el pozo estratigráfico Moambo-1 atravesó la Formación San Cayetano en el intervalo de 1.281 a 188 pies.

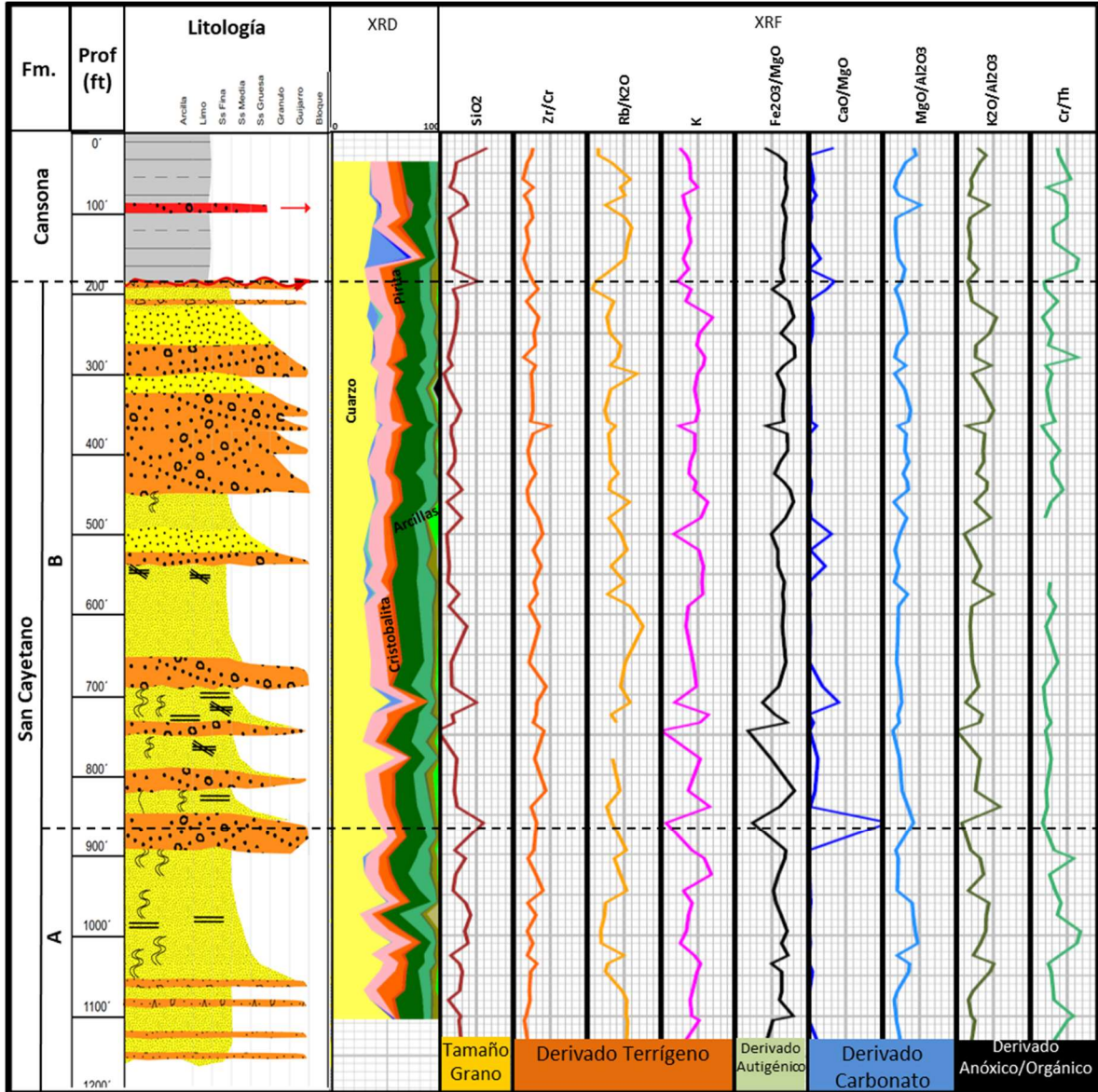
Por la variabilidad en las facies encontradas, la Formación San Cayetano se agrupó en dos segmentos denominados, de base a techo, como segmentos A y B, entre los 1,281-863 pies y los 863-188 pies, de manera correspondiente, donde el segmento B se caracteriza por tener mayor contenido de arcillas y conglomerados en comparación con el segmento A.

Formación Cansona

La secuencia perforada por el pozo al tope (188-0 pies) está conformada por lodolitas silíceas en su mayoría con contenido calcáreo, manifestado por la presencia del mineral calcita y aumento relativo de las relaciones CaO/MgO y $\text{MgO/Al}_2\text{O}_3$, a partir del índice de Kübler se puede interpretar que esta unidad presenta diagénesis baja. La secuencia perforada está altamente tectonizada, la cual se encuentra fallada en su base y parte media.

Ecopetrol (2001a y b) en la cantera San Carlos (punto de perforación del pozo) describe a la unidad aflorante como la Formación Cansona, la cual corresponde a una unidad con interstratificación de capas delgadas de chert, micritas y limolitas con shales; en este mismo reporte, se indica que la secuencia se encuentra altamente tectonizada y fallada, adicional a lo anterior, en la cantera se encontró un espécimen de *Güembelina sp.*, sugiriendo una edad Cretácica (Geotec Ltda, 2003). Lo anterior permite interpretar que el tope de la sección perforada por el pozo corresponde a la Formación Cansona, la cual está fallada en su base poniendo rocas más jóvenes de la Formación San Cayetano a la base, en contacto con las de la Formación Cansona al tope.

Figura 4-1. Relaciones usadas para la interpretación estratigráfica del pozo estratigráfico Moambo-1



Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados de XRD y XRF.

4.2 Análisis de incidencia volcánica

La incidencia volcánica ha sido reportada en sedimentos de las formaciones Cansona y San Cayetano por diferentes autores (Silva *et al.*, 2019; Gálvez, 1998, Duque-Caro, 1973).

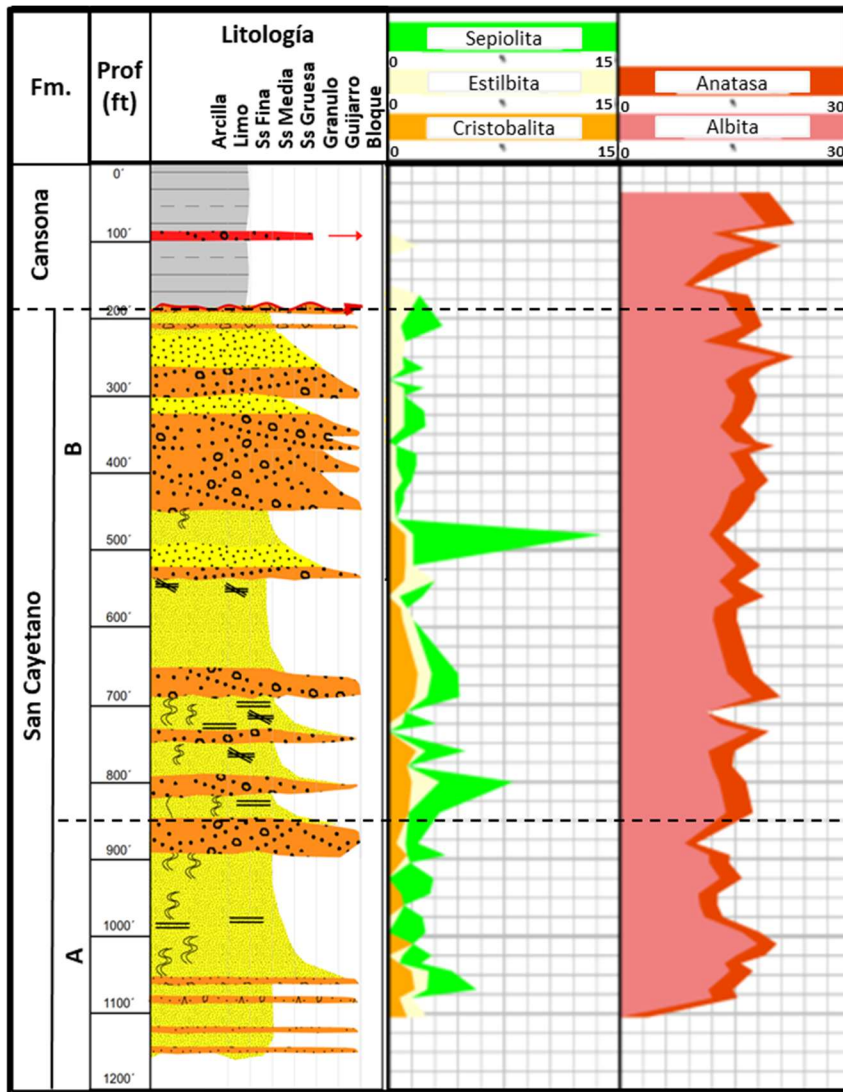
Para determinar la incidencia volcánica de las unidades atravesadas por el pozo, se usaron los minerales de estilbita y cristobalita, los cuales están asociados a eventos volcánicos, donde se interpreta que, a mayor valor en minerales estilbita y cristobalita, mayor incidencia volcánica en las muestras (Gottardi, 1989 y Drees *et al.*, 1989; Gutiérrez y Effland, 2010).

La estilbita es un silicato del grupo de las zeolitas; su ocurrencia se asocia a procesos geotermales donde ocurre disolución de vidrio volcánico con silicatos (Gottardi, 1989). La cristobalita es un mineral dominante en rocas volcánicas, y se observa como un mineral detrítico en suelos formados sobre material volcánico piroclástico (Drees *et al.*, 1989; Gutiérrez y Effland, 2010).

La Formación San Cayetano presenta incidencia volcánica baja dada por la ocurrencia y el porcentaje de los minerales sepiolita, estilbita y cristobalita (Figura 4-2). Esta incidencia está asociada a flujos viscosos a partir de episodios volcánicos.

La Formación Cansona presenta incidencia volcánica nula (Figura 4-2).

Figura 4-2: Incidencia de minerales de sepiolita, estilbita, cristobalita, anatasa y albita en el pozo estratigráfico Moambo-1, todos ellos relacionados con el aporte volcánico durante la depositación de la secuencia



Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados de XRD.

4.3 Análisis del ambiente de depósito

Formación San Cayetano

En esta unidad se encontró una alta incidencia del mineral sepiolita, el cual se caracteriza por tener alto contenido de magnesio (Mg) en su composición química.

Se ha interpretado que la sepiolita se forma en ambientes donde la concentración de aluminio (Al) es baja, y el pH es alcalino (Isphording, 1973), estos ambientes se traducen a plataformas carbonatadas en regiones tropicales y en aguas marginales de elevada salinidad (Calvo *et al.*, 2009). Condiciones similares existen en lagos y en algunas cuencas continentales restringidas. Lo anterior permite que la sepiolita se pueda interpretar como un mineral autigénico que se deposita en ambientes continentales evaporíticos (Calvo *et al.*, 2009) (Figura 4-3).

Tabla 4-1: Principales minerales de arcilla autigénicos en ambientes continentales evaporíticos

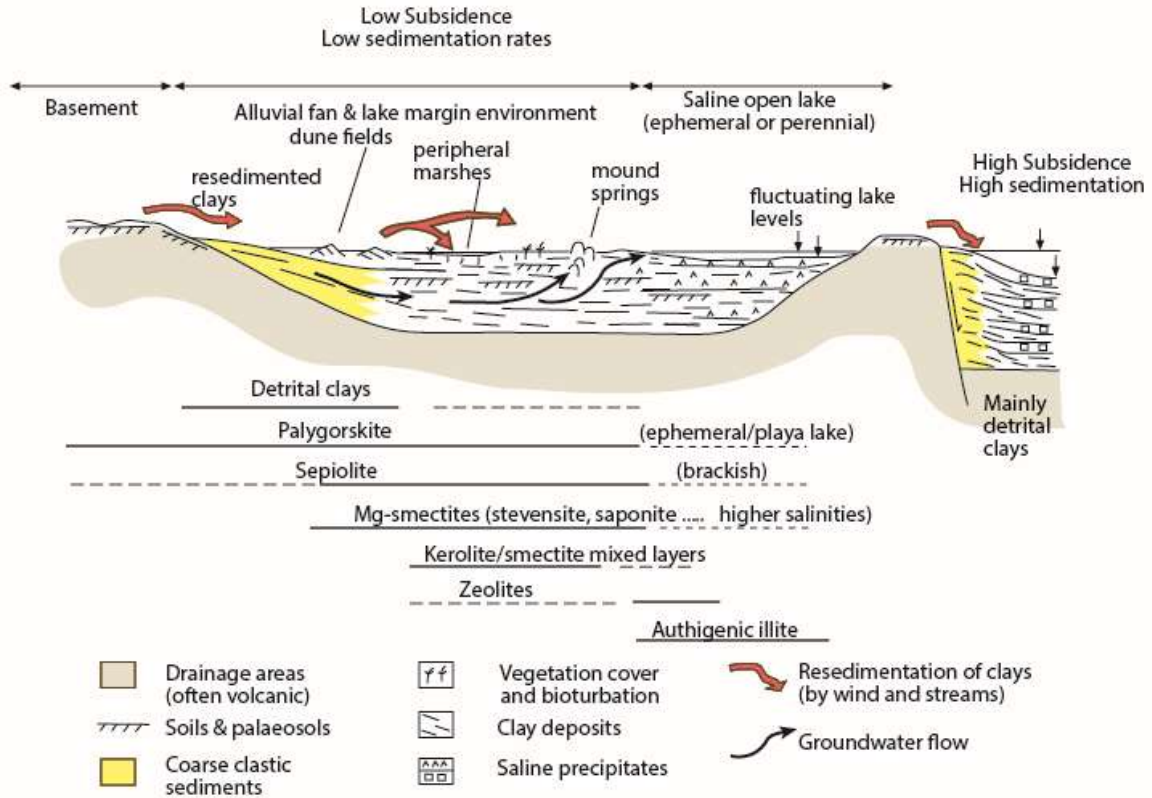
	Structural Formula	Mg/Si	Al/Si
Saponite	$(Ca, Na)_{0.3}(Mg, Fe)_3(Si, Al)_4O_{10}(OH)_2(OH)_2 \cdot 4H_2O$	0.76-0.87	0.07-0.18
Kerolite	$Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2 \cdot H_2O$	0.75	0.0
Stevensite	$Na_{0.15}Mg_3Si_4O_{10}(OH)_4$	0.75	0.0
Hectorite	$Na_{0.3}(Mg, Li)_3Si_4O_{10}(F, OH)_2$	0.67	0.0
Sepiolite	$Mg_4Si_6O_{15}(OH)_2 \cdot 6H_2O$	0.67	0.0
Palygorskite	$(Mg, Al)_2Si_4O_{10}(OH) \cdot 4H_2O$	0.17-0.49	0.02-0.31

Fuente: Calvo *et al.*, (2009).

La autigénesis (depositación mediante mecanismos de precipitación) en cuencas evaporíticas está favorecida por áreas de playas marginales, donde las tasas de aporte de arcillas detríticas son bajas (Calvo *et al.*, 2009) (Figura 4-3).

Esto abarca depresiones interdunales, planicies de arena periféricas y planicies lodosas de carbonato. En estas áreas de baja sedimentación la transformación de las arcillas precursoras es más efectiva, impulsada por episodios de entrada de agua a la superficie y descargas de agua subterránea (Calvo *et al.*, 2009).

Figura 4-3. Distribución ambiental de los minerales de arcilla autigénica en ambientes salinos continentales, enfatizando las diferencias entre cuencas con tasas de subsidencia baja vs. Cuencas con subsidencia rápida. Las arcillas autigénicas se forman principalmente en los márgenes de ambientes de lagos salinos.



Fuente: Calvo *et al.*, 2009.

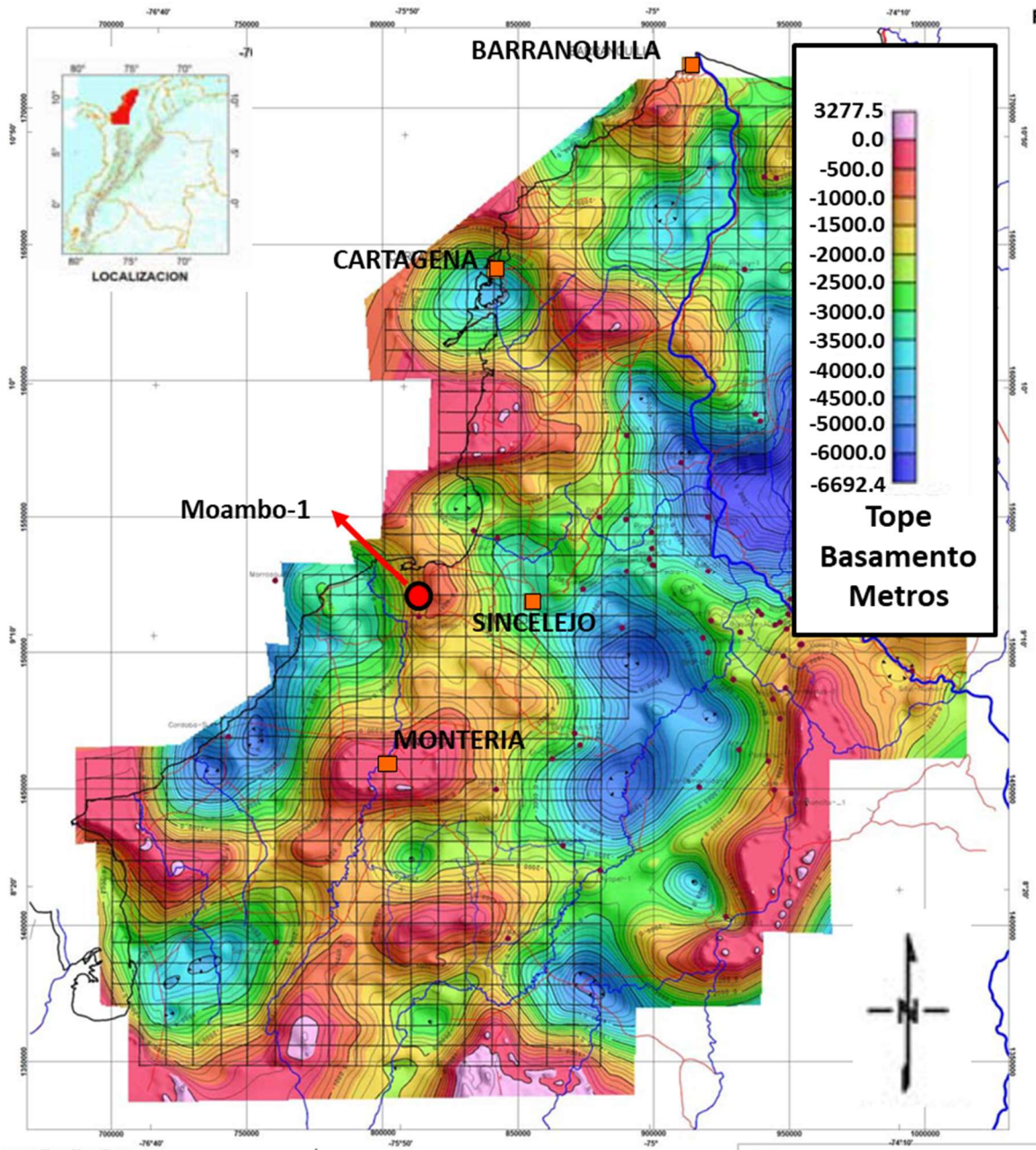
La sección perforada de la Formación San Cayetano se caracteriza por presentar paquetes granodecrecientes de litoarenitas desde conglomeráticas hasta de grano medio/fino, soportadas por las variaciones en los elementos terrígenos (Figura 4-1), indicando variaciones del nivel del mar y, por lo tanto, variaciones en la distancia de aporte de los sedimentos. El ambiente de depositación se interpreta como transicional que varía de llanura costera hacia la base de los paquetes (flujos viscosos evidenciados en los conglomerados arenosos, y la ocurrencia de sepiolita, la cual es característica de ambientes subexpuestos) a *shoreface* medio hacia el tope de los paquetes (estructuras sedimentarias tipo *slump*, presencia de foraminíferos), estos ambientes son soportados con los valores de cristalinidad de la caolinita (FWHM de 0,3°θ); en algunos paquetes de la parte media-baja de la sección se evidencian estructuras plano-paralelas y bioturbación,

características de un mar somero, lo cual contrasta con los valores de cristalinidad de la caolinita que es indicativa de un ambiente con mayor influencia marina (FWHM de $0,4^\circ\theta$).

Pese a que en la cuenca los ambientes de depositación interpretados previamente para esta formación corresponden principalmente a turbidíticos (Duque-Caro, 1973) y de abanico submarino (Reyes y Zapata, 2001), y dado que este trabajo cubre una interpretación muy localizada al punto del pozo, la variación de ambiente puede corresponder a la existencia de un paleoalto localizado al momento de depositación de los sedimentos en este punto, evidenciado en el mapa de aeromagnetogravimetría, donde al este del sitio de perforación del pozo se tiene un alto de basamento (

Figura 4-4), estos paleoaltos han sido reportados en por Reyes (2001); por otro lado, se podría interpretar que el ambiente de depositación de esta formación en la cuenca Sinú San Jacinto, es concordante con lo documentado en estudios recientes, los cuales sugieren ambientes de depositación para esta unidad de transicionales a fluviales (ATG, 2009 y Universidad de Caldas, 2009).

Figura 4-4. Interpretación Aeromagnetogravimétrica del Litoral Caribe Colombiano – Tope del Basamento Pre-Terciario



Fuente: ANH, 2006

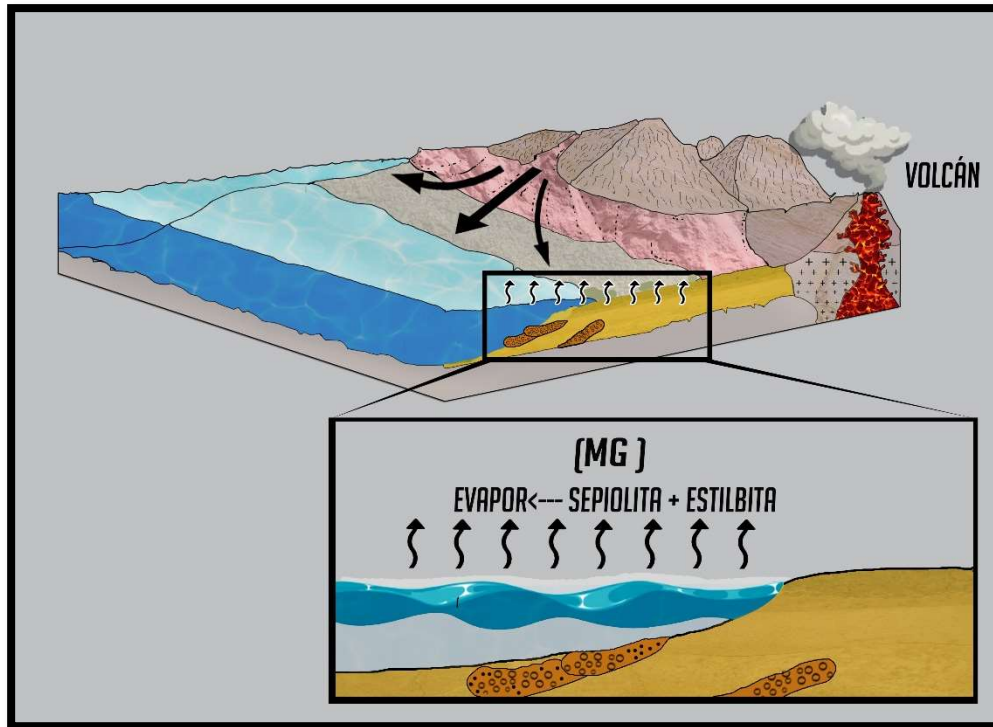
Proceso de sedimentación

Las estructuras sedimentarias y la arquitectura de los clastos se dan por eventos volcánicos, los cuales se desarrollan como variaciones de flujos de mayor viscosidad a

flujos de menor viscosidad, dependiendo de si son retrabajados por los ambientes marinos someros o no.

En el proceso de sedimentación se evidencia que: 1) los conglomerados se depositaron en respuesta a flujos de tracción de fondo y estos se caracterizan por tener mayor relación de SiO₂, indicativa de mayor tamaño de grano en los sedimentos, y 2) hacia los tope de las secuencias granodecipientes los flujos de depósito fueron colmatados y, como consecuencia de esto, se produce evaporización de la parte superior de los sedimentos y quedan minerales arcillosos característicos, como la sepiolita (Figura 4-5).

Figura 4-5: Modelo de ambiente de depositación de la Formación San Cayetano. La depositación de los conglomerados se da por flujos de tracción y hacia el tope los sedimentos se colmatan y quedan subexpuestos



Fuente: Elaboración propia, resultado de la interpretación de ambiente de depósito.

Interpretación del ambiente: se deduce de llanura costera (subexpuesta) en la parte superior de la sección perforada, a *shoreface* medio, en la parte inferior.

Formación Cansona

Dado el contenido de carbonatos y los valores de cristalinidad de la caolinita (FWHM de $0,45^\circ\theta$), se deduce que la Formación Cansona fue depositada en un ambiente marino *offshore*, esto es concordante con lo establecido por Ingeominas (2001), donde se establece un ambiente batial profundo a pelágico.

Este segmento presenta menor incidencia de elementos terrígenos y, por ende, mayor distancia para transportar los sedimentos de la fuente. Adicional a lo anterior, se puede deducir que, basados en los elementos representativos de anoxia, este segmento fue depositado en un ambiente de mayor anoxia (Figura 4-1) soportando el ambiente marino.

4.4 Análisis geoquímica orgánica

Formación San Cayetano:

La Formación San Cayetano presenta valores promedio de contenido de materia orgánica (TOC por sus siglas en inglés) de 1.5% los cuales son indicativos de una roca generadora regular (McCarthy *et al.*, 2011), soportado por los bajos contenidos de hidrocarburos libres y el bajo potencial de generación de hidrocarburos.

Esta formación se encuentra en ventana temprana de generación de aceite (Ro por encima de 0,6 %), (

Figura 4-8), la cual presenta kerógeno tipo II/III, con predominio de kerógeno tipo III, el cual es de origen terrestre (Tissot *et al.*, 1974), concordante con el ambiente de depósito interpretado para esta formación.

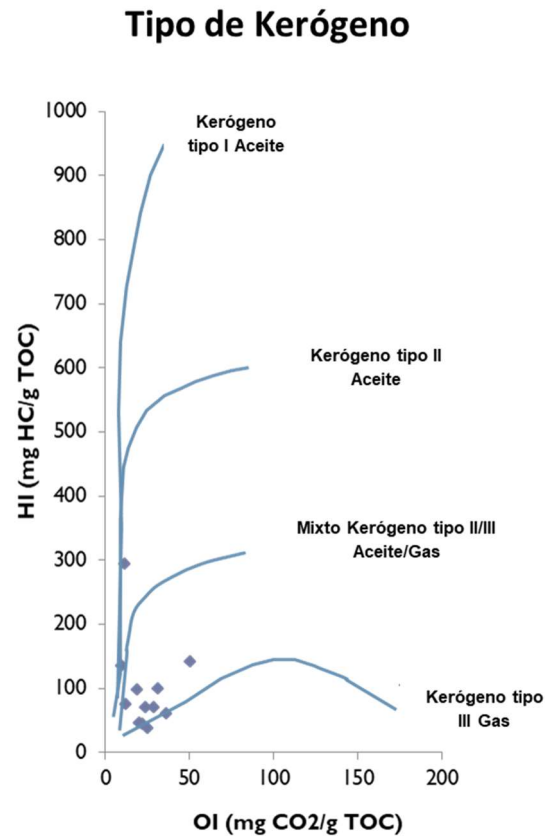
En cuanto al análisis de los elementos característicos de ambientes anóxicos, se tiene que la Formación San Cayetano presenta contenido bajo en derivados orgánicos, teniendo un aumento relativo de los mismos en el segmento A (base de la secuencia), esto indica que este segmento se depositó en ambientes más restringidos y profundos.

La geoquímica orgánica interpretada para esta formación en el pozo estratigráfico Moambo-1 concuerda con lo reportado por Montes (2009), en donde se indica que presenta kerógenos tipo II y III y valores de TOC por debajo del 2%.

Formación Cansona

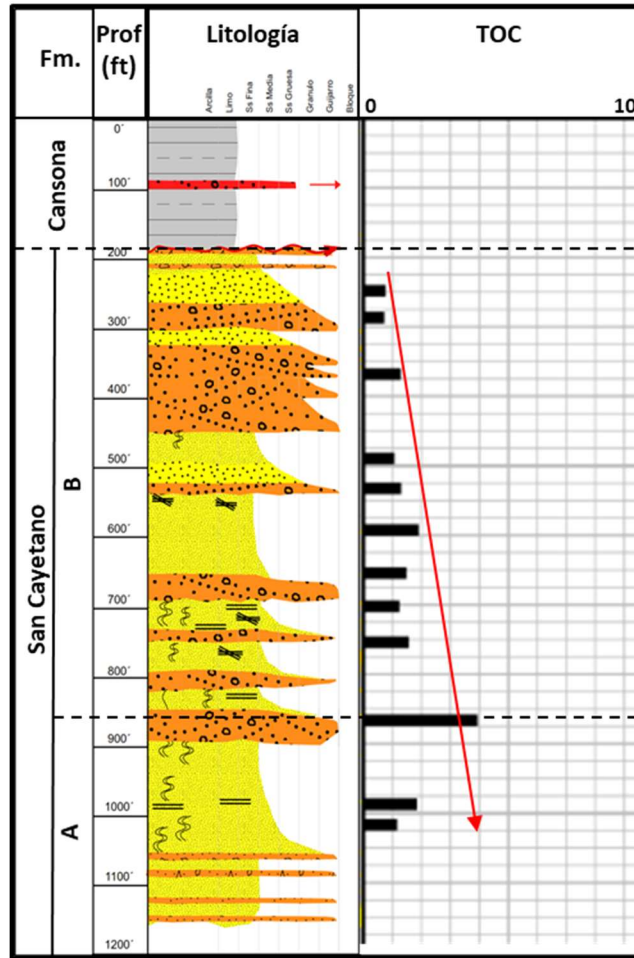
Para la Formación Cansona no se tienen datos de geoquímica orgánica en el pozo estratigráfico Moambo-1. A partir del análisis de los elementos característicos de ambientes anóxicos (K_2O/Al_2O_3 y Cr/Th), se tiene que esta presenta aumento en el contenido de derivados orgánicos, comparado con toda la sección del pozo, indicativo de ambientes de depositación restringidos y profundos, soportando una vez más el ambiente interpretado como marino *offshore*.

Figura 4-6: Análisis de tipo de kerógeno usando el diagrama de Van Krevelen



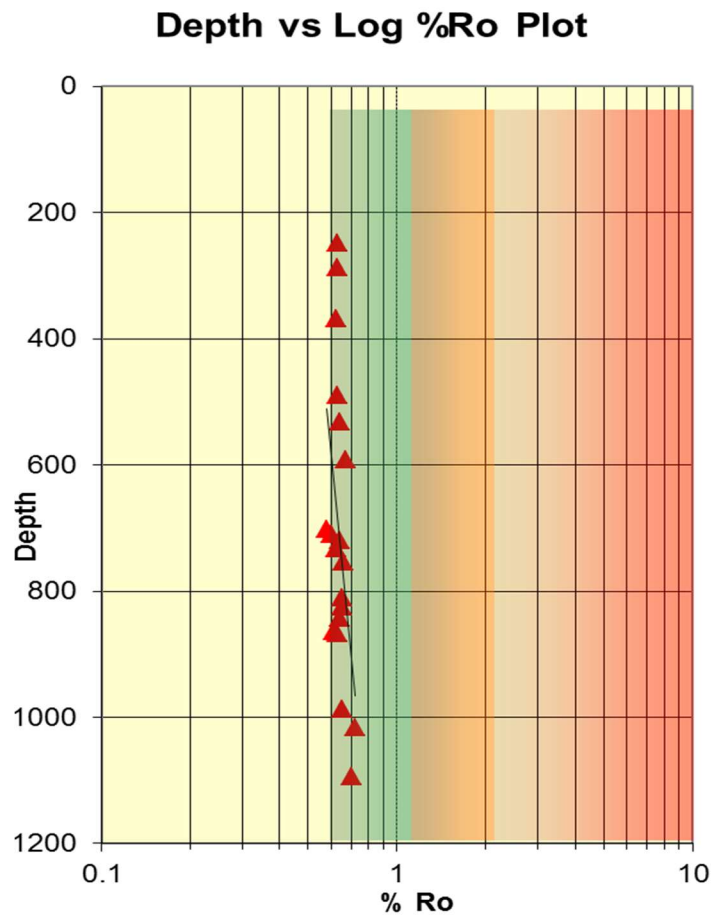
Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de pirolisis (Universidad de Caldas, 2016a).

Figura 4-7: Contenido de materia orgánica TOC en la sección perforada



Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de TOC (Universidad de Caldas, 2016a) y la descripción litológica.

Figura 4-8. Diagrama de la reflectancia de vitrinita en profundidad del pozo estratigráfico Moambo-1



Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de Ro (Universidad de Caldas, 2016c).

5. Conclusiones

El pozo estratigráfico Moambo-1 atravesó en el tope, 188 pies de la unidad cretácica correspondiente a la Formación Cansona, la cual se encuentra altamente tectonizada y está en contacto fallado con las rocas Paleocenas de la Formación San Cayetano en la base, la cual está conformada por lodolitas silíceas depositadas en un ambiente marino *offshore* somero, indicado por el índice de cristalinidad de la caolinita ($>0,4^\circ 2\theta$) y el contenido calcáreo de las rocas analizadas). Pese a que las relaciones elementales de K_2O/Al_2O_3 y Cr/Th indican que este es el intervalo de mayor contenido orgánico en el pozo, no fue posible determinar el potencial como roca generadora, dada la poca representatividad del intervalo perforado, y la falta de análisis de geoquímica orgánica en el mismo.

La Formación San Cayetano fue perforada en la base del pozo y corresponde a secuencias granodecrecientes de litoarenitas desde conglomeráticas hasta de grano medio/fino con diagénesis baja a tardía, las cuales presentan alta cementación y la baja porosidad, lo que disminuye el potencial de roca reservorio de esta unidad en el pozo.

El ambiente de depositación se caracteriza por flujos de alta viscosidad a la base de las secuencias, con flujos de menor viscosidad al tope de las mismas, todos estos con aporte volcánico bajo, evidenciado por la presencia de arcilla tipo estilbita y cristobalita. Hacia el tope de las secuencias se presentó somerización del ambiente y colmatación de los flujos, lo que ocasiona evaporación de los sedimentos, y permite la depositación de minerales arcillosos, como la sepiolita.

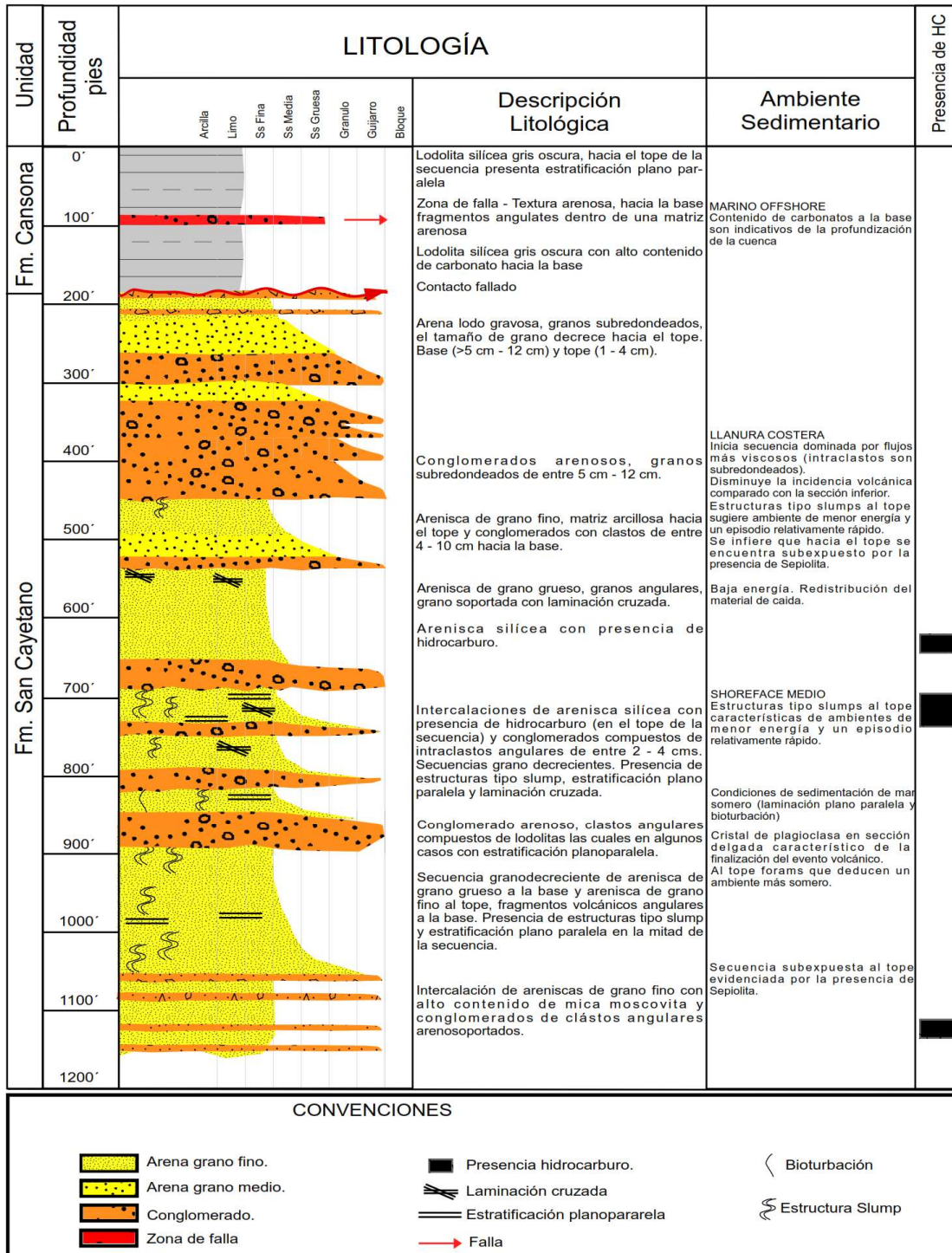
El ambiente de depositación de la Formación San Cayetano a la altura del pozo estratigráfico Moambo-1 se interpreta como transicional que varía de llanura costera hacia la base de las secuencias, a *shoreface* medio hacia el tope de los paquetes, donde se

tienen episodios evaporíticos; el índice de cristalinidad de la caolinita soporta esta interpretación. El ambiente de depositación varía de lo previamente interpretado en la cuenca para el mismo intervalo, esto se da potencialmente por la existencia de un paleoalto al momento de depositación de los sedimentos al este del pozo o podría equivaler a la confirmación de un ambiente transicional a fluvial de la Formación San Cayetano en la cuenca Sinú Jacinto, confirmando lo documentado por la Universidad de Caldas (2009).

Así mismo, a partir de la interpretación de datos de geoquímica orgánica existentes para el pozo, se determinó que esta formación, pese a encontrarse en ventana de generación de aceite, tiene bajo potencial como roca fuente, debido al predominio de kerógeno tipo III, indicado por los índices de Hidrógeno.

A. Anexo: Descripción litológica del pozo estratigráfico Moambo-1

COLUMNA ESTRATIGRÁFICA POZO MOAMBO-1



Fuente: Elaboración propia resultado del análisis litológico del pozo estratigráfico Moambo-1.

Referencias

Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH) (2006). Adquisición, Procesamiento e Interpretación de datos de Aerogravimetría en el Litoral Caribe – Contrato No.: 073. Carson para Agencia Nacional de Hidrocarburos.

Aguilera, R. (2011). *Sinú and San Jacinto Basins* (Vol. 12). ANH-University EAFIT, Department of Geology.

ATG Ltda. (2009). Cartografía geológica, levantamiento de columnas estratigráficas, toma de muestras y análisis bioestratigráficos. Sección Chalán (Cuenca Sinú-San Jacinto). Reporte interno a la ANH.

Bala, P., Samantaray, B. y Srivastava, S. (2012). Dehydration transformation in Ca-montmorillonite. *Bulletin of Materials Science*, 23, 61-7.

Bermúdez, H. e Hincapié, G. (2008). *Cartografía y geología estructural Provincias Tectónicas y Evolución Geológica*. ANH-Universidad de Caldas.

Bonilla, G. (2008). *Caracterización mineralógicas y paleoambiental de las arcillolitas de la Formación Guaduas*. Universidad Nacional de Colombia.

Bourke, A. y Ross, P. S. (2015). Portable X-ray fluorescence measurements on exploration drill-cores: Comparing performance on unprepared cores and powders for 'whole-rock' analysis. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis* 16, 2014-326. 10.1144/geochem2014-326.

Brouwer, P. (2010). *Theory of XRF- getting acquainted with the principles*. Pan analytical. ISBN: 90- 9016758-7.

Caro, M. (2003). *Structural evolution of the San Jacinto fold belt*. NW Colombia.

Caro, M. (2009). Interpretación programa sísmico 2D Sinú San Jacinto Sur 2008. Geokinetics. Reporte interno a la ANH.

Calvo, J. P., Blanc-Vallerón, M. M. P., Rodríguez-Arandía, J., Rouchy, J. M. y Sanz-Montero, M. (2009). Authigenic clay minerals in continental evaporitic environments. *IAS Spec.*, 27, 129-51.

- Chenevart, CH. (1963). Les dorsales transverses anciennes de Colombie et leurs homologues d'Amérique latine. *Ecl. Geol. Helv.*, 56(2), 907-27.
- Chung, F. H. (1974). Quantitative interpretation of X-ray diffraction patterns of mixtures. I. Matrix flushing method for quantitative multicomponent analysis. *Journal of Applied Crystallographic*, 7, 519-25.
- Cuven, S. y Francus, P. y Lamoureux, S. (2010). Estimation of grain size variability with micro X-ray fluorescence in laminated lacustrine sediments, Cape Bounty, Canadian High Arctic. *Journal of Paleolimnology*, 44, 803-17. 10.1007/s10933-010-9453-1.
- Drees, L. R., Wilding, L. P., Smeck, N. E., Senkayi, A. L. (1989). Silica in soils: quartz and disordered silica polymorphs. En S. B. Weed (Ed.), *Minerals in Soil Environments*. Soil Science Society of America Madison Wisconsin.
- Driskill, B., Pickering, J. y Rowe, H. (2018). *Interpretation of High Resolution XRF data from the Bone Spring and Upper Wolfcamp, Delaware Basin, USA*. URTeC Technical Program.
- Duque-Caro, H. (1967). *Informe Bioestratigráfico preliminar de los cuadrángulos D-8 y E-8. Informe 1522*. Servicio Geológico Nacional.
- Duque-Caro, H. (1972). Ciclos Tectónicos y Sedimentarios en el Norte de Colombia y sus Relaciones con la Paleoecología. *Boletín Geológico Ingeominas*, 19(3).
- Duque-Caro, H. (1973). The geology of the Monteria area. *Colombian Society of Petroleum Geologists and Geophysicists 14th Annual field conference, Guidebook*, 397-431.
- Duque-Caro, H. (1979). Major structural elements and evolution of northwestern Colombia. *AAPG Memoir*, 29, 329-51.
- Duque-Caro, H.; Guzmán, G. y Hernández, R. (1996). Geología de la Plancha 38, Carmen de Bolívar. INGEOMINAS. Bogotá.
- Empresa Colombiana de Petroleos S.A. (Ecopetrol) (1991). Informe geológico final pozo Punta Negra-1. Gerencia de Exploración. ECOPETROL
- Empresa Colombiana de Petróleos S. A. (Ecopetrol) (2001a). *Evaluación Post-Perforación pozos VIM-Sinu*. ECOPETROL.
- Empresa Colombiana de Petroleos S.A. (Ecopetrol) (2001b). Informe geológico regional de la provincia petrolífera del noroccidente colombiano. ECOPETROL
- Flinch, J. F. (2003). Structural evolution of the Sinu-Lower Magdalena area (Northern Colombia). En C. Bartolini, R. T. Buffler y J. Blickwede (Eds.), *The Circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon habitats, basin formation, and plate tectonics* (pp. 776-96). *AAPG Memoir* 79.

Folk, R.L. 1954. The Distinction between grain size and mineral composition in sedimentary rock nomenclature. *Journal of Geology*, 62 (4): 344-359.

Folk, R.L. 1974. *Petrology of Sedimentary Rocks*. The University of Texas, Austin. USA. 184p

Gálvez, P. E. (1998). Caracterización petrográfica y determinación de la fuente de aporte, de los niveles detríticos de las Formaciones: Cansona (Campaniano-Maestrichtiano) y San Cayetano (Paleoceno Superior), en el Cinturón de San Jacinto (Plancha 37 Trabajo de Grado). Universidad Nacional de Colombia.

Geotec Ingeniería (1997). *Cartografía geológica de la región del Sinú (Noroeste de Colombia)* (Planchas 50, 51, 59, 60, 61, 69, 70, 71, 79 y 80, (3)). GEOTEC.

Geotec Ingeniería (2003). *Geología de los cinturones Sinú San-Jacinto* (Planchas 1:100000. 50 Puerto Escondido, 51 Lorica, 59 Mulatos, 60 Canalete, 61 Montería, 69 Necoclí, 70 San Pedro de Urabá, 71 Planeta Rica, 79 Turbo y 80 Tierralta. Informe I20024. Memoria explicativa). INGEOMINAS.

Gottardi, G. (1989). *The genesis of zeolites*. Istituto di Mineralogia e Petrologia.

Gulf Oil Exploration y Production Company (1983). *Geology and Hydrocarbon Evaluation of Northwest Colombia*. Gulf Oil Exploration y Production Company.

Gutiérrez, M. C. y Effland W. (2010). *21-Pedogenic and Biogenic Siliceous Features, Interpretation of Micromorphological Features of Soils and Regoliths*, Elsevier.

Guzmán, G., Clavijo, J., & Barrera, R. (1994). Geología Bloque Santero, Secciones estratigráficas. (Informe inédito). Bogotá: INGEOMINAS.

Guzmán, G., Gómez, E. y Serrano, B. (2004). *Informe del mapa geológico de los cinturones del Sinú, San Jacinto y borde occidental del valle Inferior del Magdalena – Caribe colombiano*. INGEOMINAS

Guzmán, G. (2007). Stratigraphy and Sedimentary Environment and Implications in the Plato Basin and the San Jacinto Belt Northwestern Colombia [Doctoral Thesis, University of Liege]. Universidad de Liege.

Hauff P.L., Starkey H.C., Blackmon P.D., y Pevear D.R. (1984). Sample preparation procedures for the analysis of clay minerals by X-ray diffraction. U.S. Geological Survey.

Hincapié, G. y Ruiz, C. (2008). Inventario, interpretación y evaluación integral de la información geológica, geofísica y gequímica en la cuenca Sinú – San Jacinto y el área especial Sinú. Resumen ejecutivo. Reporte Interno a la ANH.

Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS) (1997). *Atlas geológico digital de Colombia. Escala 1:500000*. Ministerio de Minas y Energía y INGEOMINAS.

Instituto Colombiano de Geología y Minería (1999). *Geología plancha 51-Lorica*. Ministerio de Minas y Energía y INGEOMINAS.

Instituto Colombiano de Geología y Minería (2001). *Geología de la plancha 44 Sincelejo y 52 Sahagún*. INGEOMINAS.

Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS) (2003). *Geología de los Cinturones Sinú – San Jacinto (50 Puerto escondido, 51 Lorica, 59 Mulatos, 60 Canalete, 61 Montería, 69 Necoclí, 70 San Pedro de Urabá, 71 Planeta Rica, 79 Turbo, 80 Tierralta Escala 1:100.000)*. Memoria Explicativa

Isphording, W. C. (1973). Discussion of the occurrence and origin of sedimentary palygorskite-sepiolite deposits. *Clays & Clay Minerals*, 21, 391-401.

Kellogg, J., Ogujiofor, I. y Kansakar, D. (1985). *Cenozoic tectonics of the Panama and north Andes Blocks* [Congreso]. VI Latin-American Geological Congress.

Kellogg, J. y Toto, E. A. (1992). Structure of the Sinu-San Jacinto fold belt – An active accretionary prism in northern Colombia. *Journal of South American Earth Sciences*, 5(1), 211-222.

Kübler, Bernard (1964). Les argiles, indicateurs de métamorphisme. *Rev. Institut Français du Pétrole*. 19: 1093–1112

Kübler, B. (1967). La cristallinité de l'illite et les zones tout a fait superieures du métamorphisme. En *Étages tectoniques, Colloque de Neuchâtel 1966, a La Baconniere*. Neuchâtel.

Lafargue E., Marquis F., Pillot D. (1998). Rock-Eval 6 applications in hydrocarbon exploration, production, and soil contamination studies. *Oil & Gas Science and Technology*, 53, 421-37.

LT Geoperforaciones y Minería LTDA (2015). *Informe geológico pozos Moambo-1 y Moambo-1ª*. LT Geoperforaciones y Minería LTDA.

Mantilla-Pimiento, A. M., Jentsch, G., Kley, J. y Alfonso-Pava, C. (2009). *Configuration of the Colombian Caribbean Margin: Constraints from 2D Seismic Reflection data and Potential Fields Interpretation*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.

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

- Milosevic, S., Tomasevic-Canovi, M., Dimitrijevic, R., Petrov, M. y Djuricic, M. (1992). Amorphization of aluminosilicate minerals during micronization process. *Am. Ceram. Soc. Bull.*, 71.
- Moore, D. M. y Reynolds, R. C. (1997). *X-ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals* (2nd Ed.). Oxford University Press.
- Morford, J. L., Emerson, S. R., Breckel, E. J. y KIM, S. H. (2005). *Diagenesis of oxyanions (V, U, Re and Mo) in pore waters and sediments from a continental margin*. *Geochim y Cosmochim.*
- Núñez-Betelu, L. y Baceta J. I. (1994). Basics and Application of Rock-Eval/TOC Pyrolysis: an example from the uppermost Paleocene/lowermost Eocene In The Basque Basin, Western Pyrenees. *Munibe Ciencias Naturales*, 46, 43-62.
- Olaya, I. (1994). *Proyecto Cuencas Fronteras Cuenca Sinú – San Jacinto*. Ecopetrol – ICP.
- Olympus (2012). *X-5000 Series Mobile XRF User's Manual*. Olympus.
- Orem, W. H. y Finkelman, R. B. (2004). Coal formation and geochemistry sediments, diagenesis, and sedimentary rocks. En F.T. Mackenzie (Ed.), *Sediments, Diagenesis, and Sedimentary Rocks* (volume 7). Treatise on Geochemistry, Elsevier Pergamon, Oxford.
- Pearce, T. J., Duncan, M., Martin, J. H., Ratcliffe, K. y Wray, D. (2010). A Whole-Rock Geochemical Approach to the Recognition and Correlation of "Marine Bands". Application of Modern Stratigraphic Techniques: Theory and Case Histories. *SEPM Special Publications*, 4, 221-238. 10.2110/sepm.sp.094.239.
- Pennington, W. D. (1981). Subduction of the Eastern Panama Basin and seismotectonics of Northwestern South America. *Journal of Geophysical Union, Geodynamics Series*, 9(11), 10753-10770.
- Peters, K.E. (1986). Guidelines for evaluating petroleum source rock using programmed pyrolysis. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 70, 318-29.
- Pindell, J. L. y Barret, S. F. (1990). Geologic evolution of the Caribbean: A plate-tectonic perspective. En G. Dengo and J. E. Case (Eds.), *The geology of North America*. *Geol. Soc. Of Am.*, H.
- Ratcliffe, K.T., Morton, A., Ritcey, D. y Evenchick, C.E. (2008). Whole rock geochemistry and heavy mineral analysis as exploration tools in the Bowser and Sustut Basins, British Columbia, Canada. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 55, 320-37.
- Ratcliffe, K. y Wright M. (2012). *Unconventional methods for unconventional plays: using elemental data to understand shale resource plays*. Petroleum Exploration Society of Australia News Resources Feb/March: 89-93.

Reyes, G. y Zapata, G. (2001). Geología de las Planchas 24 Sabanalarga Escala 1:100.000. Memoria Explicativa. INGEOMINAS

REYES, J.P. (2001). Evaluación de la prospectividad sector Atlántico. Instituto colombiano del petróleo división de exploración y coordinación de modelamiento de subsuelo. 177 p. Bogotá.

Silva, A., Paez, L., Gomez, D. y Rincon D. (2019). Estudio petrográfico y posibles fuentes de los clastos basales de la Formación San Cayetano hacia el sur del Cinturón Plegado de San Jacinto, norte de Colombia. *Boletín de Geología*, 41(1), 15-28.

Szczerba, M., Klapyta, Z. y Kalinichev, A. (2014). Ethylene glycol intercalation in smectites. *Molecular dynamics simulation studies*.

Sykes, L. R. y Ewing, M. (1965). The seismicity of the Caribbean region. *J. Geophys. Res*, 70, 5065-74.

Tissot, B. P., Durand, B., Espitalié, J. y Combaz, A. (1974). Influence of nature and diagenesis of organic matter in formation of petroleum. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 58, 499-506.

Tissot, B.P. y Welte, D.H. (1984). Petroleum Formation and Occurrence. *Springer*, 160-198.

Taylor, J. y Cortes, Y. (2013). The use of XRF as a Petrophysical Tool in Exploration and Development. *GeoConvention 2013: Integration*.

Tribovillard, N., Algeo, T., Lyons, T.W. y Riboulleau, A. (2006). Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies; an update 2006. *Chemical Geology* 232, 12-32.

Universidad De Caldas (2009). Estudio integrado de núcleos y registros obtenidos de los pozos someros tipo "Slim holes" en la cuenca Sinú. Reporte Interno a la ANH.

Universidad De Caldas (2016). *Proyecto Caribe ANH*. Universidad De Caldas. Reporte interno a la ANH

Universidad De Caldas (2016a). *Reporte TOC - Pirolisis*. Universidad De Caldas. Reporte interno a la ANH

Universidad De Caldas (2016b). *Pozo Moambo Petrografía*. Universidad De Caldas. Reporte interno a la ANH

Universidad De Caldas (2016c). *Informe de reflectancia de la vitrinita*. Universidad De Caldas. Reporte interno a la ANH

Universidad De Caldas (2016d). *Informe de bioestratigrafía del pozo Mohambo-1 a partir de foraminíferos*. Universidad De Caldas. Reporte interno a la ANH

Warr, L. y Rice, A. (1994). Interlaboratory standardization and calibration of clay mineral crystallinity and crystallite size data. *J. metamorphic Geol.* 12,141-52.