

**Prospectividad del pre-Aptiense en la parte centro norte del corredor Sacha Shushufindi (CSS),
basado en secciones sísmicas e información de pozos**

**Prospectivity of the pre-Aptian sequences in the north central zone of the
Sacha Shushufindi Corridor (CSS), based on seismic sections and well data**

Daniel Zuñiga¹, Cristian Zura², Jairo Bustos³, Evelyn Medina⁴, Hugo Simba⁵

¹ *Geólogo – Petrofísico, PCR – Ecuador. Quito – Ecuador. dzuniga@pcr.com.ec*

² *Docente de la Universidad Central del Ecuador. Quito – Ecuador. cbzura@uce.edu.ec*

³ *Docente de la Universidad Central del Ecuador. Quito – Ecuador. jgbustos@uce.edu.ec*

⁴ *Geóloga de Desarrollo, PCR – Ecuador. Quito – Ecuador. emedina@pcr.com.ec*

⁵ *Geólogo Senior, PCR – Ecuador. Quito – Ecuador. hsimba@pcr.com.ec*

ISSN: 2661-6998

Fecha de recepción: 24-07-2020

Fecha de aceptación: 13-01-2021

RESUMEN

Esta investigación se enfoca en el estudio de las secuencias pre-Aptienses y su potencial sistema petrolero, en los Bloques 64 y 65, localizados dentro del Corredor Sacha Shushufindi (CSS) de la Cuenca Oriente. Evaluaciones geoquímicas, tales como: Pirólisis Rock-Eval, Reflectancia de Vitrinita (Ro), Carbono Orgánico Total (TOC, por sus siglas en inglés), Índice de Alteración Termal (TAI, por sus siglas en inglés) de las formaciones pre-Aptienses con características de roca madre, señalan a la Fm. Santiago apta para constituir una potencial roca fuente activa, pero al norte del CSS no ha sido reportada. Rocas clásticas con características de un potencial reservorio son evidenciadas en la Fm. Chapiza, aunque su capacidad de almacenar hidrocarburos ha sido afectada por factores diagenéticos y existe incertidumbre en cuanto a su continuidad lateral. Sin embargo, una muestra de afloramiento interpretada como Fm. Chapiza que fue recolectada en la Cordillera del Cutucú presenta buenas características de reservorio que fueron determinadas mediante análisis petrográficos, e incluso podría considerarse una potencial carrier bed según datos de inclusiones fluidas. Secuencias finas y volcanoclásticas identificadas en la Fm. Chapiza constituyen potenciales rocas sello. Los arreglos tectónicos y disposición estratigráfica de la secuencia pre-Aptiense, presentan dos tipos de estructuras con potencial de trampas hidrocarburíferas.

Palabras clave: Entorno tectónico, Corredor Sacha Shushufindi, evaluaciones geoquímicas, pre-Aptiense, sistema petrolero.

ABSTRACT

This research focuses on the study of pre-Aptian sequences and the presence of a potential petroleum system in Blocks 64 and 65, located inside the Sacha Shushufindi Corridor (CSS) of the Oriente Basin. Geochemical evaluations using data from Pirólisis Rock-Eval, Vitrinite Reflectance (Ro), Total Organic Carbon (TOC), Thermal Alteration Index (TAI) of pre-Aptian formations with source rock characteristics indicate Santiago Formation as a potential active source rock, but this rock has not been reported towards the north of CSS. Clastic rocks with potential reservoir characteristics are identified within the Chapiza Formation, although their hydrocarbon storage capacity has been affected by diagenetic factors, and there is uncertainty related to its lateral continuity. However, an outcrop sample is interpreted as Fm. Chapiza collected from Cordillera del Cutucú presents good reservoir characteristics determined by petrographic analysis, even it may be considered as a potential carrier bed considering fluid inclusions analysis. Fine and volcanoclastic sequences from Chapiza Formation are potential cap rocks. Tectonic configuration and the stratigraphic arrangement of the pre-Aptian sequences can form two types of structures with the potential for hydrocarbon trapping.

Keywords: geochemical evaluations, petroleum system, pre-Aptian, Sacha Shushufindi Corridor, tectonic environment.

1. INTRODUCCIÓN

La Cuenca Oriente representa una de las cuencas subandinas más complejas y atractivas desde el punto de vista científico como económico [1]. Las actividades de exploración hidrocarburífera en la cuenca han proporcionado una alta densidad de información geológica y geofísica, siendo el principal foco de interés económico las formaciones Cretácicas. Sin embargo, considerando futuras campañas de perforación de pozos exploratorios, es necesario contemplar nuevas zonas de interés, como es el estudio de la secuencia pre-Aptiense.

Esta secuencia ha sido atravesada por varios pozos repartidos en la cuenca, sin embargo, no existen reportes de la presencia de hidrocarburo en cantidades comerciales hasta la actualidad.

El presente estudio pretende definir a través de características geofísicas y geológicas, la probable existencia de zonas potencialmente prospectivas en el pre-Aptiense, por medio de la compilación e interpretación de estudios previos de su sistema petrolero y posible roca madre, la caracterización de las probables rocas reservorio, rocas sello por métodos petrográficos en láminas delgadas de ripios de perforación y muestras de afloramiento; y, la identificación de estructuras geológicas que sirvan como posibles trampas para la acumulación y conservación de hidrocarburo, en los Bloques petroleros 64 y 65 pertenecientes al Consorcio Petrolero Palanda-Yuca Sur y al Consorcio Petrosud-Petroriva, respectivamente; con el fin de determinar el aporte que podría traer el perforar hasta la zona antes mencionada.

Los Bloques petroleros localizados al noreste de la Cuenca Oriente (Fig. 1), dentro del Corredor Sacha Shushufindi (CSS) [1], presentan diez pozos perforados: Lumpak 02D, Palanda 01, Palanda 08D, Palanda 11D, Palanda 13D, Pindo 01, Pindo Este 01, Primavera 01, Yuca Sur 01 y Yuca Sur 09D, en los que se han alcanzado secuencias pre-Aptienses, de acuerdo a los reportes litológicos y registros de pozo. Sin embargo, debido a que el foco de interés ha sido los reservorios Cretácicos, el espesor perforado para la secuencia pre-Aptiense no supera los 225 ft.

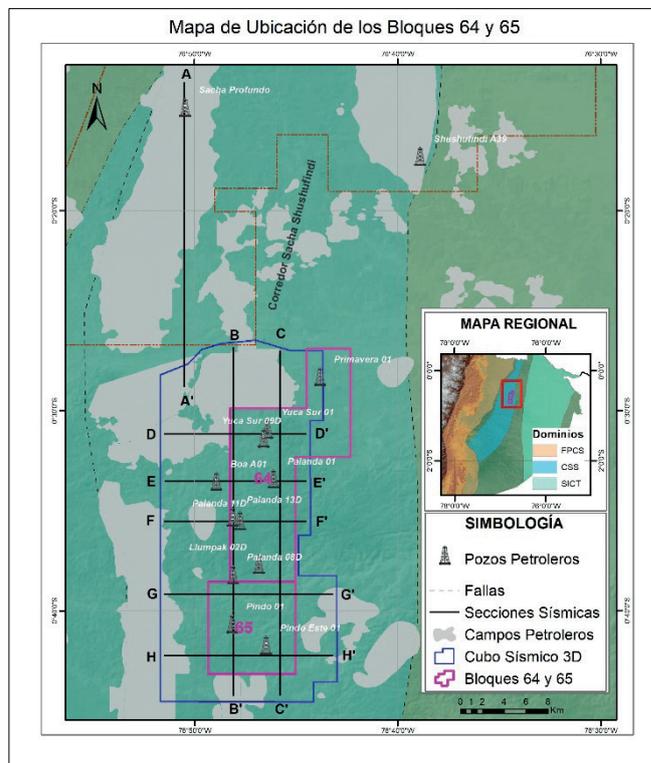


Figura 1. Mapa de ubicación de los Bloques 64 y 65.

Fuente: Autores

2. METODOLOGÍA

El acercamiento geológico inicial consistió en la adquisición y revisión de información tomando como universo a la Cuenca Oriente y como muestra información de los campos ubicados en el CSS y en la Faja Plegada y Corrida Subandina (FPCS) [1]. La información utilizada consiste en reportes finales de perforación, publicaciones, reportes geoquímicos, registros eléctricos, datos sísmicos, muestras de ripios y muestras de campo; relacionadas a las características geoquímicas, estratigráficas y estructurales de la secuencia pre-Aptiense.

Se involucró los siguientes procesos:

2.1. Caracterización Geoquímica

Se compiló análisis geoquímicos de laboratorio disponibles para los niveles estratigráficos con características de roca madre de la secuencia pre-Aptiense, adquiridos en diferentes campañas de exploración de hidrocarburos en los pozos Sacha Profundo [2] y [3], Shushufindi A39 [4], Shushufindi 58B [5] y Pichincha 01 [6]; los cuales, se ubican cerca de la zona de estudio dentro del CSS. Además, se incluyó datos geoquímicos procedentes de afloramientos localizados en la

Cordillera del Cutucú [7], [8], [9] y [10], y del pozo IP-17 localizado en el campo Pungarayacu de la FPCS [11].

Mediante los diferentes datos copilados de Carbono Orgánico Total (TOC, por sus siglas en inglés), Reflectancia de Vitritina (Ro), Índice de Alteración Termal (TAI, por sus siglas en inglés) y Pirólisis Rock-Eval, se evaluó el potencial de roca madre de las diferentes secuencias pre-Aptienses, mediante el desarrollo de diagramas de TOC vs S2 y HI vs Tmax. Los resultados obtenidos en los métodos gráficos fueron comparados y validados con datos de Ro, TAI y petrografía de kerógeno. Los topes y bases de las unidades cronoestratigráficas atravesadas por cada sondeo fueron definidos a partir de datos de pozo, y por reportes de análisis bioestratigráficos y radiocronológicos ejecutados en estudios previos [6], [11], [12], [13] y [14].

2.2. Caracterización de Secciones Delgadas

Se elaboraron secciones delgadas de muestras de ripios de perforación de los pozos: Llumpak 02D, Palanda 08D, Palanda 11D, Pindo Este 01 y Yuca Sur 09D ubicados en los Bloques 64 y 65, que han alcanzado el pre-Aptiense, de acuerdo con los reportes litológicos y las respuestas eléctricas de los registros de pozo. También se estudió una muestra de afloramiento recolectada en la Cordillera del Cutucú durante la realización de la investigación.

Se desarrollaron interpretaciones petrográficas donde se determinaron los principales constituyentes de las rocas, matriz, cemento, porosidad y diagénesis para su categorización en función de sus componentes.

2.3. Interpretación Sísmica

Se interpretó unidades sísmo-estratigráficas y estructuras del cubo sísmico Palanda Yuca Sur 3D y una sección sísmica 2D, de orientación N-S, que continua hacia el norte del cubo y corta el pozo Sacha Profundo. Las unidades sísmo-estratigráficas separadas por superficies de discontinuidad se definieron a partir de parámetros sísmicos y fueron relacionadas con las unidades estratigráficas de la secuencia pre-Aptiense, definidas previamente por Angulo [11], y calibradas con el sismograma sintético del pozo Sacha Profundo. Los rasgos estructurales en las secciones sísmicas se definieron mediante una interpretación de líneas *inline* y *crossline*; junto con el conocimiento de la estructuración tectónica del lugar, que sirvió para delimitar las estructuras presentes.

2.4. Inclusiones Fluidas/dataciones radiométricas

A fin de tener un mayor entendimiento de la roca considerada reservorio y de un posible proceso de migración, se realizó un análisis de inclusiones fluidas (IF) de origen diagenético y petrografía de fluorescencia en roca total en la muestra de afloramiento recolectada cerca de la población de Sucúa, en la Cordillera del Cutucú; la cual, cronológicamente se ubica entre las formaciones Hollín-Chapiza.

Se confeccionaron tres muestras doblemente pulidas y fueron estudiadas por microscopía de polarización y fluorescencia, mediante transmisión y por epifluorescencia (luz incidente) a través del uso de una lámpara de mercurio de 100W (halógena) [15] y [16].

Con la finalidad de tener un control temporal de las secuencias depositadas se realizó una datación en la muestra de afloramiento por el método U-Pb SHRIMP, por la empresa canadiense GeochronEx Analytical Services and Consulting.

3. RESULTADOS

3.1. Geoquímica de roca madre del pre-Aptiense

En la zona de estudio, los datos disponibles de geoquímica son muy escasos (cortando pocos metros del pre-Aptiense), por lo que se ha utilizado información de pozos aledaños que pertenezcan al mismo entorno tectónico (CSS). En la Cuenca Oriente, existen pocos pozos que disponen de núcleos (Sacha Profundo, Shushufindi A39, Shushufindi 58B, Pichincha 01) del pre-Aptiense y por consiguiente escasos datos geoquímicos de probables roca madre. De acuerdo con informes técnicos de estos pozos [2], [3], [4], [6], [13] y [17], y de afloramientos ubicados en la zona de la Cordillera del Cutucú [7], [8] y [9], las formaciones Pumbuiza, Macuma, Santiago y ciertos niveles de lo que puede ser considerado por edad bioestratigráfica como Chapiza (Chapiza?) tienen cierto potencial para ser consideradas rocas madre de un posible sistema petrolero pre-Aptiense.

3.1.1. Pozo Sacha Profundo

Se recopilaron datos de TOC, Ro y TAI de informes técnicos de Petroproducción [2], [3] y [6].

Los porcentajes actuales de TOC encontrados indican una pobre roca madre para los niveles interpretados como Macuma y Sacha/Macuma; y de pobre a regular para los niveles de Pumbuiza (Tabla 1). Los valores de Ro (entre 2 – 3.25) y TAI (valores de 4) indican una sobremadurez de la roca, y su incremento proporcional con la profundidad da cierta validez a los datos, descartando aquellos que no sigan esta tendencia. El estado sobremaduro de las rocas consideradas como potencial roca madre abre expectativas interesantes sobre su TOC inicial, por lo que no se descarta la posibilidad de la existencia de generación de hidrocarburos. Las edades y ambientes de depósito fueron recopiladas de informes técnicos de bioestratigrafía del Centro de Investigaciones Geológicas Guayaquil (CIGG) [14].

Tabla 1. Resultados geoquímicos del pozo Sacha Profundo

Prof. (ft.)	Muestra	TOC (%)	Ro (%)	TAI	Formación
CORELAB/LABOGEO*					
12960-13360	Ripios	0.12	2.00	4	Sacha/Macuma

13360-15560	Ripios	0.18	2.32 - 3.01	4 a 4+	Macuma
15560-16143	Ripios	0.69			
15613-16118	Núcleo	0.70 0.41*			Pumbuiza
16123-16128	Núcleo	1.76 1.03*	3.25 1.5- 1.65*	4+	

Mod. de Díaz [6] considerando aportes de CIGG [14]

3.1.2. Pozo Shushufindi A39

Se recopilaron datos de TOC y Pirólisis Rock-Eval de informes técnicos del CIGG [4] (Tabla 2). Datos de TOC han sido tomados en la secuencia pre-Aptiense que atraviesa este pozo; mismo que sirvió como filtro para la selección de muestras para Pirólisis Rock-Eval, donde muestras con un contenido menor a 0.5 en TOC, no fueron consideradas [4]. El contenido de TOC define que las rocas analizadas presentan una calidad de pobre a regular que varía entre 0.5 y 1.3 % (Tabla 2). Los datos de pirólisis reflejan que prácticamente no se encontraron hidrocarburos libres (S1) dentro de las muestras analizadas, debido a sus valores extremadamente bajos (cerca de 0). El potencial generador es pobre debido a los valores bajos de S2, donde en la mayoría de los casos no supera los 2 mgHC/g roca para muestras atribuidas por bioestratigrafía a la Fm. Chapiza (Fm. Chapiza?) [12] y 0 mgHC/g roca para muestras de la Fm. Pumbuiza.

El intervalo interpretado como perteneciente a la Fm. Chapiza? presenta valores bajos de índice de Hidrógeno (HI) e intermedios de Oxígeno (OI) (Tabla 2), que en conjunto con los valores de Tmax que no superan los 434 °C indican que los valores de HI y OI no son afectados por la temperatura (inmaduros), y más bien, estos valores reflejarían la presencia de un Kerógeno de tipo III. Esta última interpretación es comprobada por un análisis de petrografía del Kerógeno [17]. El intervalo interpretado como perteneciente a la Fm. Pumbuiza, presenta valores de HI desde 0 hasta 2 y de OI variable con un máximo de 88. Los valores de HI de cero coinciden con valores muy bajos de Tmax de aproximadamente 260 °C, lo que indica poca correspondencia de los datos y no fueron considerados. Por el contrario, se observan valores altos de Tmax (Tabla 2) que indican que la madurez de la roca está en ventana de generación de gas y, probablemente, influenciaron en los valores extremadamente bajos de HI obtenidos. Se necesitan análisis extra para confirmar este hecho, aunque el CIGG detalla el cambio de coloración a luz natural de la materia orgánica de marrón en Chapiza? y a negro en Pumbuiza, indicando un estado de madurez avanzado correspondiente a una roca madre agotada [17].

Tabla 2. Resultados geoquímicos del pozo Shushufindi A39

Prof. (ft.)	TOC (%)	S1	S2	HI	OI	T max	Formación
CIGG							
9950	0.81	0.01	1.05	129	50	434	
9980	0.89	0.00	0.89	100	58	434	
10000	1.26	0.01	2.41	191	53	429	
10020	0.85	0.02	1.56	183	62	430	Chapiza?
10050	0.67	0.00	1.08	161	64	433	
10080	0.70	0.01	0.70	100	71	433	
10120	0.69	0.01	1.01	147	49	432	
12110	0.56	0.00	0.00	0	57	260	
12140	0.52	0.00	0.00	1	42	463	
12290	0.55	0.00	0.01	2	88	465	
12310	0.59	0.00	0.01	1	37	472	Pumbuiza
12340	1.28	0.01	0.00	0	11	262	
12360	0.60	0.00	0.00	0	43	261	
12410	0.56	0.00	0.00	0	38	261	

Ref. [4].

3.1.3. Pozos Pichincha 01, IP 17, Shushufindi 58B

Estos pozos presentan núcleos y algunos tipos de datos geoquímicos principalmente de TOC, petrografía del kerógeno y Reflectancia de Vitrinita [5], [6] y [11]. Sin embargo, los datos de estos pozos carecen de confiabilidad debido a la contradicción si se comparan diferentes métodos (ejemplo: Tmax=430°C y Ro=2.54) [6] y [18] por lo que únicamente se han tomado en cuenta datos de petrografía del Kerógeno que identifica un predominio de kerógenos tipo III y en menor proporción Tipo II para las formaciones Macuma y Pumbuiza (Pozos IP 17, Shushufindi 58B) [5] y [11], y un estado de sobremadurez para la Fm. Pumbuiza con un TAI de 5+ (Pozo Shushufindi 58B) [5]. El contenido de TOC indica una roca madre pobre (0 - 2%) para todos los pozos.

3.2. Análisis Petrográfico y Correlaciones estratigráficas

Abarcando la zona de estudio, se encuentran pocos pozos que han atravesado la secuencia pre-Aptiense correspondiente a la Fm. Chapiza (Fig. 2). De forma general en estos pozos dominan rocas piroclásticas, arcillolitas, limolitas rojas y en menor proporción areniscas (Fig. 3 y 4). La presencia de niveles clásticos es común en todos los pozos, aunque su extensión lateral presenta aún un grado de incertidumbre bastante alto y su correlación es imposible por la distancia entre pozos (Fig. 2).

Adicional a la existencia de litologías clásticas, la calidad del reservorio está ligada a las propiedades físicas (componentes, cemento, matriz etc.) que presenta una roca. El tipo de arenisca en la Fm. Chapiza corresponde a grauvacas y cuarzoarenitas, aunque el porcentaje de cuarzo en la grauvaca es del 75% (Fig. 3). Cemento de cuarzo y arcillas, matriz tobácea y alto grado de compactación (micas deformadas y pseudoestilolitas de material carbonoso) están presentes en estas areniscas y reducen la calidad de un probable reservorio (Fig. 4).

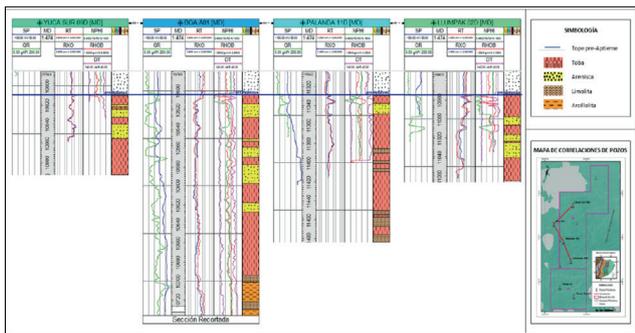


Figura 2. Correlaciones de pozos que atravesaron el pre-Aptiense en la zona de estudio.

La presencia y extensión lateral de tobas, arcillolitas y limolitas es común en todos los pozos, por lo que, la presencia de un sello ante un reservorio en estas zonas no representaría mayor inconveniente (Fig. 2).

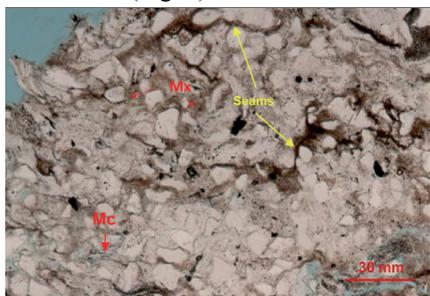


Figura 3. Secciones delgadas de los niveles clásticos del pozo Lhumpak 02D, intervalo 11000-11010 ft. Notar la presencia de Seams de arcillas, Micas (Mc), y Matriz (Mx)

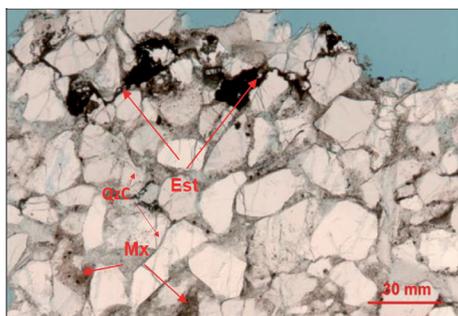


Figura 4. Secciones delgadas de los niveles clásticos del pozo Pindo Este 01, intervalo 10730-10740 ft. Nótese la evidencia de compactación por deformación de micas (Mc) y Seams de arcillas y pseudoestilolitas con material carbonoso (Est). Matriz arcillosa (Mx) y cemento de cuarzo (Q=C).

3.3. Secciones Sísmicas

En la Cuenca Oriente, la separación por unidades-sismoestratigráficas en el pre-Aptiense han sido desarrolladas por Rivadeneira & Sánchez [9], Díaz [6], Angulo [11], siendo este último la base de la interpretación del estudio actual, debido a su proximidad (Fig. 1). La zona de estudio cuenta con información sísmica 3D y para la interpretación se ha elegido dos líneas en tendencia N-S y cinco líneas de tendencia O-E, adicionalmente se utilizó una línea N-S fuera del área de estudio donde se encuentra el pozo Sacha Profundo que atravesó gran parte de la secuencia pre-Aptiense, esto con el propósito de correlacionar los topes del

pozo y relacionarlos con la respuesta sísmica mediante un sismograma sintético (Fig. 5).

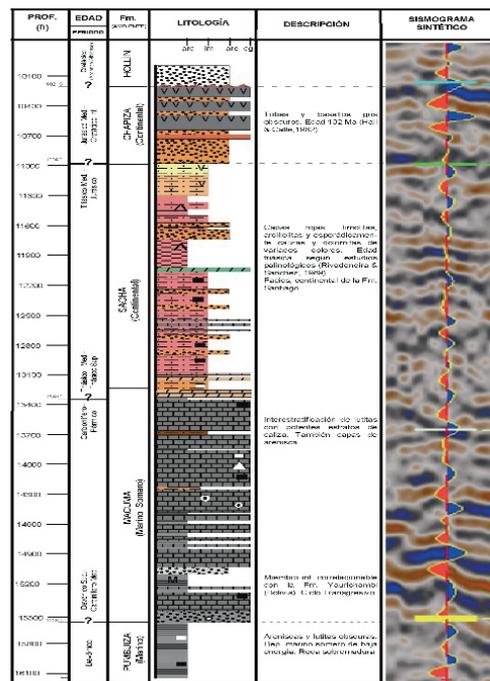


Figura 5. Sismograma sintético del pozo Sacha Profundo y los topes asociados al pre-Aptiense.

El sismograma sintético elaborado coincide con los cambios observados en los parámetros sísmicos (Fig. 5); así, el basamento muestra reflectores difusos, caóticos y no continuos (Fig. 6); la Fm. Pumbuíza presenta reflectores de alta amplitud y continuidad en la base, y hacia el tope la continuidad y la amplitud disminuyen (Fig. 5, 6); el cambio más drástico se observa en la Fm. Macuma, donde las calizas presentan gran amplitud y continuidad en los reflectores; en la Fm. Sacha, los reflectores son de menor amplitud con baja continuidad y de mayor frecuencia.; y finalmente la Fm. Chapiza con reflectores continuos, de alta amplitud en la base, y moderadamente continuos y menor amplitud hacia el tope (Fig. 5, 6)

Se observó que las características encontradas en las cercanías del pozo Sacha Profundo (Fig. 5) son reconocibles en gran parte de la sísmica, por lo que se definieron cinco Unidades Sismo Estratigráficas (USE) que representan a las principales formaciones del pre-Aptiense, así: USE 1 – Basamento; USE 2 - pre-Pumbuíza/Pumbuíza; USE 3 – Macuma; USE 4 – Sacha; USE 5 – Chapiza (Fig. 6 y 7).

3.4. Inclusiones fluidas

Se realizó un estudio de inclusiones fluidas a una muestra recolectada en la Cordillera del Cutucú con el objetivo de determinar la presencia, madurez o evidencias del paso de hidrocarburos. La muestra corresponde a una arenisca lítica con predominio de fragmentos de rocas metamórficas y volcánoclasticas (granos líticos) sobre los granos de cuarzo y feldspatos (Fig. 8a).

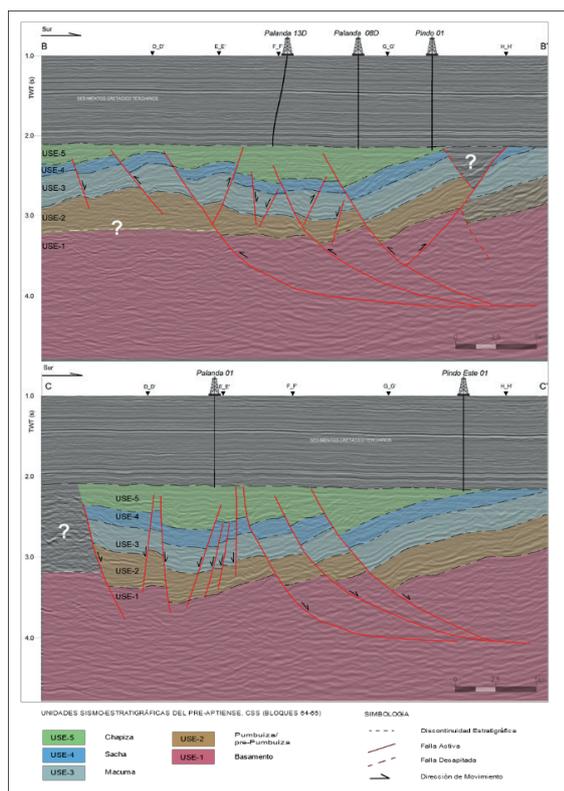


Figura 6. Líneas sísmicas N-S. (Secciones B y C) para ubicación ver Figura 1.

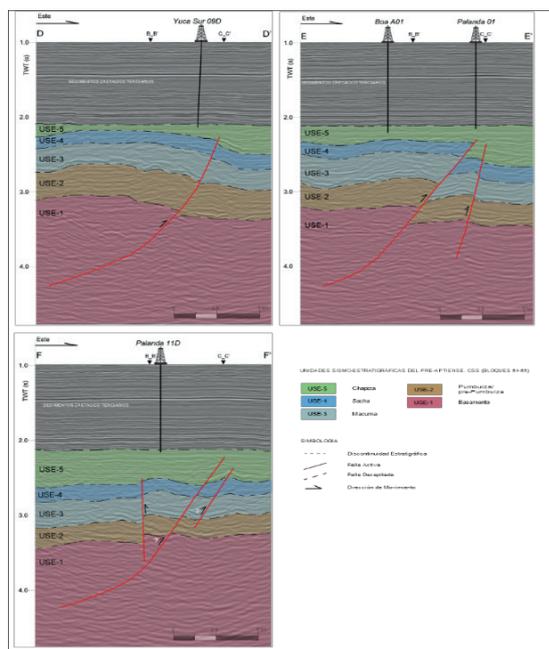


Figura 7. Líneas sísmicas O-E (secciones D, E, F), para ubicación ver Figura 1.

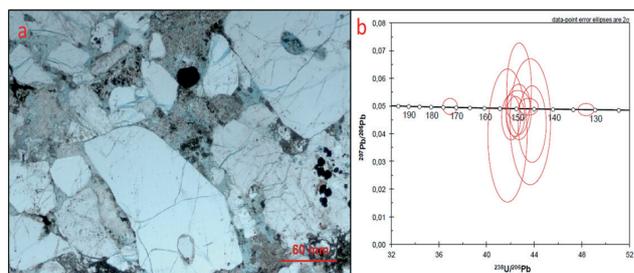


Figura 8. a) Arenisca litica, b) diagrama Concordia de la muestra de afloramiento. Nótese el predominio de edades alrededor de 149 Ma y la edad más reciente de 132 Ma.

Inclusiones fluidas heredadas (traídas por el grano desde su origen) no son importantes en este estudio, debido a que el hidrocarburo se genera y/o migra bajo condiciones diagenéticas post-depositacionales, y este podría quedar atrapado en forma de inclusiones.

Fueron identificados algunos tipos de inclusiones; sin embargo, para asegurar las condiciones puramente diagenéticas, han sido consideradas las inclusiones fluorescentes presentes en maclas de feldespatos (Fig. 9 a,b), zonas de precipitación de cementos carbonáticos y sobrecrecimientos de cuarzo (Fig. 9 c,d) donde pudieron quedar atrapados hidrocarburos. Así mismo, la presencia de impregnaciones fluorescentes en microfracturas (Fig. 9 e,f) y límites entre cemento de carbonato y sobrecrecimientos de cuarzo (Fig. 9 c,d) podrían indicar la presencia y/o migración de hidrocarburos.

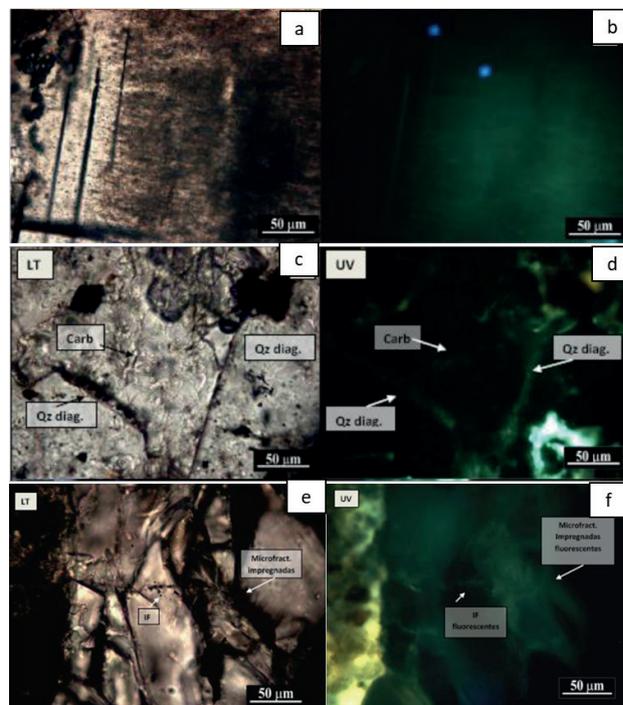


Figura 9. a) LT. Feldespato con su plano de macla impregnado con bitumen; b) a) en UV; c) LT. Inclusiones fluidas en carbonatos e impregnaciones fluorescentes; d) c) en UV. Se reconoce el reemplazo de carbonato por cuarzo diagenético, con caras de cristal de cuarzo sobre el cemento carbonático IG. En el contacto se identifica fluorescencia verdosa; e) Microfracturas impregnadas, f) fluorescencia en fracturas impregnadas. LT=Luz Transmitida; UV= Luz ultravioleta.

Dataciones por el método U-Pb por SHRIMP dieron como resultado una edad de 149.01 ± 0.95 millones de años (Ma) con una edad más joven de 132 Ma que podría representar la edad de depósito (Fig. 8, b).

4. INTERPRETACIÓN

4.1. Estructuración y Evolución Tectónica del pre-Aptiense en los Bloques 64 y 65

Las secciones sísmicas interpretadas exhiben un dominio tectónico primordialmente extensional en sentido N-S (Fig. 6), con algunas evidencias de inversión y un régimen fuertemente compresivo que es evidenciado en las secciones O-E (Fig. 7).

4.1.1. Tectónica Extensional

El control extensional en la zona que se observa principalmente en las secciones N-S, está caracterizado por la presencia de fallamiento normal de tipo lítrico típico de zonas extensionales [19] que se horizontaliza en profundidad y buzan hacia el Sur y en menor proporción, fallas rectas con fuerte ángulo (Fig. 6). El nivel de despegue se encuentra en el basamento afectando a las formaciones Pumbuiza, Macuma y Sacha; basado en la disposición que tiene los estratos afectados por estas fallas y por reflexiones ubicadas a nivel del basamento que coincidían con las estructuras. Esta configuración es similar a aquella identificada por Angulo [11].

Contrario a lo que se propone en [20], donde la actividad extensional *back-arc* está precedida por un rift durante el Triásico – Jurásico inferior y que controló la depositación de la Formación Sacha/Santiago dentro del CSS, en las interpretaciones realizadas por Angulo [11] y, el presente estudio, no se encuentra evidencia de una actividad extensional que controló la depositación de la Fm. Sacha, más bien, su espesor es constante junto con las formaciones Pumbuiza y Macuma que se depositaron en ambientes con relativa calma tectónica [20].

La actividad extensional tuvo su apogeo durante el Jurásico medio-superior con la depositación de la Fm. Chapiza, evidenciado por el control que las fallas lítricas al crear espacio de acomodación, dando como resultado la configuración de mayor espesor de la Fm. Chapiza hacia las fallas (Fig. 6).

4.1.2. Tectónica Compresiva

La configuración de tectónica extensional observada en las líneas sísmicas N-S, no es evidente en las secciones O-E, donde estructuras formadas en un entorno compresional están presentes (Fig. 7), esto, producto de una inversión tectónica. En las secciones O-E el movimiento por compresión fue a lo largo de fallas extensionales preexistentes formando estructuras anticlinales fallados (Fig. 7), incluso, en las secciones N-S es evidente estructuras compresionales, aunque no lo suficientemente fuertes para invertir completamente las estructuras extensionales (Fig. 6).

Está claro entonces, que los esfuerzos que invirtieron estas estructuras son mayores en sentido O-E, aunque existió un componente importante N-S. Esto coincide con la interpretación de Angulo [11], donde esfuerzos en sentido O-E son los responsables de la inversión a lo largo de las fallas que formaron las estructuras Sacha y Shushufindi.

Aún no están claras las causas que provocaron la inversión de las estructuras durante el Jurásico tardío – Cretácico temprano que provocó el desarrollo de la discordancia erosional donde se depositó la Fm. Hollín; sin embargo, algunas hipótesis son planteadas:

- La propagación hacia el oeste de la ruptura Tethys de Laurasia y Gondwana durante la separación inicial del Océano Atlántico, expresando deformación tectónica en el borde del Pacífico [21].
- Eventos relacionados con la apertura inicial del Atlántico Sur cuya actividad es capaz de producir un efecto de obducción en el margen NO de Suramérica [22].
- Un efecto *Flexural Cantilever*, a causa de una respuesta isostática por la presencia de un nivel de despegue regional [23] tomando en cuenta el modelo evolutivo planteado por Spikings et al. [22].

4.2. Potenciales Rocas Madre

A partir de los datos geoquímicos compilados de pirólisis, obtenidos en la Cordillera del Cutucú por diversos estudios [7], [8], [9] y [10] y en el pozo SSF A39 [4] durante diversas campañas de exploración de las secuencias pre-Aptienses, se generó diagramas de TOC vs S2 (Fig. 10) y HI vs Tmax (Fig. 11).

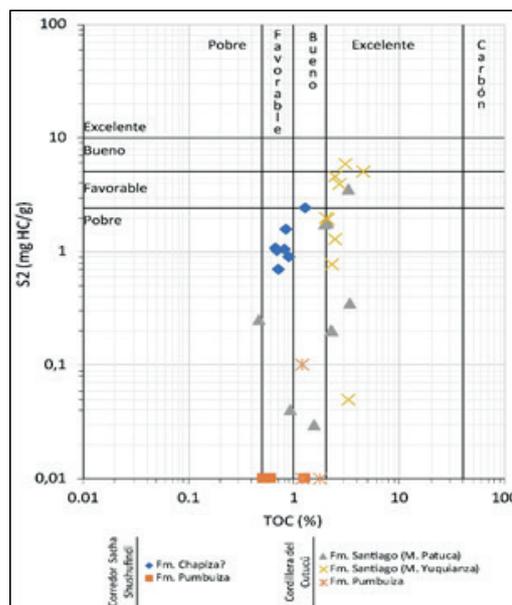


Figura 10. Relación S2 vs TOC para las formaciones pre-Aptienses

El diagrama cruzado de TOC vs S2 (Fig. 10) señala una cantidad favorable de materia orgánica con valores de TOC $\geq 0.5\%$, para las formaciones Pumbuiza, Santiago y Chapiza? pero con diferentes potenciales de generación (valores S2).

El tipo de kerógeno asociado a las posibles rocas madre de las secuencias pre-Aptienses son de tipo III, de acuerdo con el gráfico HI vs Tmax (Fig. 11), lo que concuerda con análisis petrográficos del kerógeno de estudios técnicos anteriores [2], [3], [4], [5], [7], [8], [9], [10], [11] y [17].

Los valores de S2 y HI (Tabla 2) extremadamente bajos en la Fm. Pumbuiza, se puede correlacionar con una extrema madurez, esto concuerda con los valores altos de Tmax (Fig. 11), y valores TAI de 5+ y 4+ reportados en los pozos SSF 58B [5] y Sacha Profundo [2]. Adicionalmente, valores de Ro de 1.5-1.65 % (Tabla 1) [3] del pozo Sacha Profundo para la Fm. Pumbuiza, la ubican como generadores marginales de gas seco. Valores similares se presentan en la Cordillera del Cutucú [7] y [8]. Diaz et al., [20] señala que los eventos orogénicos del ciclo Eohercínico sometieron a estas rocas a presiones y temperaturas muy altas, provocando la destrucción de los hidrocarburos que pudieron haber sido generados.

Los datos geoquímicos registrados para la Fm. Macuma en pozo SSF A39 en el CSS, señalan un bajo contenido de materia orgánica con valores de TOC < 0.5% [4], similares a los pozos Sacha Profundo [2] e IP-17 [11] donde se señala materia orgánica tipo III y pobre preservación. Los valores Ro en el pozo Sacha Profundo [2] son mayores a 2.3% señalando una sobremaduración de la materia orgánica, lo que justificaría su valor bajo de TOC. La Fm. Macuma se desarrolló en un ambiente cálido y pobremente oxigenado a anóxico, que posiblemente contribuyó a la preservación de materia orgánica. No obstante, durante el Pérmico-Carbonífero a nivel mundial se han registrado bajos desarrollos de roca madre en depósitos marinos [24].

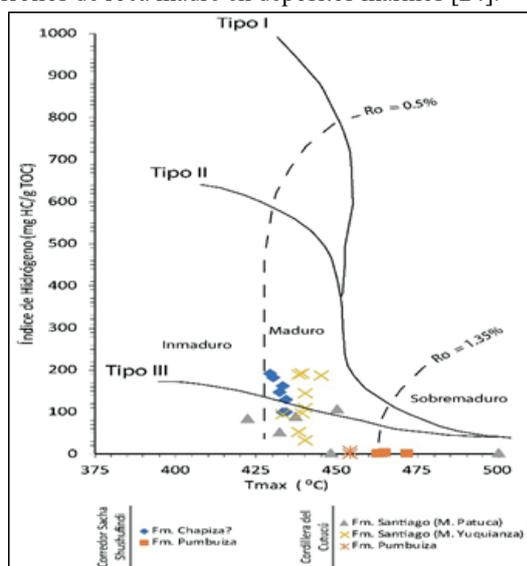


Figura 11. Relación HI vs Tmax para las formaciones pre-Aptienses.

La Fm. Santiago restringida al sur de la cuenca [25], se describe en afloramientos como lutitas bituminosas, con valores importantes de riqueza orgánica. Gaibor et al. [10] definen, a partir de análisis de palinofacies y Rock-Eval, que dicha formación presenta un moderado a bajo potencial de

roca madre y en ciertas localidades está termalmente madura, apta principalmente para generar gas. Las poblaciones con valores más altos de S2 (Fig. 10) muestran un mayor potencial de generación de hidrocarburos, lo que puede estar relacionado con sus valores relativamente bajos de Tmax, indicando que está actualmente en ventana de generación de hidrocarburos gaseosos considerando su kerógeno tipo III (Fig. 11), esto en el Miembro Yuquianza de la Fm. Santiago definido por Gaibor et al. [10]. La interpretación de la Fm. Santiago se correlaciona con los resultados obtenidos en las muestras de Alvarado et al. [7]. En el CSS la Fm. Santiago está ausente, donde correlaciona lateralmente con la Fm. Sacha [9].

La Fm. Chapiza por sus características litológicas, no constituye de ninguna manera una potencial roca madre. No obstante, el conjunto de datos de Fm. Chapiza?, denominados de esta forma por la incertidumbre en su edad (Fig. 10 y 11), corresponden al pozo SSF A39 (tabla 2) [4] [12] y no presenta potencial de generación con valores de S2 (Fig 10), menores a 2.5 mg de HC/g de roca y se encuentran inmaduros (Fig. 11).

4.3. Potenciales Rocas Reservorio

Los niveles arenosos del pre-Aptiense atravesadas por pozos en los Bloques 64 y 65 varían entre <5 a 20 ft de espesor y corresponden principalmente cuarzoarenitas y grauvacas; las cuales, podrían considerarse rocas reservorio (Figs. 2, 3 y 4). Sin embargo, las propiedades como potencial roca reservorio son afectadas por la presencia de cemento (cuarzo y arcillas), matriz tobácea y alto grado de compactación (Fig. 3 y 4); así mismo, su extensión lateral presenta un grado de incertidumbre bastante alto.

Sin embargo, los análisis efectuados en las muestras de afloramientos en la Cordillera del Cutucú, abren la posibilidad de un potencial reservorio depositado sobre Chapiza, cuya principal fuente son rocas de edades de 150 Ma (Fig. 8b) que pueden ser correlacionadas con el magmatismo Jurásico de las intrusiones Rosa Florida y Zamora (145 – 189 Ma) y el batolito de Abitagua (145 Ma) [26] cuyo equivalente extrusivo es la Fm. Misahuallí.

El predominio de líticos (48%) de rocas metamórficas, líticos volcánicos y fragmentos de rocas plutónicas la diferencian de las rocas típicas de la Fm. Hollín cuyo componente principal es cuarzo.

Hay reportes de este tipo de sedimentos [27], ubicados en la base de la Fm. Hollín principal y son interpretados como relleno de valles. Así mismo, [26] realiza una datación en una muestra con similares características, donde existen picos de procedencia del Triásico superior, Jurásico y Cretácico inferior, cuya fuente se interpreta hacia el oeste en la proto-Cordillera Real y que se depositó como relleno de valles.

Por el considerable aporte desde la proto-Cordillera Real (posiblemente producto de una intensa deformación)

identificado en estas rocas, probablemente su presencia se encuentra restringida a las proximidades del actual FPCS y zonas de intensa deformación intra-cuenca.

4.4. Potenciales Rocas Sello

Se evidencia en las secciones delgadas y reportes de perforación tobas vítreas e intercalaciones de arcillolitas y limolitas, de colores café a marrón; mismas que en correlaciones estratigráficas predominan con respecto a las secuencias clásticas arenosas. No se reconoce porosidad petrográfica en las secciones delgadas, por lo cual pueden ser consideradas como potenciales rocas sellos de un posible sistema petrolero pre-Aptiense.

4.5. Generación y Migración

La generación y migración de hidrocarburos en rocas de la secuencia pre-Aptiense aún es un tema de debate. Si bien las formaciones Pumbuiza, Macuma y Santiago son buenos prospectos para ser considerada roca madre, sus características geoquímicas actuales indican condiciones de sobremadurez para las formaciones Pumbuiza y Macuma y de madurez actual para la Fm. Santiago, aunque la incertidumbre de esta última radica principalmente en su extensión lateral. Sin embargo, de existir una generación, migraciones de larga distancia constituyen una posibilidad real.

Es claro que, de existir una generación de las rocas mencionadas anteriormente, el hidrocarburo producido sería gas, por las características expuestas (Fig. 11).

Finalmente, existen vestigios de una migración de hidrocarburo, esto por la presencia de inclusiones e impregnaciones fluorescentes que fueron interpretadas como hidrocarburos, en la muestra de afloramiento (Fig. 9), misma que por sus características petrográficas puede ser considerada como un *carrier bed*; sin embargo, la incertidumbre de la procedencia de este hidrocarburo (roca madre del pre-Aptiense o Cretácica) aún se mantiene.

4.6. Trampas

En el caso de una migración a larga distancia desde el sur hacia el centro norte de la cuenca, se evidencia estructuras que pueden ser consideradas como potenciales trampas de hidrocarburos (Figs. 6, 7).

La primera corresponde a estructuras anticlinales tipo rollover sobre las fallas lítricas (Fig. 6, sección C), desarrolladas en un régimen extensional, definido en el Jurásico med.-Valanginiense [28], durante la depositación de la Fm. Chapiza. La cinemática de las fallas señala mayor extensión al sur, donde la secuencia sedimentaria presenta un fuerte basculamiento por encima del fallamiento lítrico, generando las estructuras rollover.

El segundo se relaciona a anticlinales asociados a un cambio en la geodinámica la cuenca durante el Hauteriviense-Barremiense [28], donde se presenta un régimen compresivo (Fig. 7, sección E), que invierten la cuenca y levantan la

secuencia pre-Aptiense. El efecto compresivo reactiva e invierte las fallas normales por fases selectivas y genera flexuras en los estratos; lo cual es evidente en las secciones sísmicas interpretadas E-O en la zona de estudio.

4. CONCLUSIONES

Existe una baja probabilidad de presentar un sistema petrolero completo pre-Aptiense en el centro norte del CSS. La Fm. Santiago presenta las mejores características geoquímicas para constituir una potencial roca fuente activa pre-Aptiense [8] y [10]; no obstante, al norte de CSS no ha sido reportada hasta la actualidad. Mientras que las formaciones Paleozoicas (Pumbuiza y Macuma), con riqueza orgánica regular a buena, se encuentran sobre el umbral de madurez y generación de hidrocarburos.

Las secuencias clásticas de la Fm. Chapiza, de espesores variables de <5 a ~20 ft y extensión lateral heterogénea se consideran potenciales rocas reservorio de mala calidad, afectadas por la presencia de clastos subangulosos, matriz tobacea y crecimiento de cuarzo secundario.

La presencia de una roca sello del pre-Aptiense no representa mayor inconveniente; en las secciones delgadas y reportes de perforación se evidencia para la Fm. Chapiza tobas vítreas e intercalaciones de arcillolitas y limolitas, las cuales, predominan con respecto a las secuencias clásticas y presentan características favorables para ser consideradas como roca sello.

En la zona de estudio, la evolución tectónica en las secuencias del pre-Aptiense fue desarrollada bajo dos escenarios: i) un régimen extensional cuya actividad principal fue durante el Jurásico medio a superior, caracterizado por la formación de fallas lítricas y fallas de alto ángulo que controlaron la depositación de la Fm. Chapiza, esto evidenciado por la variación (incremento) de su espesor hacia la falla y la creación de anticlinales rollover y ii) un régimen compresional (inversión) durante el Cretácico inferior (Correlacionable con el evento Peltetec), caracterizado por la presencia de fallas actualmente inversas y que forman anticlinales fallados. Estos dos escenarios tectónicos crean estructuras anticlinales que pueden almacenar hidrocarburos en el caso de existir un sistema petrolero efectivo.

La identificación de un proceso de migración en las secuencias del pre-Aptiense es bastante complicada por la limitada cantidad de información. No obstante, un análisis de inclusiones fluidas realizada en una muestra de afloramiento localizada inmediatamente sobre volcanosedimentos de la Fm. Chapiza presenta buenas probabilidades de ser un *carrier bed*, esto por la presencia de inclusiones e impregnaciones fluorescentes (característicos de la presencia de hidrocarburos) formadas en condiciones diagenéticas.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Consorcio Petrosud Petroriva y al Consorcio Petrolero Palanda Yuca Sur por el auspicio de esta investigación, y a todo el personal técnico involucrado en el proyecto.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] P. Baby, M. Rivadeneira y R. Barragán, La Cuenca Oriente: Geología y Petróleo, Tercera ed., Quito: Travaux de l'Institut Français d'Études Andines, 2014.
- [2] CORE Laboratories, «Estudio de Geoquímica y Bioestratigrafía del pozo Sacha Profundo.» Informe preparado para CEPE. Informe Interno de Petroproducción., 1985.
- [3] Laboratorio de Geología (Guayaquil) de Petroproducción., «Estudio Geológico Pozo Sacha Profundo.» Informe Interno de Petroproducción, 1996.
- [4] Centro de Investigaciones Geológicas Guayaquil, «Informe técnico Análisis de TOC y Pirólisis del Pozo Shushufindi A-39,» Reporte Interno Petroproducción, 2006.
- [5] Centro de Investigaciones Geológicas Guayaquil, «Informe Técnico Petrografía del Kerógeno de 6 Muestras de Núcleos de Corona del Pozo Shushufindi – 58B, Nivel Estratigráfico: Precretácico (FM. Pumbuiza?),» Informe Interno de Petroproducción, 2012.
- [6] M. Díaz, *Caracterización y reconstrucción paleogeográfica de las cuencas preaptenses en el Oriente Ecuatoriano*, Quito: Universidad Central del Ecuador, 2000.
- [7] G. Alvarado, M. Santos y R. Zumarraga, «Evaluación Geológica–Geoquímica de la Cordillera de Cutucú. I.TG-85-33.» 1985.
- [8] M. Rivadeneira, «Perspectivas Hidrocarburíferas en el pre-Cretácico de la Amazonía.» *Oro y Petróleo*, n° 1, pp. 13-18, 1985.
- [9] M. Rivadeneira y C. Sánchez, «Consideraciones geológicas del Preaptense de la Cuenca Oriente,» *Sexto Congreso Ecuatoriano de Ingeniería en Geología, Minas y Geotecnia*, pp. 214-252, 1989.
- [10] J. Gaibor, J. P. A. Hochuli, W. Winkler y J. Toro, «Hydrocarbon source potential of the Santiago Formation, Oriente Basin, SE of Ecuador,» *Journal of South American Earth Sciences* 25, p. 145–156, 2008.
- [11] A. Angulo, *Arquitectura Estructural y Estratigráfica de la Secuencia Pre-Aptense, en la sección Norte del Corredor Sacha-Shushufindi*, Quito: Universidad Central del Ecuador, 2016.
- [12] Centro de Investigaciones Geológicas Guayaquil, «Informe Técnico Bioestratigrafía y Paleoecología del Intervalo 9490 - 12640' del Pozo Shushufindi A-39,» Reporte Interno Petroproducción, 2007.
- [13] Centro de Investigaciones Geológicas Guayaquil, «Informe Técnico Bioestratigrafía y Paleoecología del Intervalo 10006'-10019', Fm. Pumbuiza (?) del Pozo Shushufindi-B58 Cuenca Oriente, Ecuador,» Reporte Interno Petroecuador, 2011.
- [14] Centro de Investigaciones Geológicas Guayaquil, «Informe Técnico Informe Bioestratigráfico y Paleoecológico del Pozo Sacha Profundo (Intervalo 10570'-16144') Cuenca Oriente del Ecuador,» Reporte Interno Petroproducción, 2006.
- [15] R. Riecker, Hydrocarbon fluorescence and migration of petroleum., vol. 58, Bulletin: The American Association of Petroleum Geologist, 1962, pp. 167-211.
- [16] N. Cesaretti, J. Parnell, E. Domínguez y B. Milka, «Inclusiones fluidas e isótopos de Oxígeno en los cuarzos autigénicos de la Formación Auquilco, Yesera del Tromen, provincia del Neuquen,» *Mineralogía y Metalogénia*, vol. 6, pp. 87-93, 2000.
- [17] Centro de Investigaciones Geológicas Guayaquil, «Informe técnico Análisis de Petrografía del Kerógeno Pozo Shushufindi A-39,» Reporte Interno Petroproducción, 2007.
- [18] D. Jarvie, Correlation of Tmax and Measured Vitrinite Reflectance, TCU Energy Institute Notes, 2018, p. 13.
- [19] K. McClay y P. Ellis, «Analogue models of extensional fault geometries,» de *Continental Extensional Tectonics, Geological Society Special Publication*, 1987, pp. 109-125.
- [20] M. Díaz, P. Baby, M. Rivadeneira y F. Christophoul, El Pre-Aptense en la Cuenca Oriente Ecuatoriana, Quito, 2014.
- [21] E. S. T. S. P. C. G. & M. R. Jaillard, «The role of Thethys in the evolution of the Northern Andes between Late Permian and Late Eocene times,» de *The Ocean Basins and Margins*, New York, Plenum Press, 1995, pp. 463-492.
- [22] R. Spikings, R. Cochrane, D. Villagomez, R. Van der Lelij, C. Vallejo, W. Winkler y B. Beate, «The geological history of northwestern South America: from Pangaea to the early collision of the Caribbean Large Igneous Province (290–75 Ma),» *Gondwana Research*, 2014.
- [23] P. A. Allen y J. R. Allen, Basin Analysis, Hoboken, Nueva Jersey: Wiley-Blackwell., 2013.

- [24] D. Emery y K. Myers, *Sequence Stratigraphy.*, Uxbridge, London: BP Exploration, Stockley Park, 1996.
- [25] F. Christophoul, *Discrimination des influences tectonique et eustatiques dans les bassins liés a des zones de convergence: exemples du bassin subandin d' Equateur.*, Université Toulouse III, 1999.
- [26] C. Romero, Identificación y Caracterización de Facies de la Formación Hollín en Centro Shaipe: El Registro de una Transición Fluvio-Marina en la Región Sur Oriental del Ecuador, Quito: EPN, 2018, p. 214.
- [27] H. White, F. Skopec, J. Ramírez y G. Bonilla, «Reservoir characteristics of the Hollin and Napo formations, western Oriente Basin, Ecuador.,» de *Petroleum Basins of South America: American Association of Petroleum Geologist, Memoir*, vol. 62, 1995, p. 573–596..
- [28] A. Angulo, P. Baby, M. Rivadeneira, J. Rosero y J. Bustos , «Arquitectura del Pre-Aptiense,» *Octavas Jornadas en Ciencias de la Tierra*, pp. 37-42, 2017.