

**Eventos diagenéticos de la Formación La Paz en dos pozos de la Cuenca VMM y su control
sobre la calidad del reservorio**

Omar Albeiro Sanabria Gómez

Trabajo de grado para optar el título de Geólogo

Director

Mario García González

Geólogo, PhD

Codirector

Juan José Gómez Caro

Geólogo, MSc

**Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Físicoquímicas
Escuela de Geología
Bucaramanga
2018**

Dedicatoria

A mi familia, por los que vivo.

A mis amigos, con los que cuento.

Agradecimientos

A la Universidad Industrial de Santander, principalmente a la escuela de Geología por estos valiosos años en los que no solamente hizo parte de mi formación profesional en ciencias de la Tierra sino también como persona.

A mis directores de tesis, el profesor PhD Mario García y el geólogo MSc Juan José Gómez, por sus orientaciones, su disponibilidad y las lecciones enseñadas.

Al personal del Instituto Colombiano del Petróleo, especialmente a las geólogas Liliana Páez y Erika Guarín quienes atentamente despejaron mis dudas en el laboratorio de Petrografía, a la química Angélica Carreño y a la física María del Rosario Pérez quienes guiaron la preparación de mis muestras en los laboratorios de Difracción de Rayos X y Microscopía Electrónica.

Al personal de los laboratorios de Microscopía y de Rayos X del Parque Tecnológico de Guatiguará por las técnicas llevadas a cabo a mis muestras.

A mi compañera Lina Pedraza y a su familia por el acompañamiento en esta etapa de mi formación.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	17
1. Objetivos.....	18
1.1 Objetivo general.....	18
1.2 Objetivos específicos	18
2. Localización	19
3. Marco geológico	20
4. Marco teórico	22
5. Metodología	23
5.1 Recopilación bibliográfica.....	23
5.2 Trabajo de laboratorio.....	23
5.2.1 Petrografía.	23
5.2.2 Microscopía electrónica de barrido (SEM-EDX).	23
5.2.3 Difracción de rayos X (DRX).....	24
5.3 Análisis de resultados y redacción del libro	24
6. Resultados.....	25
6.1 Petrofacies.....	25

EVENTOS DIAGENÉTICOS DE LA FORMACIÓN LA PAZ, VMM.	7
6.1.1 Pozo Este.....	25
6.1.1.1 Petrofacies Arcosa lítica	25
6.1.1.2 Petrofacies Sublitoarenita.....	26
6.1.1.3 Petrofacies Litoarenita feldespática.	26
6.1.2 Pozo Oeste.....	30
6.1.2.1 Petrofacies Litoarenita.	30
6.1.2.2 Petrofacies Litoarenita feldespática.	31
6.1.3 Pozo Este vs Pozo Oeste.....	32
6.2 Sucesión de eventos diagenéticos	38
6.2.1 Compactación.....	41
6.2.3 Fracturamiento.	41
6.2.4 Cementación.	41
6.2.5 Disolución.	41
6.2.6 Alteración.	41
6.2.7 Migración de hidrocarburo.....	42
6.3 Control de los eventos diagenéticos sobre la calidad del reservorio	46
7. Discusión	47
8. Conclusiones	50
9. Recomendaciones.....	52

Referencias bibliográficas..... 54

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Ubicación de los pozos E y W en Colombia y en el área aledaña. (Servicio Geológico Colombiano y Google Earth, 2015).....	19
Figura 2. Cuenca VMM en Colombia indicando sus límites. Luis Sarmiento (Agencia Nacional de Hidrocarburos, 2011).....	20
Figura 3. Petrografía Pozo Este. Petrofacies Arcosa lítica donde se presenta cementación por siderita y calcita, fragmentos de rocas plutónicas y metamórficas, feldespato potásico, leucoxeno y un leve proceso de oxidación y disolución.....	27
Figura 4. Petrografía Pozo Este. Petrofacies Sublitoarenita donde se observa cementación por siderita y calcita, porosidad secundaria, fragmentos de roca e intraclastos (A, B, C). Petrofacies Litoarenita feldespática donde presentando cementación por siderita y calcita, procesos de argilización en plagioclasa, piritización en materia orgánica, disolución y fracturamiento (D, E, F).....	28
Figura 5. SEM-EDX Pozo Este. Petrofacies Arcosa lítica donde se observa contenido de Barita (A-A') y caolinita (B-B'), estos minerales se encuentran como agentes cementantes. Petrofacies Sublitoarenita con contenido de hematita (C-C').....	29
Figura 6. SEM-EDX Pozo Este. Petrofacies Sublitoarenita con contenido de feldespato potásico (A-A'). Petrofacies Litoarenita feldespática exhibiendo clorita (B-B') e illita (C-C').....	30
Figura 7. Distribución de las secciones delgadas analizadas en el diagrama para la clasificación composicional de areniscas (Folk <i>et al.</i> , 1970). Izquierda Pozo Oeste, derecha Pozo Este.....	32

- Figura 8. Petrografía Pozo Oeste. Petrofacies Litoarenita donde se observa cementación por siderita y calcita, pirita, procesos de argilización, disolución y fragmento de rocas volcánicas y sedimentarias (A, B, C). Petrofacies Litoarenita feldespática presentando cemento de siderita, bitumen, feldespatos potásicos, fragmento de rocas plutónicas, volcánicas, bitumen, procesos de disolución, piritización, argilización y fracturamiento (D, E, F).....33
- Figura 9. SEM-EDX Pozo Oeste. Petrofacies Litoarenita donde se observa caolinita vermiforme (A-A') y pirita (B-B'). Petrofacies Litoarenita feldespática con contenido florencita (C-C'), mineral que hace parte del grupo de los fosfatos.....34
- Figura 10. SEM-EDX Pozo Oeste. Petrofacies Litoarenita feldespática donde se identifica cementos del tipo illita (A-A') y siderita (B-B').....35
- Figura 11. Difractogramas de la fracción menor a 2 micras a partir de DRX del Pozo Este. Petrofacies Sublitoarenita (A), Petrofacies Arcosa lítica (B), Petrofacies Litoarenita feldespática (C).....37
- Figura 12. Difractogramas de la fracción menor a 2 micras a partir de DRX del Pozo Oeste. Petrofacies Litoarenita feldespática (A) y petrofacies Litoarenita (B).....38
- Figura 13. Columna estratigráfica del Pozo Oeste de la Formación La Paz mostrando la variación de sus componentes en toda la sección.....39
- Figura 14. Columna estratigráfica del Pozo Este de la Formación La Paz mostrando la variación de sus componentes en toda la sección.....40
- Figura 15. Compactación (A-B) y fracturamiento (C-D). A izquierda Pozo Oeste y a derecha Pozo Este.....42
- Figura 16. Cementación de: siderita (A-B), arcillas (C-D) y calcita (E-F). A izquierda Pozo Oeste y a derecha Pozo Este.....43

Figura 17. Disolución (A-B) y alteración: argilización (C-D) y piritización (E-F). A izquierda Pozo Oeste y a derecha Pozo Este.....	44
Figura 18. Migración de hidrocarburos (A-B). A izquierda Pozo Oeste y a derecha Pozo Este....	45
Figura 19. Diagrama expresando la secuencia de los eventos diagenéticos para la Formación La Paz en los pozos Oeste (Negro) y Este (Rojo).....	45

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Concentración relativa a nivel de <i>bulk</i> , roca total a partir de DRX.....	36
Tabla 2. Concentración relativa a nivel de la fracción menor de 2 micras a partir de DRX.....	36
Tabla 3. Eventos diagenéticos y su impacto en la calidad como roca reservorio de la Formación La Paz.....	46

Lista de Apéndices

(Ver apéndices adjuntos en el CD y pueden visualizarlo en la base de datos de la biblioteca UIS).

Apéndice A. Formato de descripción composicional y textural Pozo Oeste

Apéndice B. Formato de descripción composicional y textural Pozo Este

Apéndice C. Catálogo SEM-EDX Pozos Oeste y Este

Apéndice D. Catálogo fotomicrográfico Pozo Oeste

Apéndice E. Catálogo fotomicrográfico Pozo Este

Lista de abreviaturas

Qtz, Qz	Cuarzo
Fd	Feldespatos
Kfs	Feldespatos potásicos
Pl	Plagioclasa
Py	Pirita
Sd	Siderita
Cal	Calcita
Zrn	Zircón
Lcx	Leucoxeno
Frm	Fragmento de roca metamórfica
Frs	Fragmento de roca sedimentaria
Frv	Fragmento de roca volcánica
Lit	Líticos
Frp	Fragmento de roca plutónica
Ms	Moscovita
Mtx	Matriz
Intr	Intraclasto
Arc	Arcilla
ϕ_1	Porosidad primaria
ϕ_2	Porosidad secundaria
$\mu\phi$	Microporosidad
NP	Nicoles paralelos
NX	Nicoles cruzados
LR	Luz reflejada
VMM	Valle Medio del Magdalena

Resumen

Título: Eventos diagenéticos de la Formación La Paz en dos pozos de la Cuenca VMM y su control sobre la calidad del reservorio *

Autor: Omar Albeiro Sanabria Gómez **

Palabras clave: Diagénesis, Formación La Paz, Valle Medio del Magdalena, calidad, reservorio.

A partir de estudios de petrografía, microscopía electrónica de barrido (SEM-EDX) y difracción de rayos X (DRX) hechos en rocas de la Formación La Paz en dos (2) pozos de la Cuenca del Valle Medio del Magdalena (VMM), uno denominado Pozo Oeste (ubicado sobre el Río Magdalena) separado 50 Km del segundo pozo denominado Pozo Este, se definieron cuatro (4) petrofacies: Litoarenita, Litoarenita feldespática, Sublitoarenita y Arcosa lítica.

Del análisis mineralógico y textural de las petrofacies establecidas, se definieron los principales eventos diagenéticos de la Formación La Paz en los dos pozos mencionados. Disminuyen la calidad como reservorio de hidrocarburos, la compactación, la cementación con carbonatos (siderita y calcita), la cementación con arcillas (caolinita, illita, clorita y esmectita), la argilización de feldespatos/líticos volcánicos y la migración de hidrocarburos. De otro lado, los eventos diagenéticos que mejoran la calidad del reservorio fueron el fracturamiento y la disolución de feldespatos y fragmentos de rocas volcánicas, lo cual dio lugar a importantes valores de porosidad secundaria, especialmente en el Pozo Oeste. La mayor parte de los eventos tuvieron lugar principalmente durante las etapas Eo y Mesogenéticas.

Con este estudio además se concluye que las rocas de la Formación La Paz son más maduras textural y composicionalmente en el pozo Este que en el Pozo Oeste.

* Trabajo de grado.

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología. Director: PhD Mario García Gonzáles. Codirector: MSc Juan José Gómez Caro.

Abstract

TITLE: La Paz Formation's diagenetic events in two wells of the VMM basin and its control on the reservoir's quality*

AUTHOR: Omar Albeiro Sanabria Gómez**

KEYWORDS: Diagenesis, La Paz Formation, Middle Magdalena Valley basin, quality, reservoir.

From studies of petrography, scanning electron microscopy (SEM-EDX) and X-ray diffraction (XRD) made in rocks of the La Paz Formation in two (2) wells of the Middle Magdalena Valley basin (VMM), one named West Well (located on the Magdalena River) separated 50 km from the second well called East Well, four (4) petrofacies were defined: Litharenite, Feldspathic litharenite, Sublitharenite and Lithic Arkose.

From the mineralogical and textural analysis of the established petrofacies, the main diagenetic events of the La Paz Formation were defined in the two mentioned wells. Those that diminish the quality as reservoir of hydrocarbons were the compaction, the cementation with carbonates (siderite and calcite), the cementation with clays (kaolinite, illite, chlorite and smectite), the argilization of volcanic feldspars/lithics and the migration of hydrocarbons. On the other hand, the diagenetic events that improve the quality of the reservoir were the fracturing and dissolution of feldspars and volcanic rock fragments, which gave rise to important values of secondary porosity, especially in the West Well. Most of the events took place mainly during the Eo and Mesogenetic stages.

With this study it is also concluded that the rocks of the La Paz Formation are more mature texturally and compositionally in the Eastern than in the Western Well.

* Undergraduate thesis

** Faculty of Physicochemical Engineering. School of Geology. Director: PhD Mario García Gonzáles. Codirector: MSc Juan José Gómez Caro.

Introducción

La Formación La Paz de edad eoceno, una de las principales productoras de hidrocarburos en la Cuenca Valle Medio del Magdalena (VMM), junto con la suprayacente Formación Esmeraldas conforman el Grupo Chorro. Consta de areniscas masivas, conglomeráticas, de color gris claro, con estratificación cruzada y con intercalaciones dispersas de limonitas y shales que se encuentran principalmente en los dos tercios inferiores de la formación. Hacia la base, se encuentra un nivel de lutitas arenosas que constituyen el Miembro Toro, el cual yace discordante sobre la Formación Lisama. La Formación La Paz varía considerablemente de espesor alcanzando los 1000 metros en su sección tipo. (Morales, Podesta y Hatfield, 1958)

La producción de hidrocarburos en la Cuenca VMM ha sido fundamental para el desarrollo del sector energético en Colombia, sin embargo, aunque se dispone de variada y dispersa información, es necesario mejorar el conocimiento petrológico de las formaciones productoras de petróleo en esta Cuenca.

Como un aporte al desarrollo de la industria petrolera en Colombia, la investigación de petrología sedimentaria y geoquímica inorgánica hecha en este proyecto tiene por objeto tener un mejor entendimiento de la relación entre los eventos diagenéticos de la Formación La Paz y su impacto en las características composicionales y texturales en relación con la calidad de la roca como reservorio de hidrocarburos.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Establecer cronológicamente la sucesión de eventos diagenéticos en la Formación La Paz a partir de muestras de núcleos de dos pozos ubicados en la Cuenca Valle Medio del Magdalena (Colombia) con el propósito de evaluar su control en la calidad del reservorio.

1.2 Objetivos Específicos

- Establecer los eventos diagenéticos que tuvieron lugar en la Formación La Paz a partir de su estudio en dos pozos.
- Definir petrofacies en dos pozos de la Formación La Paz a partir de técnicas de petrografía, microscopía electrónica de barrido (SEM-EDX) y difracción de rayos X (DRX).
- Determinar la calidad de la Formación La Paz como roca reservorio de hidrocarburos en relación con sus eventos diagenéticos.

2. Localización

Los pozos Este (E) y Oeste (W) se encuentran localizados geográficamente en los departamentos de Santander y Bolívar (Colombia), respectivamente. El Pozo Este se encuentra en la jurisdicción del municipio de Sabana de Torres mientras que el Pozo Oeste en la de Cantagallo, como lo muestra la Figura 1.

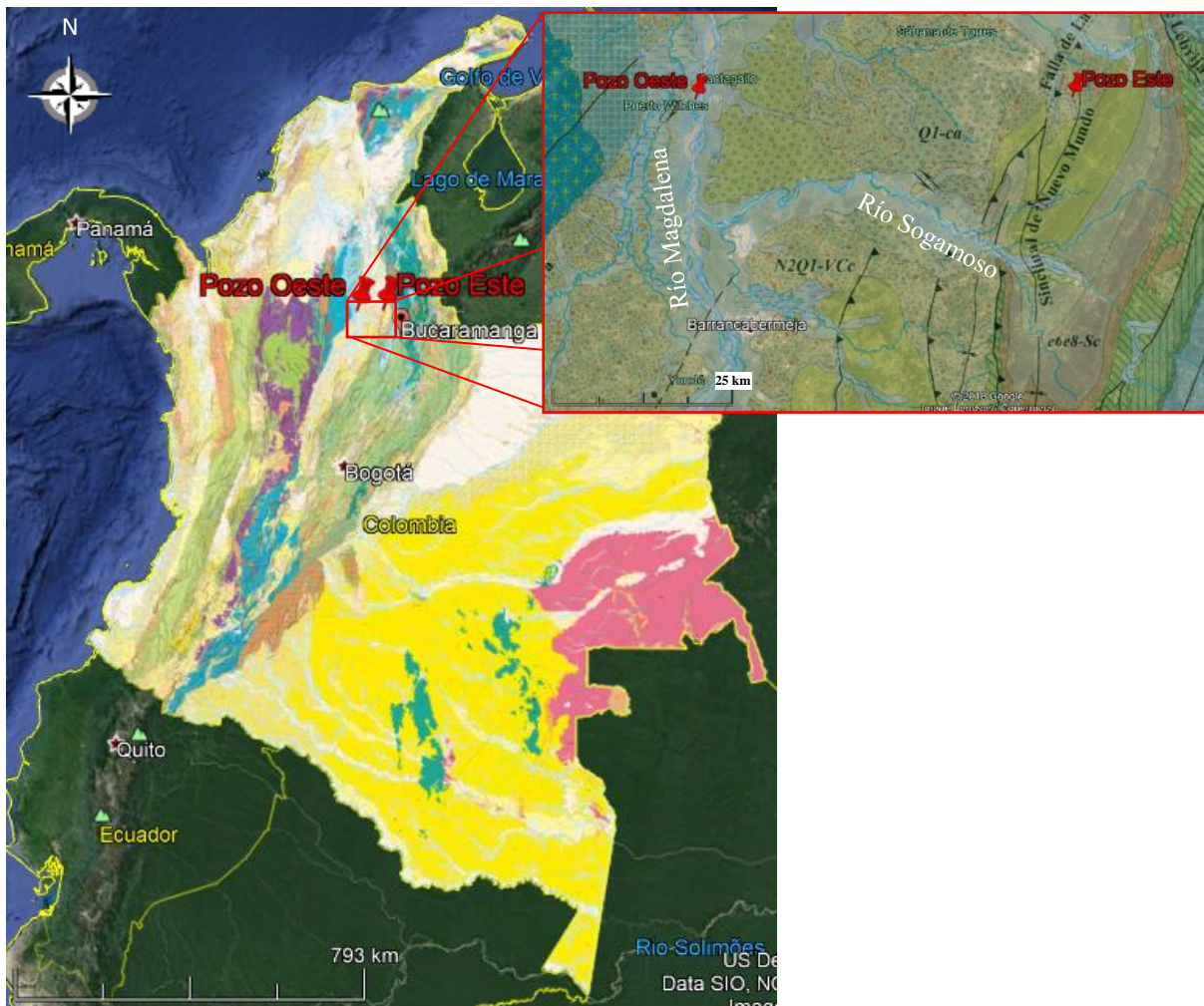


Figura 1. Ubicación de los pozos E y W en Colombia y en el área aledaña. (Servicio Geológico Colombiano y Google Earth, 2015).

3. Marco geológico

La Formación La Paz, estratigráficamente definida por Anderson (1926) quien le asignó una edad correspondiente al periodo Paleógeno, de época Eoceno (como se citó en Porta, 1974) hace parte de la Cuenca del Valle Medio del Magdalena (VMM), la cual se sitúa en la región central de Colombia y debe su nombre al Río Magdalena, que separa las cordilleras Central y Oriental. Esta cuenca (Figura 2) está limitada al nororiente por el sistema de fallas Bucaramanga-Santa Marta, al noroccidente por el sistema de fallas Espíritu Santo y la serranía de San Lucas, al suroccidente por la cordillera Central, al sur por el cinturón plegado de Girardot y al suroriente por el sistema de fallas Bituima y La Salinas (ANH 2012).

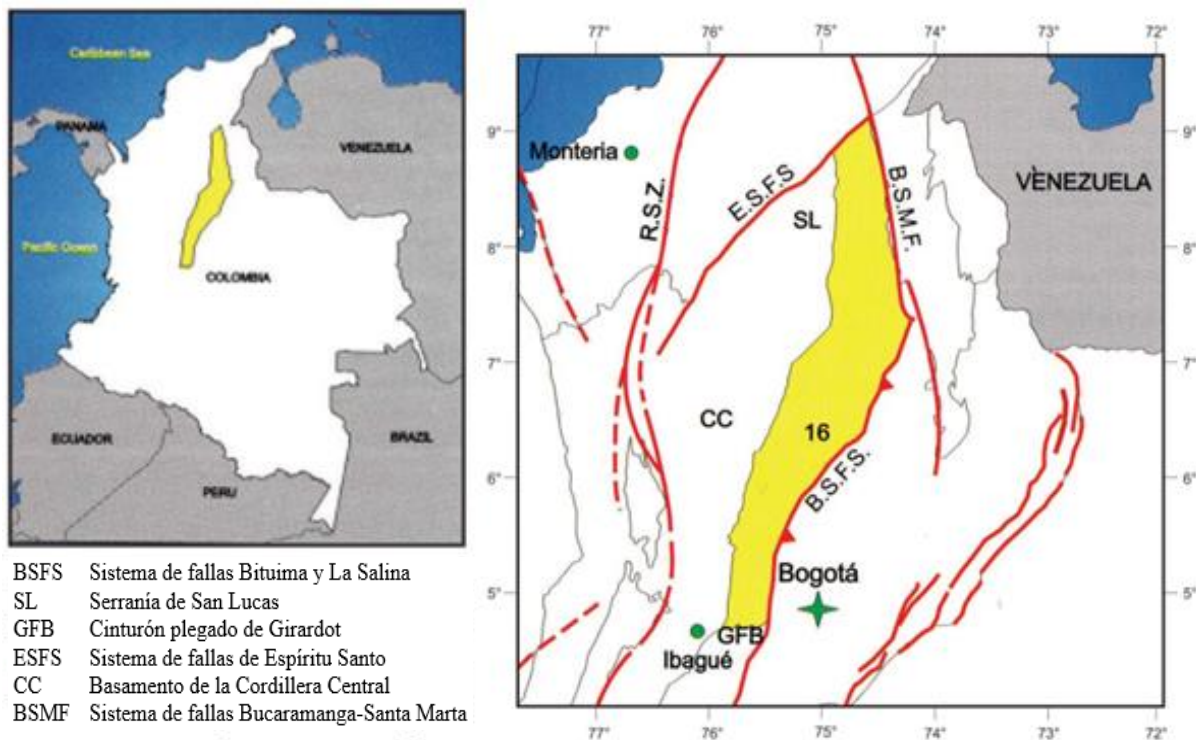


Figura 2. Cuenca VMM en Colombia indicando sus límites. Modificado de: Luis Sarmiento (Agencia Nacional de Hidrocarburos, 2011).

La Cuenca VMM corresponde a una fosa depositacional con una historia compleja, formada como resultado de varios eventos geológicos. Los periodos Jurásico y Cretácico se definieron por un estilo estructural distensivo ocasionando la formación de grabens como efecto de la separación de Sudamérica y Norteamérica. Esto produjo también la formación de un gran aulacógeno con orientación NO-SE que permitió el ingreso del mar al continente. Durante la fase sinrift, los sistemas grabens fueron rellenados con sedimentos continentales clásticos donde dominaban los ambientes fluviales que posteriormente serían suprayacidos por sedimentos de origen marino somero, luego de una etapa de transgresión durante el Berriasiano - Valanginiano (Etayo, Renzoni, y Barrero, 1969).

La sedimentación postrift inicia en el Turoniano - Coniaciano y termina a finales del Cretácico debido a la compresión que comienza a predominar en la zona noroccidental de Suramérica, la cuál sería causante del levantamiento de la Cordillera Occidental a finales del Mesozoico y comienzos del Cenozoico. Esto produjo un cambio significativo en la sedimentación, puesto que en la región ya no predominaba un ambiente marino sino de transición tipo llanura deltaica y pantano. Las rocas depositadas en el Cretácico alcanzan unos 4000 m de espesor y son generalmente arcillolitas negras, calizas y margas fosilíferas y eventualmente arenitas, existiendo permanentemente una relación concordante entre ellas (Taborda, 1961).

Desde el Paleoceno Tardío hasta el Oligoceno, la sedimentación estuvo controlada por la orogenia Andina dando lugar a un espacio de acomodación que permitió la acumulación de los materiales provenientes de la Cordillera Central y la entonces emergente Cordillera Oriental, transportados y depositados en ambientes de carácter fluvial (prevaleciendo el desarrollo de facies clásticas arenosas en la cuenca) y de manera subordinada llanuras de inundación. Los sedimentos del Cenozoico comprenden un espesor del orden de 8000 m y están constituidos por areniscas y

arcillolitas arenosas de colores gris, amarillo, pardo y verde (Taborda, 1961). Desde el Oligoceno Medio hasta el presente la región Oriental de Colombia se ha estado continuo levantamiento (Suarez M. , 1996).

4. Marco teórico

Los procesos ocurridos durante la diagénesis de rocas siliciclásticas y que más influyen en la producción de hidrocarburos pueden ser divididos en dos, físicos y químicos. Los procesos físicos incluyen la compactación donde el decremento del volumen intergranular (VIG) es un parámetro clave en la transformación de una arena suelta a una arenisca. En el marco de este proceso mecánico se pueden dar eventos de fracturamiento que favorecen la permeabilidad y porosidad de las rocas. De otro lado están los procesos químicos dentro de los cuales se destacan la cementación y la disolución. En el primero la precipitación de minerales ortoquímicos disminuye la porosidad y permeabilidad de la roca, mientras que la disolución de minerales inestables favorece el origen de porosidades secundarias propicias para las condiciones petrofísicas de una formación reservorio (Milliken, 2003).

En areniscas, la eogénesis (diagénesis temprana) comprende procesos de bioturbación, compactación, disolución, presión-solución, cementación, alteración y reemplazo los cuales coinciden, a excepción de la bioturbación con los procesos que se pueden dar en la mesogénesis (diagénesis media), a la cuál se le suma la decementación (disolución de cemento eogenético), recristalización e inversión (neomorfismo). En la telogénesis (diagénesis tardía) se dan eventos de disolución, alteración, cementación y oxidación (Boggs, 2009).

5. Metodología

El proyecto consta de 3 etapas

5.1 Recopilación bibliográfica

En esta etapa se realizó una consulta de temas como petrología de rocas siliciclásticas, petrografía de areniscas, Cuenca del Valle Medio del Magdalena, Formación La Paz, microscopía electrónica de barrido, difracción de rayos X, calidad de rocas reservorios de hidrocarburos, entre otros, con el fin de recopilar información útil para el desarrollo del proyecto.

5.2 Trabajo de laboratorio

Durante el desarrollo del proyecto se realizaron los siguientes tres (3) métodos con el fin de cumplir los objetivos planteados:

5.2.1 Petrografía. Para su desarrollo se eligieron 20 secciones delgadas del Pozo Este y 20 del Pozo Oeste de manera que cubrieran toda la sección que comprendía la Formación La Paz. En cada una se contaron 300 puntos para determinar composición y 200 puntos para medir tamaños de grano, observando de forma general características texturales como esfericidad, redondez, fábrica y empaquetamiento mientras que la selección fue obtenida en Excel a través del cálculo de la desviación estándar expresada en unidades phi (Folk, 1974). Usando la cámara acoplada en el microscopio se realizó la toma de fotomicrografías que evidenciaran eventos diagenéticos en las muestras. Para la clasificación composicional de las rocas y el establecimiento de petrofacies se utilizó el diagrama para la clasificación composicional de areniscas (Folk, Andrews y Lewis, 1970) y para su clasificación textural el triángulo de clasificación granulométrica (Folk, 1954).

5.2.2 Microscopía electrónica de barrido (SEM-EDX). Esta técnica se realizó en muestras de núcleo obtenidas de la profundidad de cada petrofacies donde por análisis petrográfico se

determinó que tenían un mayor contenido de arcillas. Las muestras seleccionadas para este análisis se sometieron a un proceso de limpieza con tolueno metanol que las dejó desprovistas de cualquier resto de hidrocarburo y así se procedió con el análisis de microscopía electrónica. Estas muestras se recubrieron con oro al vacío y se colocaron sobre *stubs* metálicos; posteriormente se examinaron en el microscopio electrónico de barrido (SEM) donde se obtuvieron las imágenes de alta resolución y los espectros de energía dispersiva (EDX) con los cuales se identificaron los elementos químicos que constituyen los diferentes minerales. La integración de las técnicas de SEM y EDX junto con la comparación con imágenes del atlas de Petrología SEM (Welton, 1984) permitió el reconocimiento de los minerales correspondientes.

5.2.3 Difracción de rayos X (DRX). Esta técnica se realizó a los remanentes de las muestras de núcleo no destinadas para SEM-EDX bajo dos modalidades: Roca total o *bulk* y fracción arcilla (partículas de diámetro efectivo menor a 2 μm). El análisis *bulk* describe de una manera global la mineralogía de la roca total, mientras que el análisis de la fracción menor de 2 micras caracteriza principalmente los filosilicatos que se concentran en partículas con este tamaño, sin embargo, también se pueden encontrar otras mineralogías. Para esta última modalidad se prepararon tres muestras por petrofacies; una fue calcinada a 550 °C, otra tratada con etilenglicol y la tercera no recibió ningún tratamiento. Los resultados fueron comparados con el Manual de laboratorio para difracción de rayos X (Poppe, 2001).

5.3 Análisis de resultados y redacción del libro

Con la información recopilada y los resultados obtenidos en la etapa de laboratorio se estableció cronológicamente la serie de eventos diagenéticos ocurridos en la Formación La Paz, así como el impacto de cada uno de estos en su calidad como roca reservorio. Finalmente se realizó un informe completo, en el que se incluye el presente libro y sus apéndices.

6. Resultados

6.1 Petrofacies

A partir de los datos obtenidos del análisis petrográfico y su posterior tratamiento se pudieron identificar tres (3) petrofacies en el Pozo Este y dos (2) en el Pozo Oeste, cada una de las cuales se complementaron con resultados de SEM-EDX y DRX. Los rangos de porosidad establecidos fueron: 0 a 5% insignificante, 5-10% pobre, 10-15% regular, 15 a 20% buena y mayor de 20% muy buena (Donaldson y Tiab, 22012).

6.1.1 Pozo Este

6.1.1.1 Petrofacies Arcosa lítica. Presenta porcentajes de cuarzo que varían del 48,1% al 51,5%, feldespatos del 16% a 17,9% mientras que los fragmentos líticos (ígneos mayoritariamente, chert, esquistos y cuarcitas) van de 13,3% hasta 16,3%. En las secciones delgadas pertenecientes a esta litofacies se observan minerales accesorios como leucoxeno, pirita, circón, óxidos y dúctiles como la moscovita. La matriz arcillosa en estas muestras varía entre 0,6% y 8,2% mientras que el cemento (siderita, calcita y en menor medida de arcilla) varía entre 4,7% 7,2%. El total de poros en estas secciones delgadas oscila entre 0,6% y 8,2% (siendo los mayores aportes 21,3% por disolución y 4% por fracturamiento) por lo que esta litofacies comprende porosidades insignificantes y pobres. Texturalmente estas rocas corresponden a Arenitas y Arenitas lodosas, en las cuales los tamaños de grano muy fino, fino y medio prevalecen, en términos de selección se encuentran muestras pobre y moderadamente bien sorteadas. (Figura 3).

A partir del análisis SEM-EDX realizado a una muestra de profundidad 9882 pies se pudo identificar barita y caolinita, los cuales se encuentran cementando la roca (Figura 5). Por otra parte, del análisis DRX se obtuvo que esta muestra se compone 71% de cuarzo (5% cuarzo

microcristalino) y 9% de minerales arcillosos, mientras que los carbonatos, feldespatos potásicos y sódicos representan menos del 5% cada uno, de los minerales arcillosos 60% corresponden a caolinita mientras que 30% es illita (Tablas 1 y 2).

6.1.1.2 Petrofacies Sublitoarenita. Presenta porcentajes de cuarzo que varían del 53,1% al 67,1%, feldespatos del 2,5% a 8% mientras que los fragmentos líticos (ígneos mayoritariamente, chert, esquistos y cuarcitas) van de 7,1% hasta 12,1%. En algunas de estas muestras se encuentran minerales accesorios como leucoxeno, pirita, óxidos, circón y dúctiles como moscovita y materia orgánica (bitumen). El contenido de matriz arcillosa en estas rocas va del 0% a 7,8% y de cemento (siderita, calcita y en menor medida de arcilla) de 0,6% a 12,9%. La porosidad total varía entre 13,1% y 22,4% (siendo los mayores aportes 12,2% por disolución y 9,9% por fracturamiento) lo que hace a esta una litofacies con porosidades regulares a muy buenas. Texturalmente estas Sublitoarenitas corresponden a Arenitas, en las que prevalecen los tamaños de grano medio y grueso, son moderadamente sorteadas y moderadamente bien sorteadas (Figura 4).

A partir del análisis SEM-EDX realizado a una muestra con profundidad de 9800 pies se pudo identificar hematita y feldespato potásico presentes en esta petrofacies, por otra parte (Figuras 5 y 6), según el estudio DRX la muestra analizada contiene 85% de cuarzo (9% cuarzo microcristalino), menos de 5% de feldespatos potásicos al igual que de minerales arcillosos, también se muestran trazas de carbonatos. De los minerales arcillosos presentes 61% corresponde a caolinita, 15% a illita, mientras que clorita y esmectitas menos de 5% cada una (Tablas 1 y 2).

6.1.1.3 Petrofacies Litoarenita feldespática. Presenta porcentajes de cuarzo que varían del 27,7% al 60,5%, feldespatos del 3,5% a 13,8% mientras que los fragmentos líticos (ígneos mayoritariamente, chert, esquistos y cuarcitas) van de 8% hasta 21,3%. En algunas de estas muestras se encuentran minerales accesorios como leucoxeno, pirita, circón y dúctiles como

moscovita, materia orgánica (bitumen) e intraclastos. Algunas muestras de esta litofacies contienen matriz arcillosa en contenidos muy bajos (0,9% a 4,5%) mientras que el cemento (siderita, calcita y en menor medida de arcilla) oscila entre 0% y 29,6%. El total de porosidad primaria y secundaria de esta roca varía entre 2,8% y 20,7% (siendo los mayores aportes 7,8% por disolución y 6,2% por fracturamiento), por lo que envuelve desde láminas delgadas con porosidades insignificantes hasta porosidades muy buenas. Texturalmente esta litofacies corresponde a Arenitas, en las cuales los tamaños de grano fino, medio y grueso prevalecen, en cuanto a selección se encuentran SD moderadamente, moderadamente bien y bien sorteadas (Figura 4).

Por otra parte, usando el análisis SEM-EDX se logró identificar que las arcillas presentes a una profundidad de 10031.5 pies son del tipo clorita e illita (Figura 6) y a través del análisis DRX se obtuvo que esta muestra se compone 73% de cuarzo (5% microcristalino) y 12% de minerales arcillosos, mientras que los feldespatos potásicos y sódicos y carbonatos representan menos del 5% cada uno. Entre los minerales arcillosos 50% equivale a illita, 35% a caolinita y menos del 5% a clorita (Tablas 1 y 2)

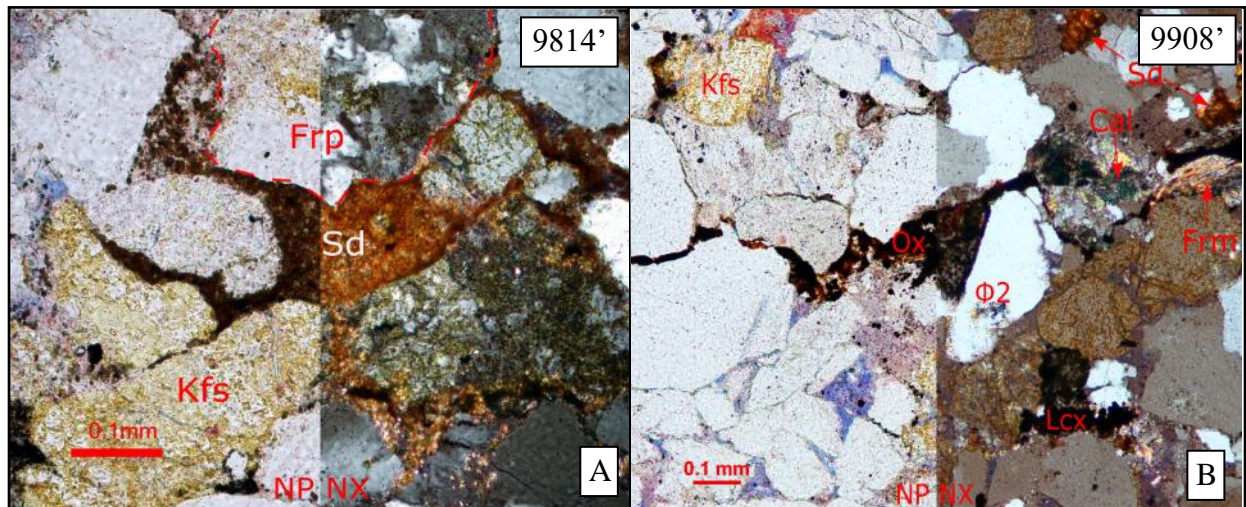


Figura 3. Petrografía Pozo Este. Petrofacies Arcosa lítica donde se presenta cementación por siderita y calcita, fragmentos de rocas plutónicas y metamórficas, feldespato potásico, leucoseno y un leve proceso de oxidación y disolución.

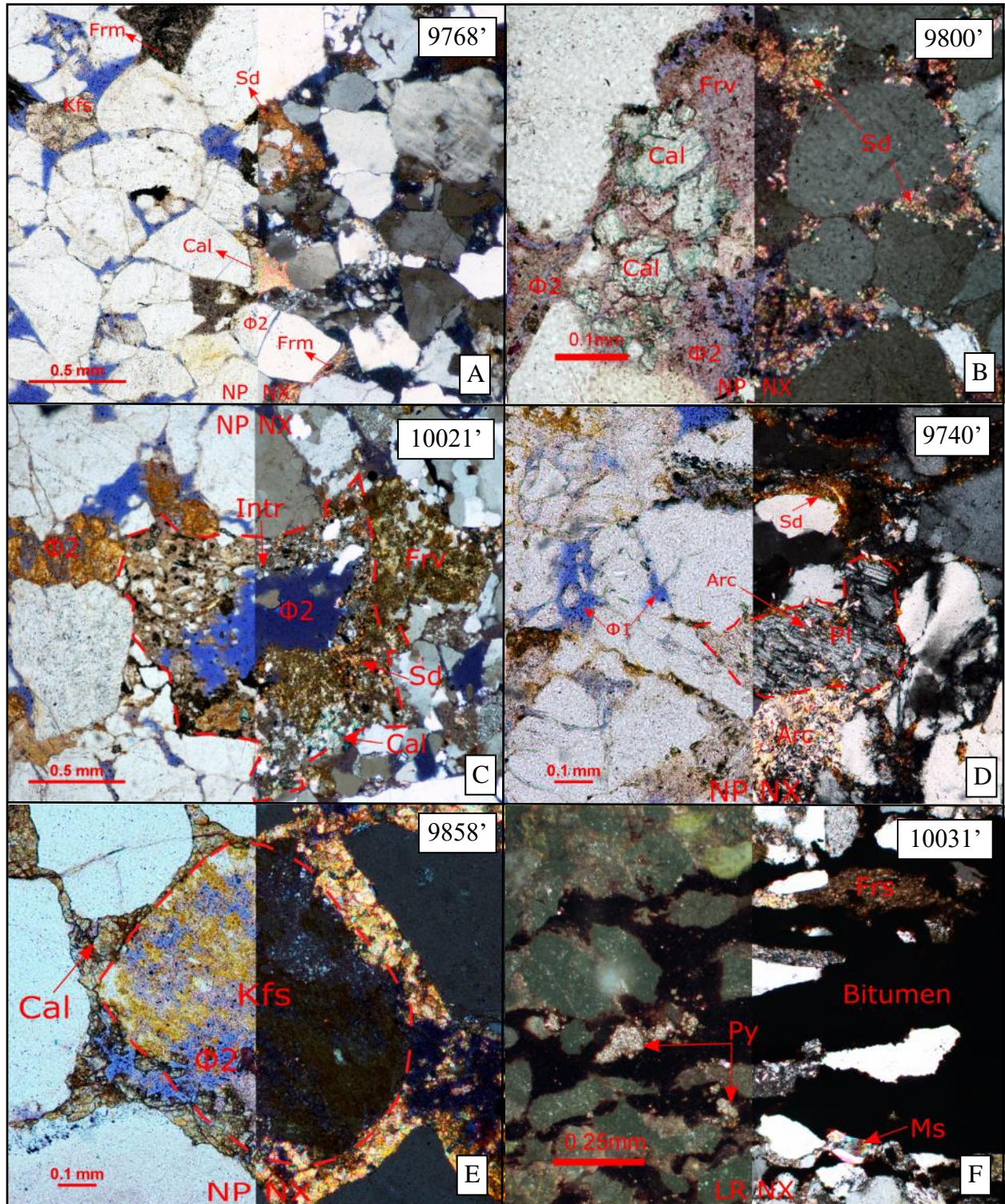


Figura 4. Petrografía Pozo Este. Petrofacies Sublitoarenita donde se observa cementación por siderita y calcita, porosidad secundaria, fragmentos de roca e intraclastos (A, B, C). Petrofacies Litoarenita feldespática donde presentando cementación por siderita y calcita, procesos de argilización en plagioclasa, piritización en materia orgánica, disolución y fracturamiento (D, E, F).

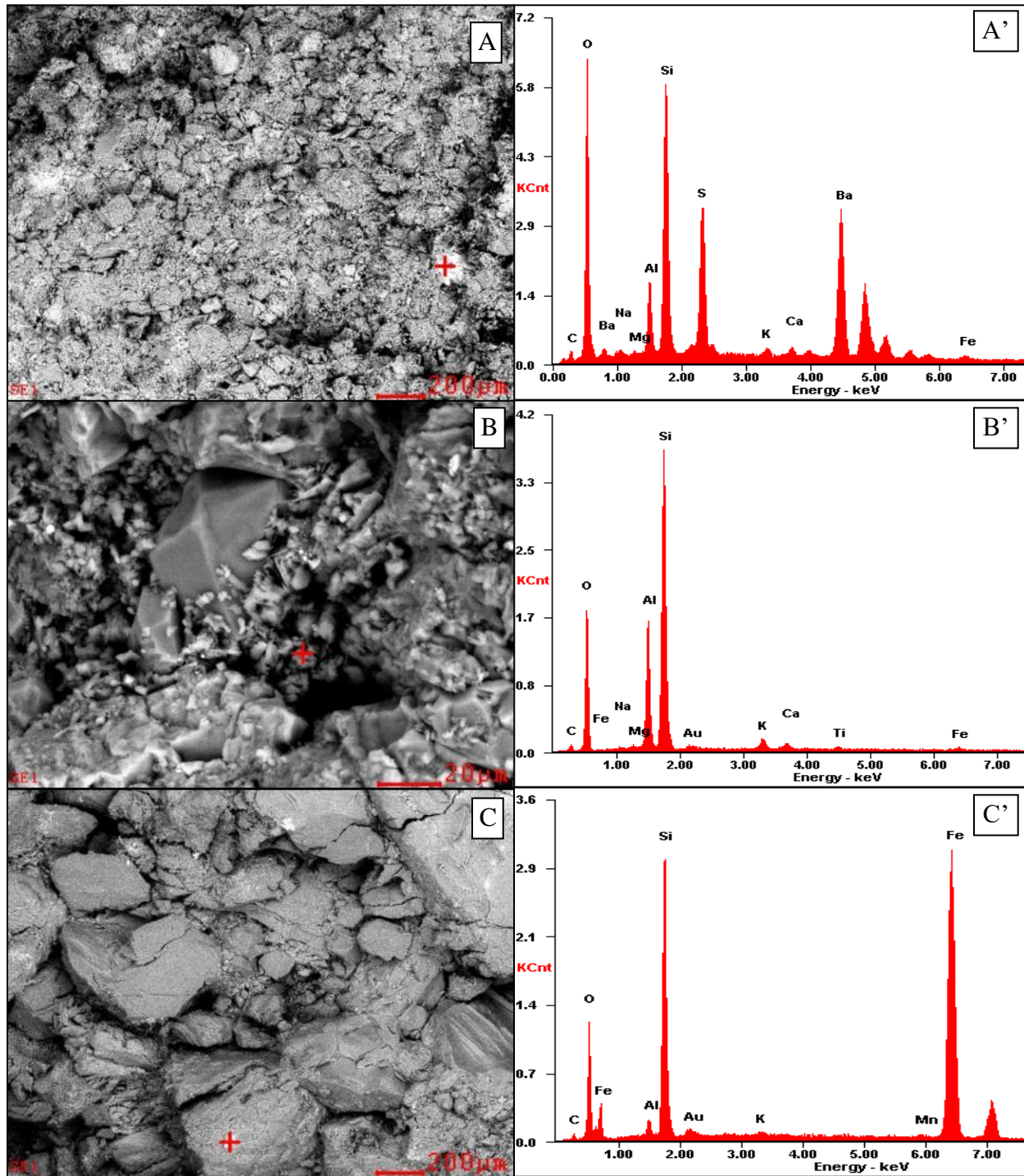


Figura 5. SEM-EDX Pozo Este. Petrofacies Arcosa lítica donde se observa contenido de Barita (A-A') y caolinita (B-B'), estos minerales se encuentran como agentes cementantes. Petrofacies Sublitoarenita con contenido de hematita (C-C').

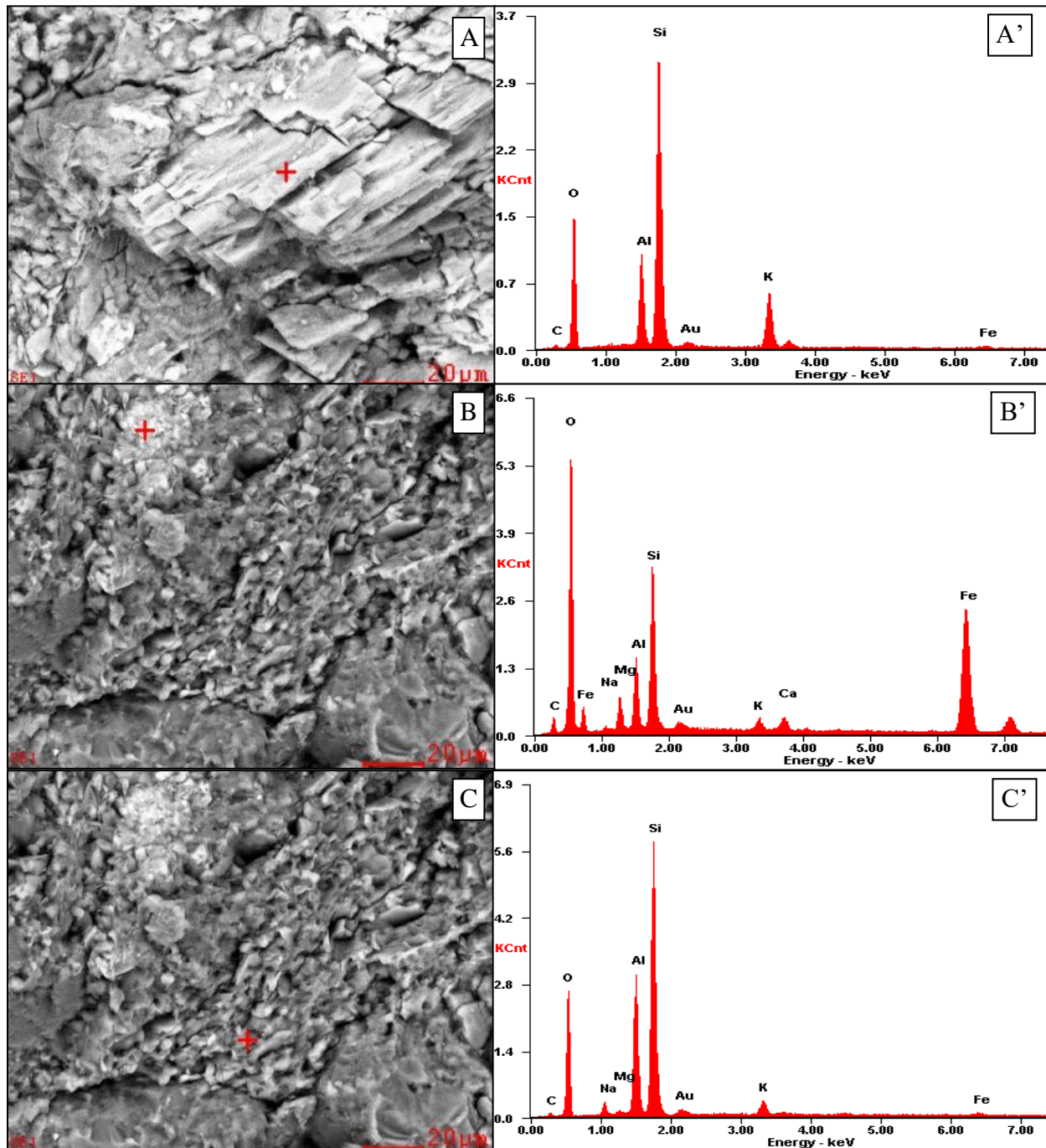


Figura 6. SEM-EDX Pozo Este. Petrofacies Sublitoarenita con contenido de feldespato potásico (A-A'). Petrofacies Litoarenita feldespática exhibiendo clorita (B-B') e illita (C-C').

6.1.2 Pozo Oeste

6.1.2.1 Petrofacies Litoarenita. Presenta porcentajes de cuarzo que varían del 19,9% al 36,4%, feldespatos del 1,6% a 7,7% mientras que los fragmentos líticos (ígneos y chert mayoritariamente,

calizas, limolitas, arcillolitas e insignificamente cuarcitas) van de 20,2% hasta 61,1%. En algunas de estas muestras se encuentran minerales accesorios como leucoxeno, pirita, circón y dúctiles como moscovita, materia orgánica e intraclastos. El contenido de matriz arenosa, limosa y arcillosa en estas rocas va del 0% a 34% y de cemento (siderita, calcita y arcilla) de 0% a 17,4%. La porosidad total varía entre 5,4% y 19,3% (siendo los mayores aportes 17,6% por disolución y 6,2% por fracturamiento) lo que corresponde a una litofacies con porosidades pobres a buenas. Texturalmente estas secciones delgadas corresponden a Arenitas, Arenitas ligeramente gravosas y Arenitas gravosas en las que prevalecen los tamaños de arena medio, grueso y muy grueso, son pobre y moderadamente sorteadas (Figura 8).

A partir del estudio de SEM-EDX se logró identificar además caolinita vermiforme y pirita en una muestra de profundidad 76775.5 pies (Figura 9), a la que también a partir del análisis DRX logró determinar que se compone 80% de cuarzo (18% cuarzo microcristalino) mientras que los feldespatos potásicos y sódicos, minerales arcillosos y carbonatos representan menos del 5% cada uno. De los minerales arcillosos 42% corresponde a caolinita, 30% a illita y menos de 5% a esmectitas (Tablas 1 y 2).

6.1.2.2 Petrofacies Litoarenita feldespática. Presenta porcentajes de cuarzo que varían del 30,6% al 45,6%, feldespatos del 8,1% a 18,9% mientras que los fragmentos líticos (ígneos y chert mayoritariamente, limolitas, arcillolitas, arenitas) van de 17,6% hasta 27,4%. En algunas de estas muestras se encuentran minerales accesorios como leucoxeno, pirita, circón, óxidos y bajo porcentaje de dúctiles como moscovita, materia orgánica e intraclastos. Todas las muestras de esta litofacies contienen matriz limo-arcillosa y arcillosa en porcentajes que oscilan de 0,3% a 9,3% mientras que el cemento (siderita, calcita y en menor medida de arcilla) oscila entre 0% y 9,3%. El total de porosidad de esta roca varía entre 8,9% y 26,2% (siendo los mayores aportes 34,7% por

disolución y 18,2% por fracturamiento), por lo que envuelve desde láminas delgadas con porosidades regulares a muy buenas. Texturalmente esta litofacies corresponde a Arenitas, Arenitas limosas y Arenitas gravosas en las cuales los tamaños de grano fino, medio y grueso prevalecen (especialmente grueso), en cuanto a selección se encuentran secciones delgadas moderadamente, moderadamente bien y bien sorteadas (Figura 8).

A través del estudio SEM-EDX llevado a cabo a una muestra de 7613.5 pies de profundidad se identificó florencita, illita y siderita (Figuras 9 y 10). A su vez, a partir del estudio DRX se conoce que esta muestra se compone 75% de cuarzo (8% cuarzo microcristalino) y que los feldespatos potásicos y sódicos, minerales arcillosos y carbonatos representan menos del 5% cada uno. Los minerales arcillosos engloban 50% caolinita, 27% illita y 10% esmectitas (Tablas 1 y 2).

6.1.3 Pozo Este vs Pozo Oeste

La figura 7 refleja como las muestras del Pozo Este son composicional y texturalmente más maduras que las del Pozo Oeste, esto coincide con que, en el mismo ambiente deposicional el contenido en fragmentos de roca aumenta con el tamaño de grano (Mack, 1978).

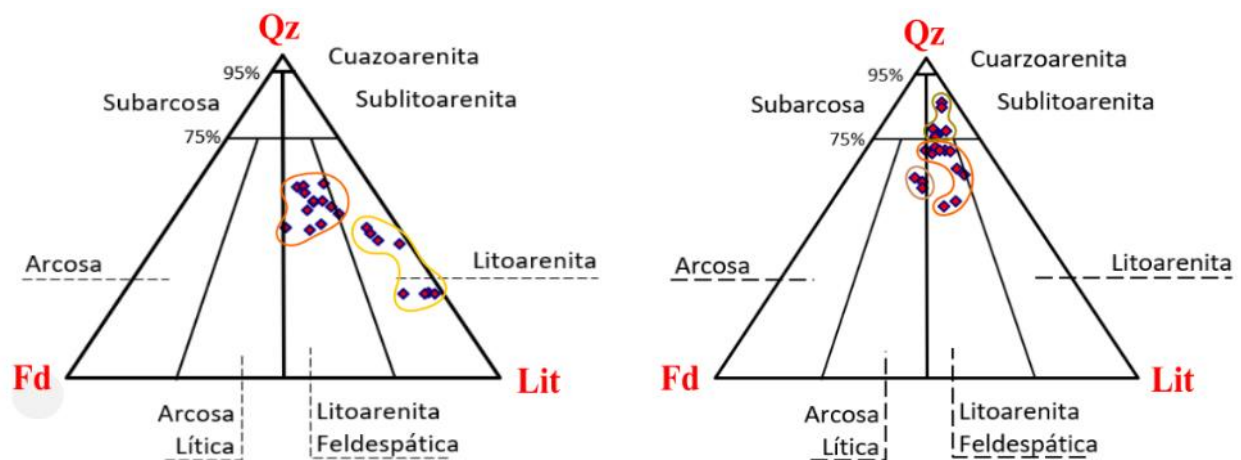


Figura 7. Distribución de las secciones delgadas analizadas en el diagrama para la clasificación composicional de areniscas (Folk *et al.*, 1970). Izquierda Pozo Oeste, derecha Pozo Este.

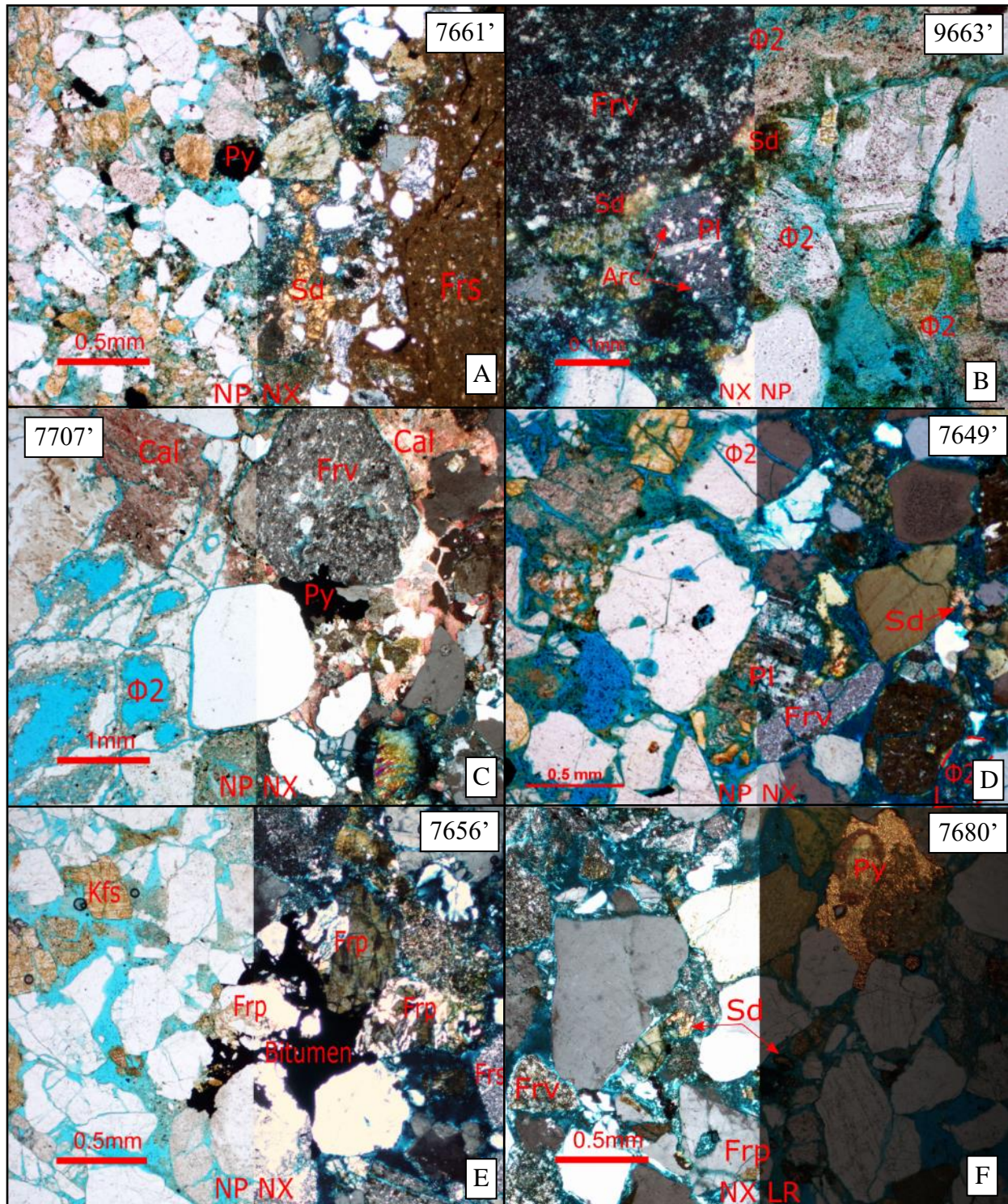


Figura 8. Petrografía Pozo Oeste. Petrofacies Litoarenita donde se observa cementación por siderita y calcita, pirita, procesos de argilización, disolución y fragmento de rocas volcánicas y sedimentarias (A, B, C). Petrofacies Litoarenita feldespática presentando cemento de siderita, bitumen, feldespatos potásicos, fragmento de rocas plutónicas, volcánicas, bitumen, procesos de disolución, piritización, argilización y fracturamiento (D, E, F).

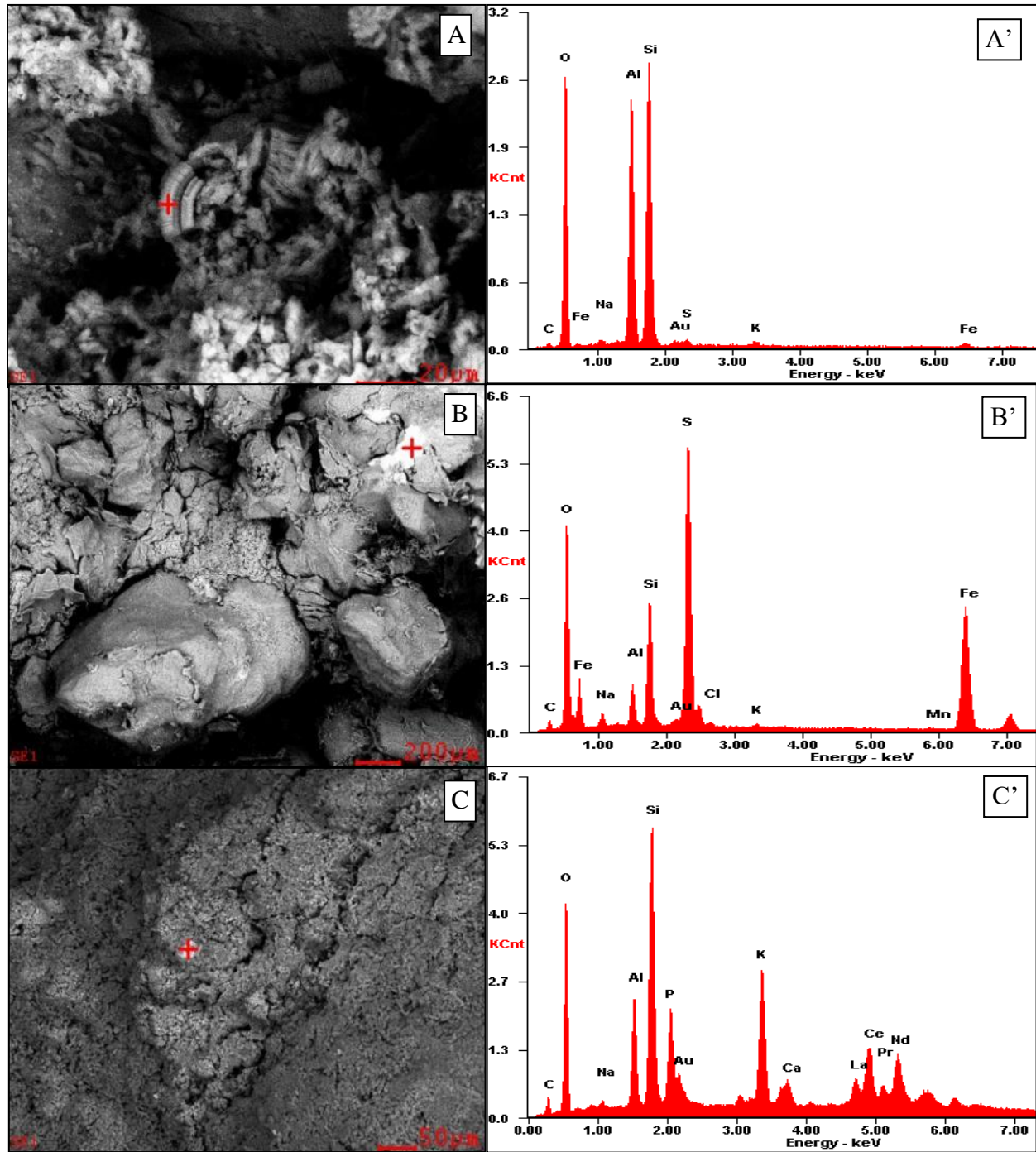


Figura 9. SEM-EDX Pozo Oeste. Petrofacies Litoarenita donde se observa caolinita vermiforme (A-A') y pirita (B-B'). Petrofacies Litoarenita feldespática con contenido florencita (C-C'), mineral que hace parte del grupo de los fosfatos.

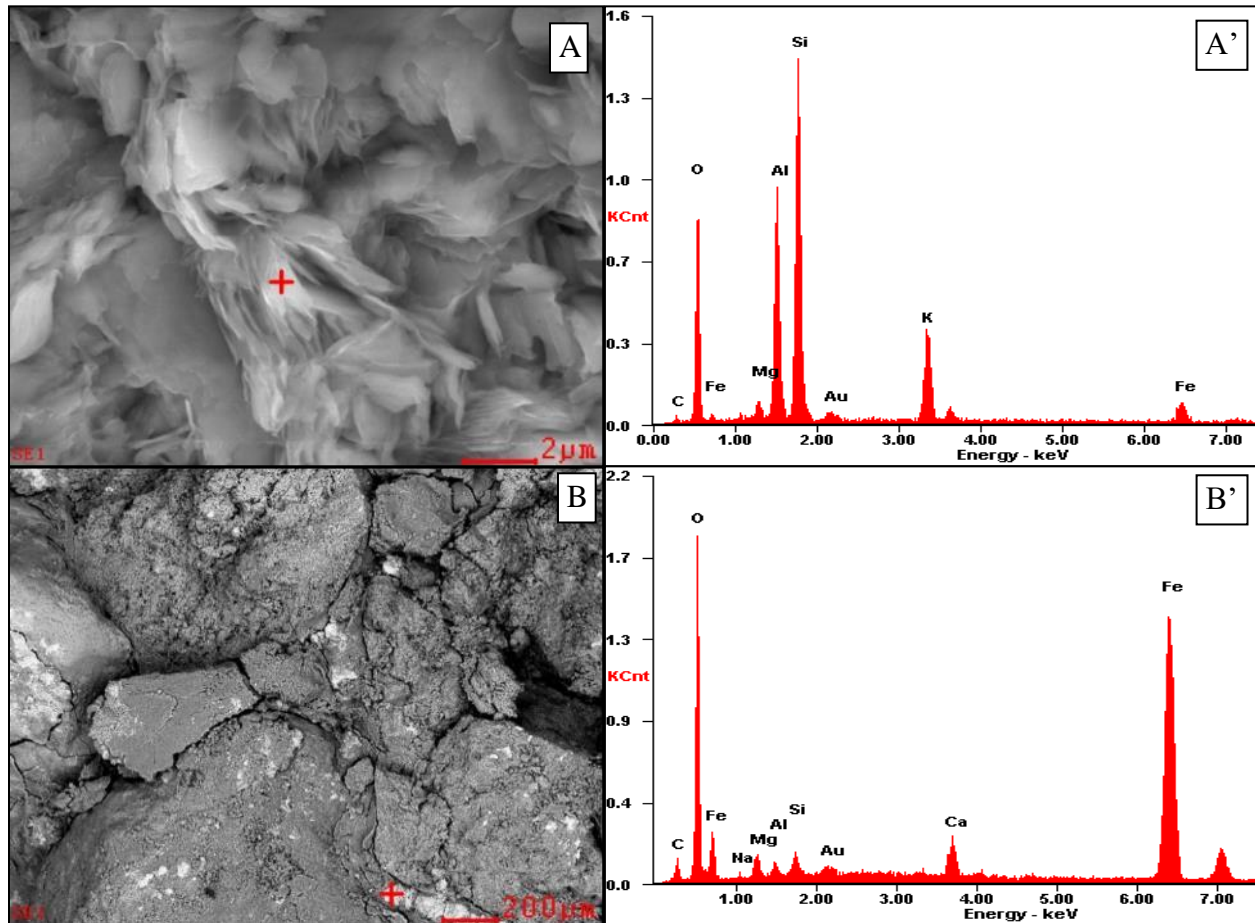


Figura 10. SEM-EDX Pozo Oeste. Petrofacies Litoarenita feldespática donde se identifica cementos del tipo illita (A-A') y siderita (B-B').

A partir de las columnas estratigráficas (Figura 13 y 14) se observa que la variación composicional de cada pozo no se presenta de forma ordenada, sin embargo, a ciertas profundidades los porcentajes de armazón, cemento y porosidad tienen a aumentar o disminuir mostrando patrones descritos en las conclusiones de este proyecto.

El análisis mineralógico por DRX muestra que las rocas analizadas presentan principalmente mineralogía cuarzosa (contenidos de cuarzo entre el 71% y 85%). Entre los minerales minoritarios (<5%) se encuentran feldespatos, carbonatos y minerales arcillosos, no obstante, en las petrofacies Arcosa lítica y Litoarenita feldespática del Pozo Este los minerales arcillosos alcanzan contenidos

de 9% y 12% respectivamente (Tabla 1). En los perfiles mineralógicos de las fracciones menores de 2 micras (Figuras 11 y 12) podemos observar que los minerales arcillosos predominantes corresponden a caolinita (35-61%) e illita (15-50%) y de manera escasa y puntual clorita y esmectita (Tabla 2).

Tabla 1

Concentración relativa a nivel de bulk, roca total a partir de DRX.

Descripción	Min. arcillosos	Cuarzo	Feldespato K	Feldespato Na	Carbonatos	Otros
	%	%	%	%	%	%
Pozo Oeste Litoarenita feldespática	<5	75	<5	<5	<5	5
Pozo Oeste Litoarenita	<5	80	<5	<5	Tr	5
Pozo Este Sublitoarenita	<5	85	<5	ND	Tr	5
Pozo Este Arcosa lítica	9	71	<5	<5	<5	5
Pozo Este Litoarenita feldespática	12	73	<5	<5	ND	5

Nota. En ‘Otros’ se incluyen compuestos que se encuentran en bajos contenidos o de baja cristalinidad y que no fueron identificados con claridad, ND: No detectado, Tr: < 0.5%. Realizado por Ecopetrol S.A. (2018)

Tabla 2.

Concentración relativa a nivel de la fracción menor de 2 micras a partir de DRX.

Descripción	Minerales arcillosos				Cuarzo micro. Feld. Micro.	
	Esmectita	Clorita	Illita	Caolinita		
	%	%	%	%	%	%
Pozo Oeste Litoarenita feldespática	10	ND	27	50	8	< 5
Pozo Oeste Litoarenita	< 5	ND	30	42	18	5
Pozo Este Sublitoarenita	< 5	< 5	15	61	9	< 5
Pozo Este Arcosa lítica	ND	ND	30	60	5	< 5
Pozo Este Litoarenita feldespática	ND	< 5	50	35	5	< 5

Nota. ND: No detectado. Realizado por Ecopetrol S.A. (2018).

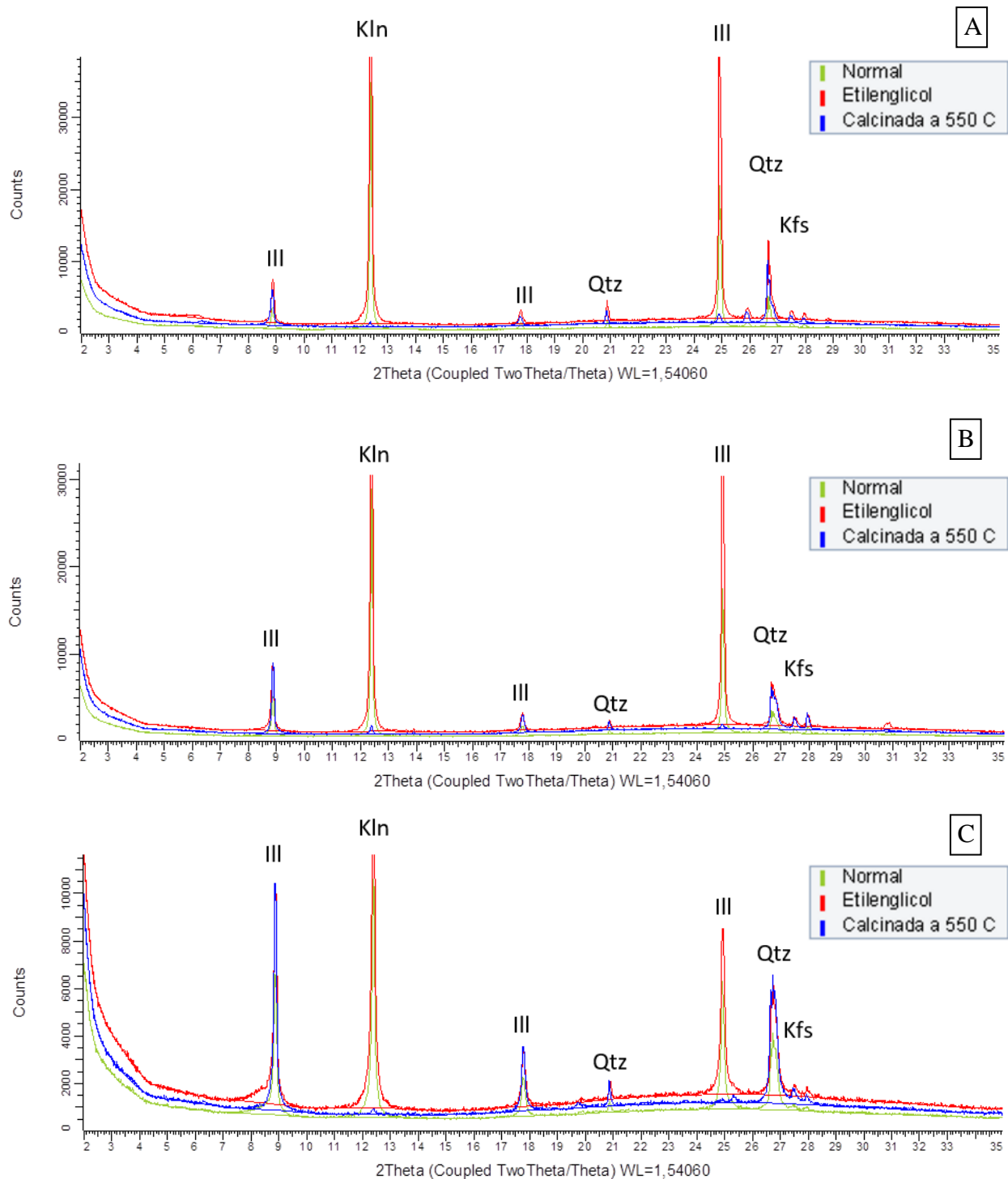


Figura 11. Difractogramas de la fracción menor a 2 micras a partir de DRX del Pozo Este. Petrofacies Sublitoarenita (A), Petrofacies Arcosa lítica (B), Petrofacies Litoarenita feldespática (C)

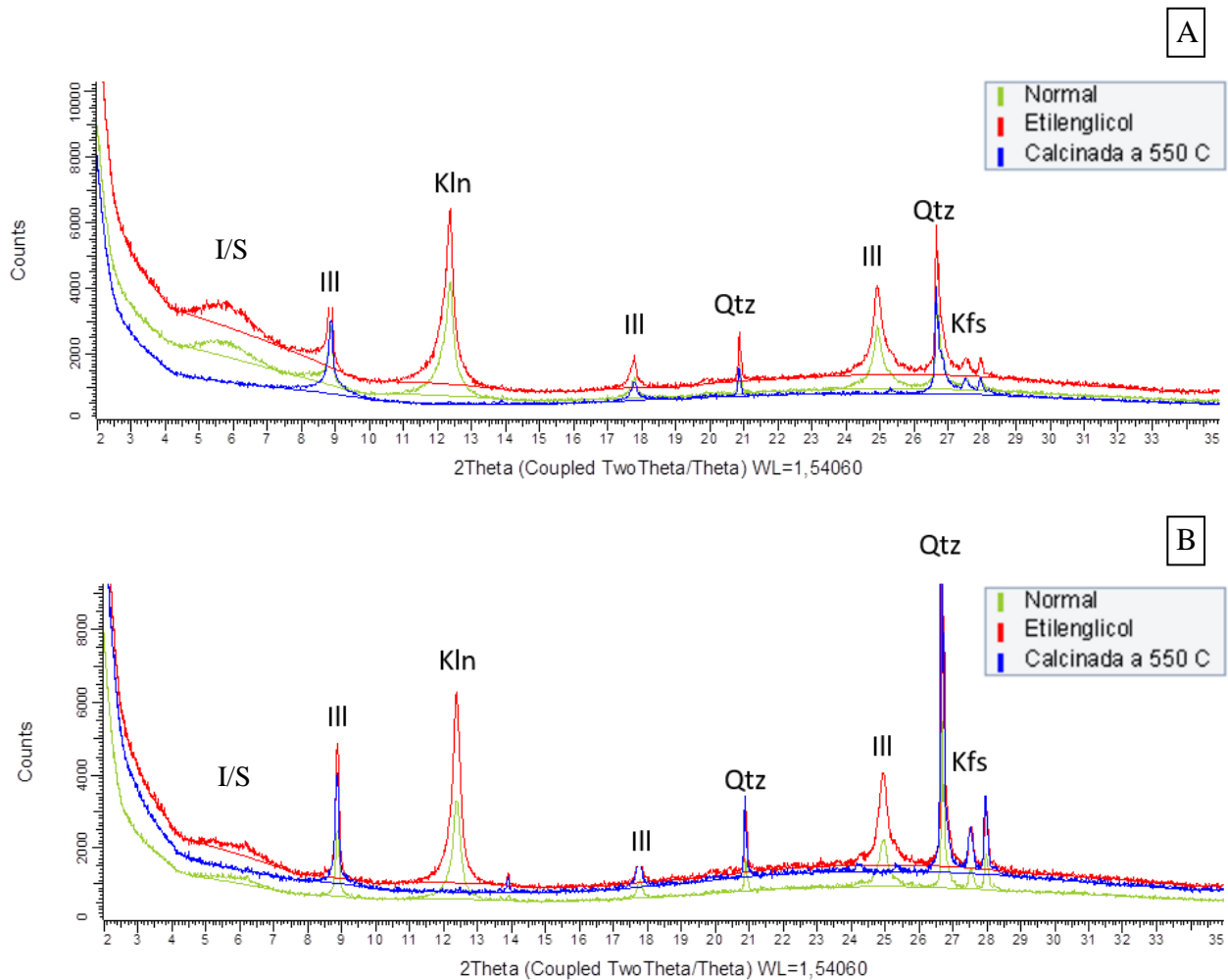


Figura 12. Difractogramas de la fracción menor a 2 micras a partir de DRX del Pozo Oeste. Petrofacies Litoarenita feldespática (A) y petrofacies Litoarenita (B).

6.2 Sucesión de eventos diagenéticos

Se identificaron los eventos físicos y químicos que participaron en la diagénesis de la Formación La Paz ubicándolos en los diferentes estadios diagenéticos utilizando para ello la información obtenida de diversos autores. En cuanto al fracturamiento y la migración de hidrocarburo, aunque no constituyen en sí un proceso diagenético, se les incluyó dentro de la paragénesis debido a su importancia en la definición de la calidad de la roca como reservorio de hidrocarburos (Figura 19).

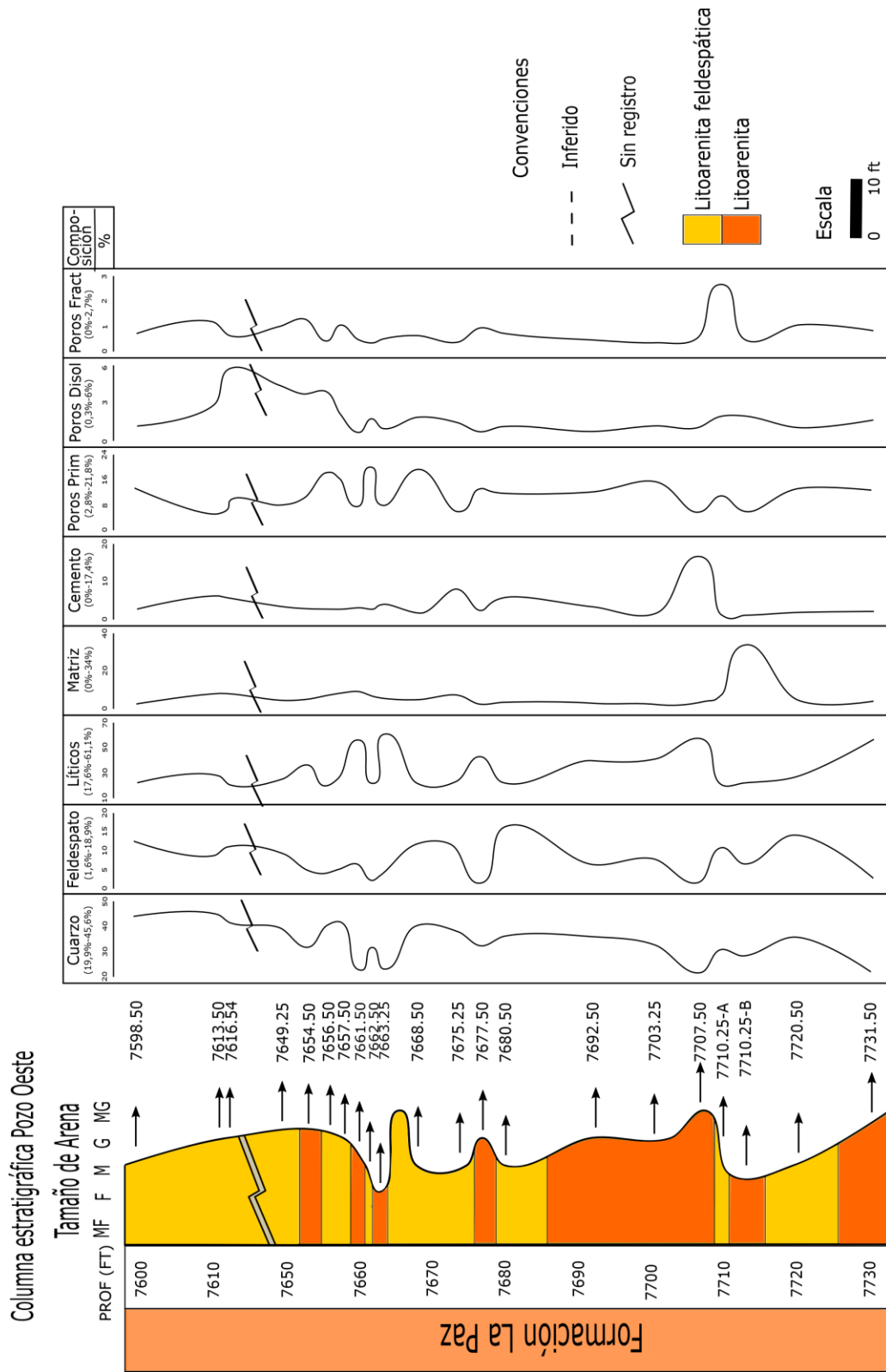


Figura 13. Columna estratigráfica del Pozo Oeste de la Formación La Paz mostrando la variación de sus componentes en toda la sección.

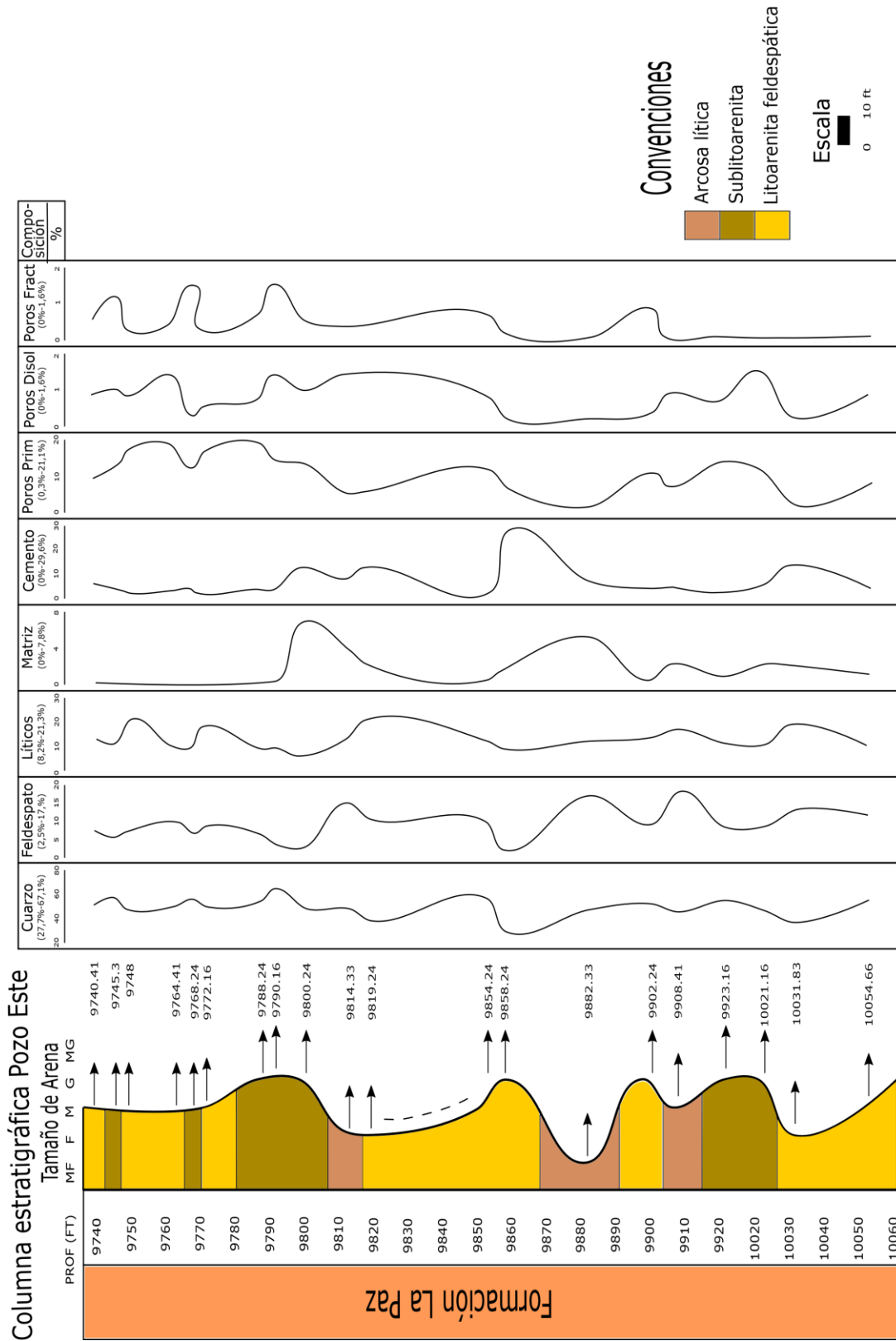


Figura 14. Columna estratigráfica del Pozo Este de la Formación La Paz mostrando la variación de sus componentes en toda la sección.

6.2.1 Compactación. Este proceso se produjo desde que los sedimentos fueron depositados en la Cuenca VMM a través de un medio fluvial. La presión litostática dada por la carga sedimentaria que aumentó con el soterramiento produjo la disminución del volumen del sedimento debido a la reducción del espacio entre estos, modificando las características texturales de la roca a su vez que ocasionaba las primeras fracturas en los granos. Ligado a esto, los minerales y clastos más blandos como las moscovitas y los fragmentos esquistosos se deformaron dúctilmente acomodándose al contorno de los granos más duros (Figura 15).

6.2.3 Fracturamiento. Cuando el esfuerzo originado por la presión confinante o geodinámica sobrepasó la resistencia nominal estos se rompieron, evidenciándose especialmente en cuarzos y feldespatos (Figura 15).

6.2.4 Cementación. Minerales arcillosos (caolinita, illita, esmectita y clorita), siderita, calcita, y barita se formaron autigénicamente debido a su precipitación directa de las soluciones intersticiales en los espacios porosos (Figura 16).

6.2.5 Disolución. Feldespatos potásicos y plagioclasas, fragmentos de rocas volcánicas e intraclastos fueron inestables a las nuevas condiciones físicoquímicas que produjo el soterramiento, disolviéndose parcial o totalmente (Figura 17).

6.2.6 Alteración. Procesos de argilización de feldespatos y fragmentos de rocas y piritización de materia orgánica son encontrados en las secciones delgadas analizadas, estos procesos consistieron en reacciones en las que se dio una disolución parcial y selectiva del sólido ocurriendo que el material no disuelto cambió su composición, bien sea porque parte de sus componentes se disolvió o porque la relación de estos varió cambiando su fórmula química. En cuanto a la argilización, este evento no se incluyó dentro de la paragénesis debido a que con la información obtenida no es posible ubicarlo en un estadio específico (Figura 17).

6.2.7 Migración de hidrocarburo. Cuando el hidrocarburo migró de la roca generadora a la Formación La Paz no todo fluyó continuamente, sino que la parte más viscosa (bitumen) se quedó impregnada en las rocas (Figura 18).

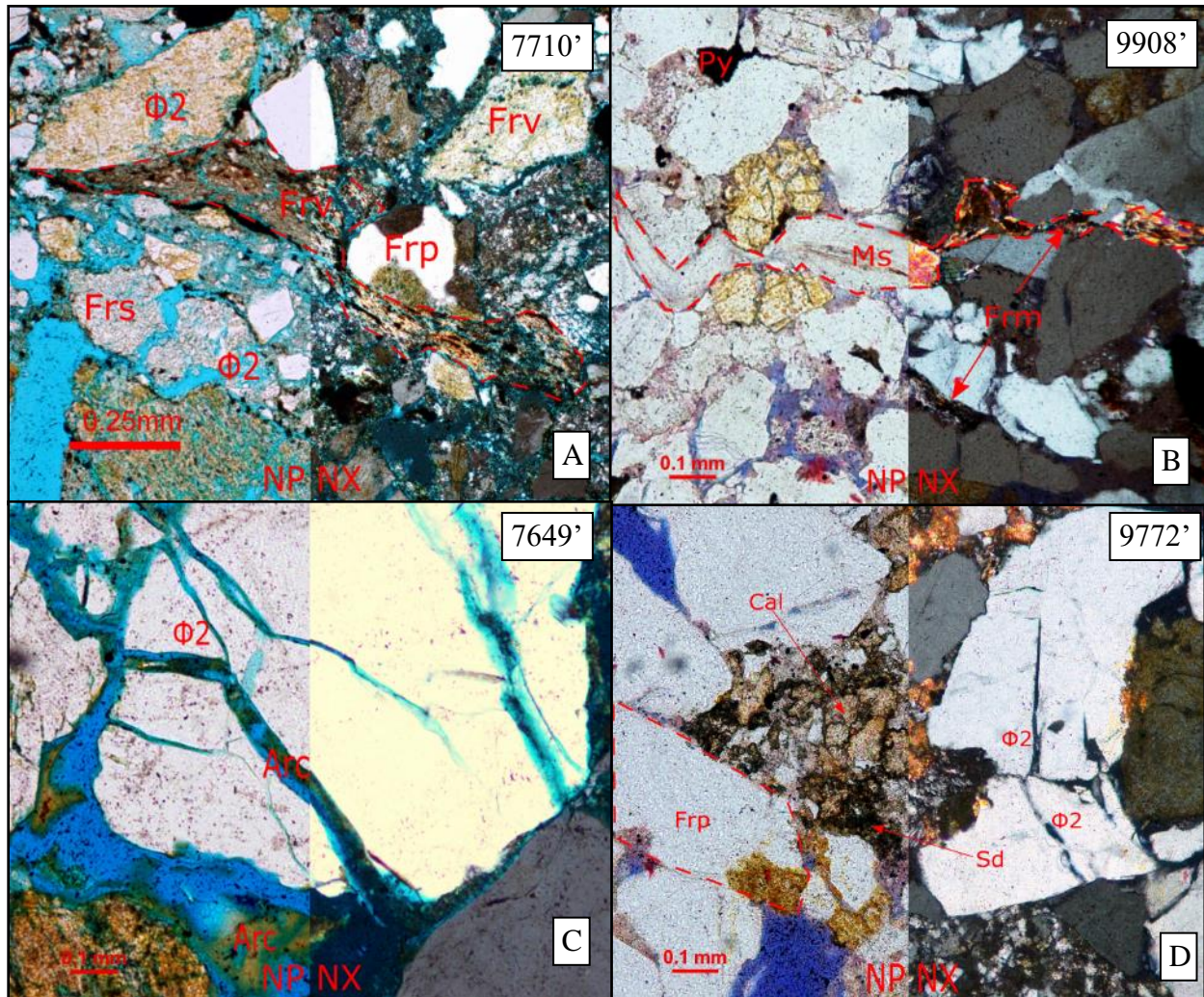


Figura 15. Compactación (A-B) y fracturamiento (C-D). A izquierda Pozo Oeste y a derecha Pozo Este.

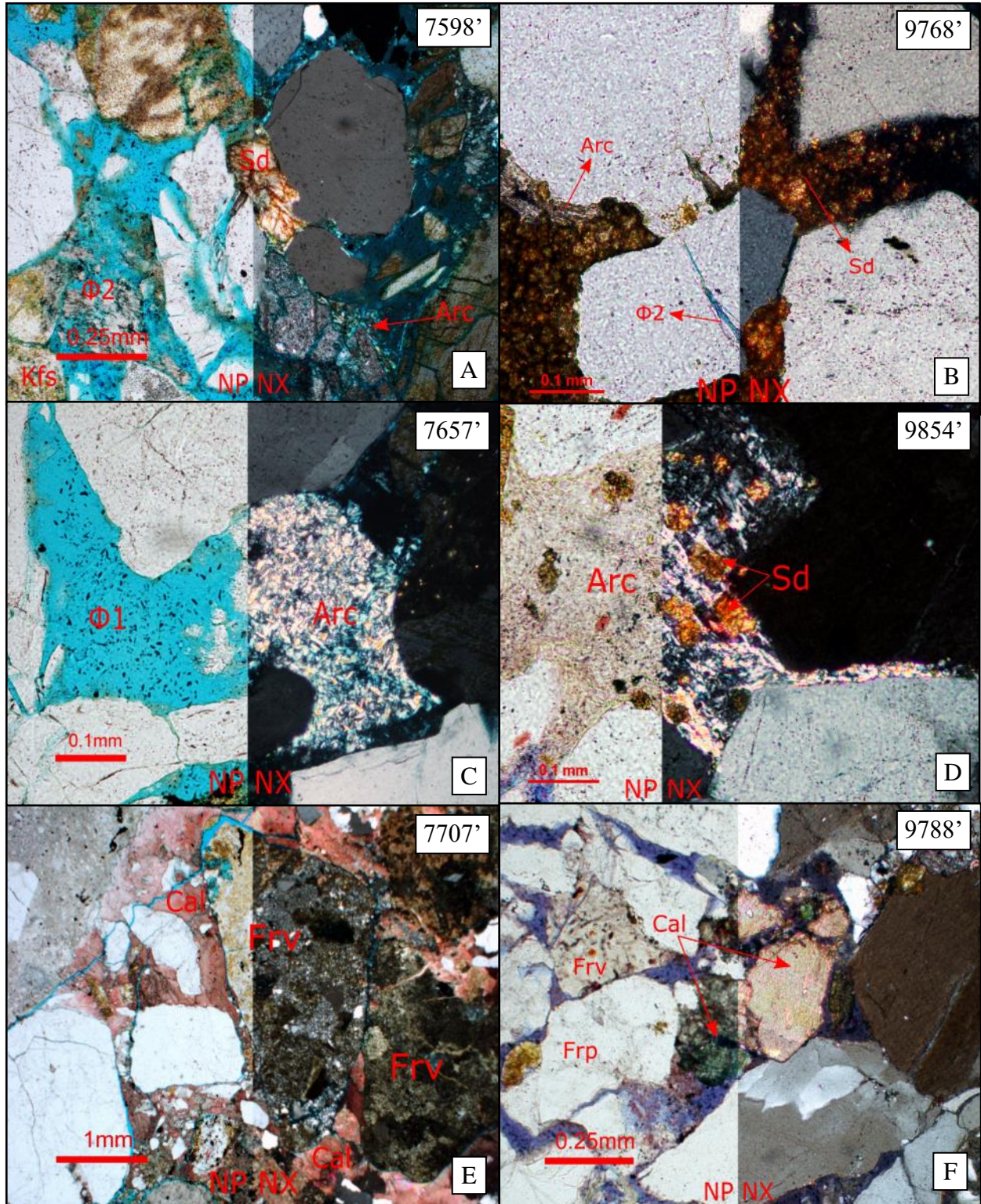


Figura 16. Cementación de: siderita (A-B), arcillas (C-D) y calcita (E-F). A izquierda Pozo Oeste y a derecha Pozo Este.

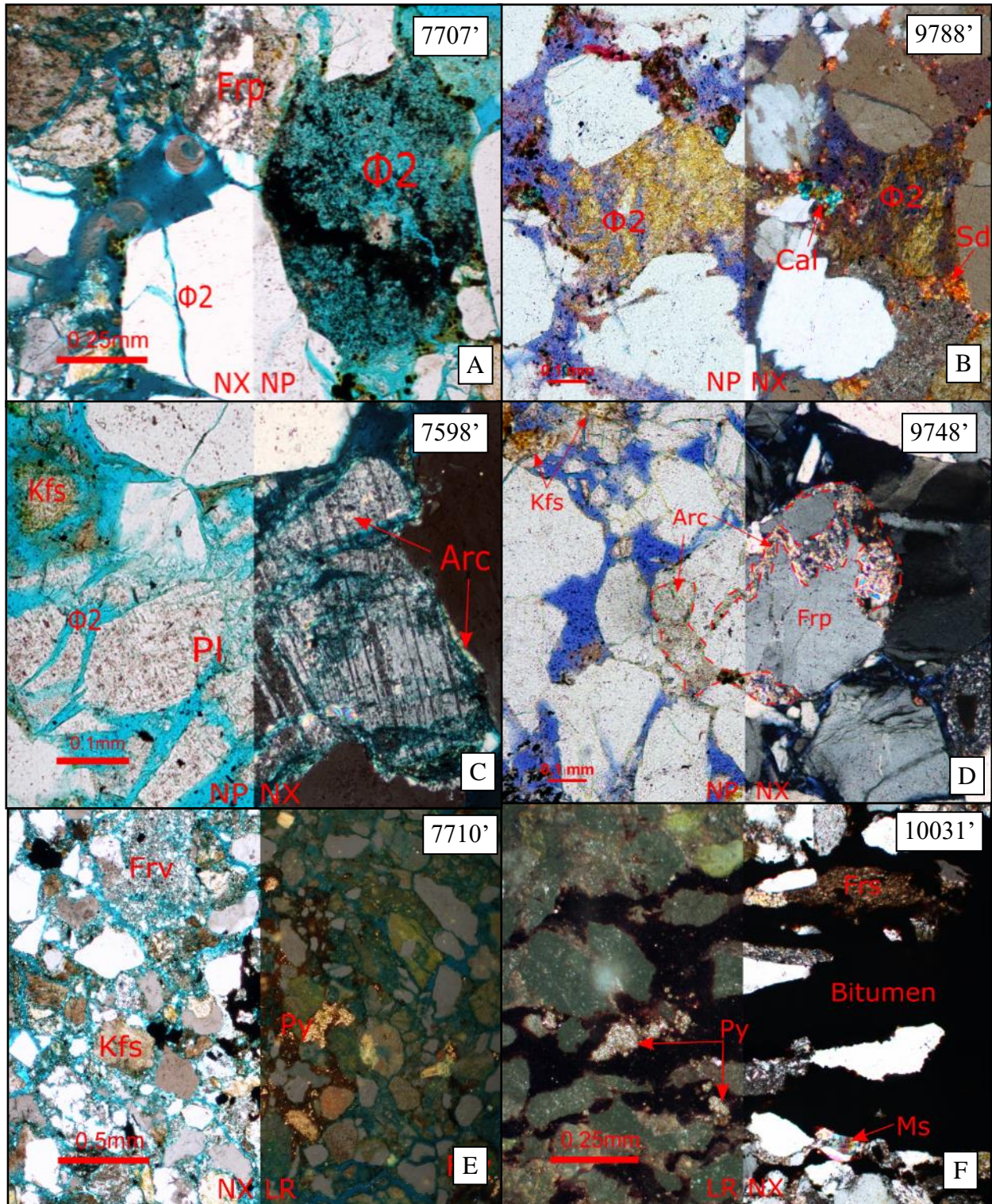


Figura 17. Disolución (A-B) y alteración: argilización (C-D) y piritización (E-F). A izquierda Pozo Oeste y a derecha Pozo Este.

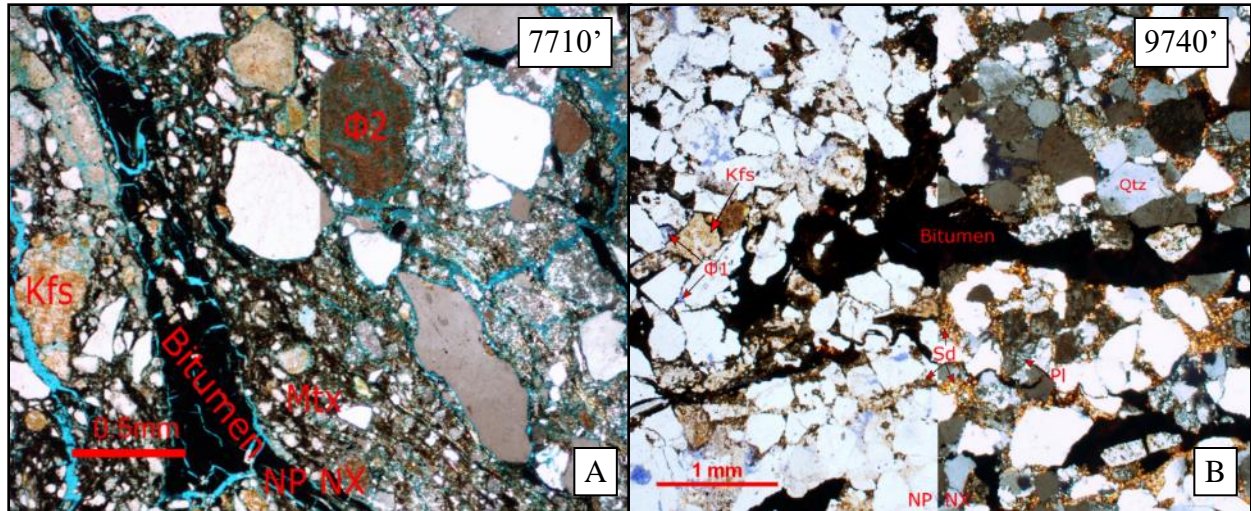


Figura 18. Migración de hidrocarburos (A-B). A izquierda Pozo Oeste y a derecha Pozo Este.

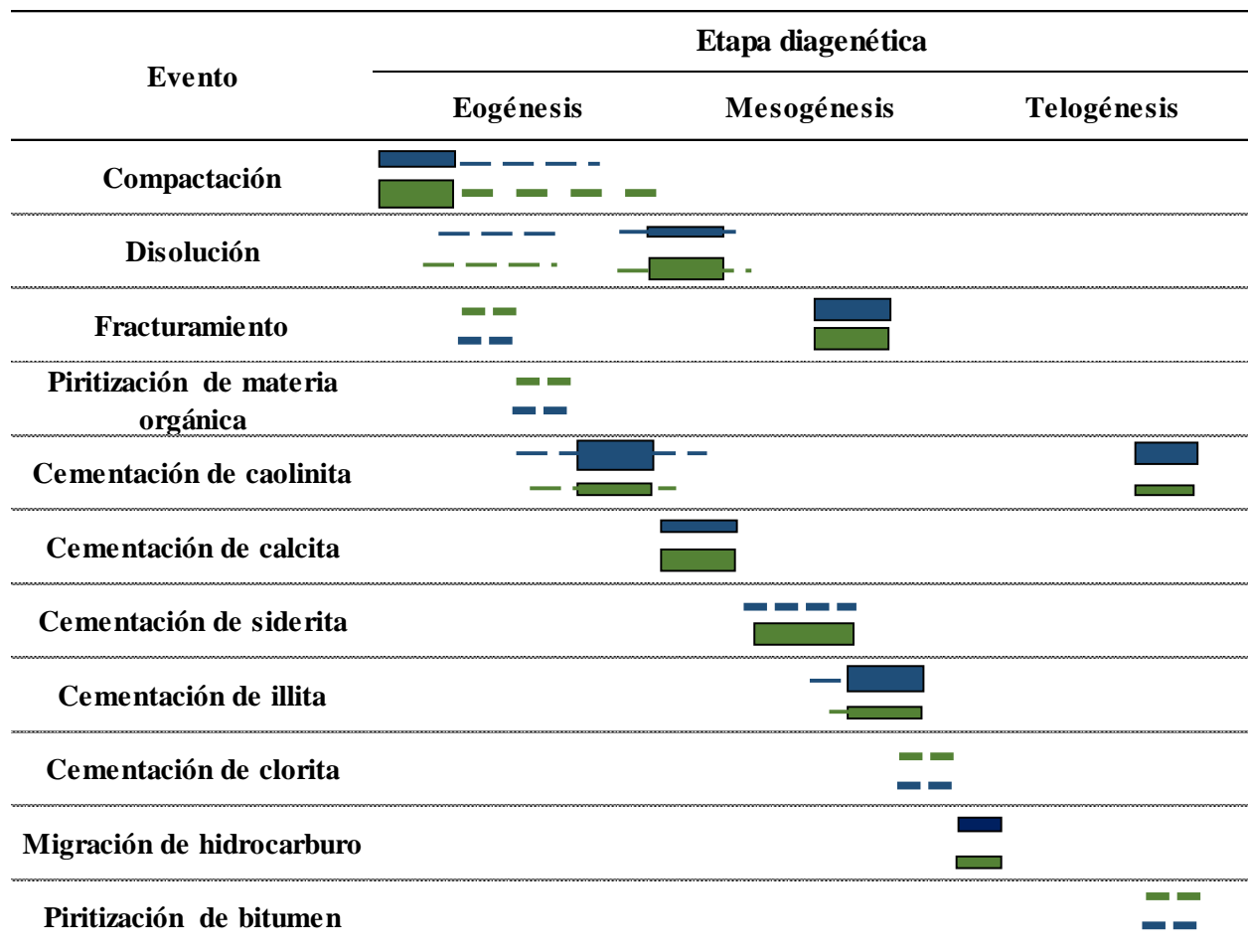


Figura 19. Diagrama expresando la secuencia de los eventos diagenéticos para la Formación La Paz en los pozos Oeste ■ y Este ■

6.3 Control de los eventos diagenéticos sobre la calidad del reservorio

El potencial de una arenisca para almacenar y producir hidrocarburos está estrechamente relacionado con los eventos que le dieron origen ya que cada uno de estos tiene implicaciones tanto en la porosidad como en la permeabilidad de la roca, factores que regulan la calidad de los reservorios (Sandoval, 2000). La Tabla 3 resume el impacto que cada evento parte de la diagénesis de la Formación La Paz tuvo en su calidad como roca reservorio. Nótese que son más los eventos que reducen la porosidad que aquellos responsables de formar porosidad secundaria y aumentar posiblemente la permeabilidad.

Tabla 3.

Eventos diagenéticos y su impacto en la calidad como roca reservorio de la Formación La Paz.

Evento	Impacto en la calidad del reservorio
Compactación	Reducción de la porosidad y la permeabilidad de manera irreversible
Fracturamiento	Aumento de la porosidad y posible aumento de la permeabilidad
Cementación	Reducción de la porosidad y la permeabilidad
Disolución	Aumento de la porosidad y posible aumento de la permeabilidad
Alteración	Reducción de la permeabilidad en el caso de la alteración a arcillas
Migración de hidrocarburo	Reducción de la porosidad y la permeabilidad

7. Discusión

Originariamente la Formación La Paz (eoceno tardío - medio) comprendía los bancos masivos de arenisca que afloran en la garganta del río Sogamoso y en la Serranía de La Paz, después fue redefinida por Wheeler (1935) en su publicación *Tertiary stratigraphy of the Middle Magdalena Valley* en el que define el Grupo Chorro conformado por las Formaciones La Paz (base) y Esmeraldas (tope). Una nueva definición en 1958 hecha por Morales (*General Geology and Oil occurrences of Middle Magdalena Valley, Colombia*) delimita en su base el Miembro Toro, formado por lutitas arenosas (como se citó en Porta, 1974). A su vez, Rodríguez y Remolina (1970) determinaron dos niveles con diferentes tamaños medios de grano: un nivel superior donde predomina el grano grueso y uno inferior donde se observan grandes bancos de arcilla con intercalaciones de arenisca. Las secciones delgadas de la Formación La Paz pertenecientes a los pozos Oeste y Este corresponden texturalmente a Arenitas, lo que sugiere una ubicación más hacia el tope de la formación que hacia su base ya que los núcleos de los pozos no corazonaron el contacto con el miembro o formación infrayacente.

Con nuevas técnicas de correlación aplicadas a sedimentos clásticos, Mora (2009) determinó en el área del sinclinal de Nuevo Mundo (VMM) 5 zonas para la Formación La Paz ordenadas de base a tope; la Zona 1 es principalmente arenosa, los líticos sedimentarios, metamórficos y volcánicos se presentan en proporciones relativamente iguales (38%, 32% y 26%), la mineralogía de arcillas se caracteriza por un alto contenido de esmectita (35%) y la desaparición de interstratificados illita-esmectita, la Zona 2 predominantemente arenosa, caracterizada por un descenso en el contenido de líticos donde predominan los de origen volcánico y metamórfico y

disminuye el contenido de chert (a un 4%) y esmectita pero aumenta la presencia de arcillas estratificadas corresponde a las petrofacies definidas para el Pozo Este de este trabajo.

Por su parte la Zona 3, igualmente arenosa, está marcada por un notorio aumento de líticos, principalmente sedimentarios, acompañados por volcánicos y contenidos importantes de fragmentos líticos plutónicos sin que composicionalmente difiera en gran medida de la zona 2, excepto por un moderado aumento de clorita, illita, arcillas interestratificadas y una disminución de caolinita, corresponde a las petrofacies identificadas del Pozo Oeste. La zona 4 es de carácter fino granular con intercalaciones arenosas, presenta composiciones modales similares a las de la zona 2 con bajo contenido de líticos, sin embargo se diferencia en que su contenido de feldespato es nulo, la mineralogía de arcillas refleja una disminución o ausencia de clorita respecto a la zona infrayacente. La zona 5 tiene un carácter marcadamente arenoso, difiere de la zona 4 al presentarse subordinadas concentraciones de feldespato, el porcentaje de líticos es mayoritariamente metamórfico acompañada de proporciones iguales de detritos volcánicos y plutónicos, esta zona se caracteriza por el aumento de clorita y la disminución de arcillas interestratificadas con respecto a la zona infrayacente.

Estudios químicos del estudio realizado por Mora (2009) señalan que la zona 2 tiene una tendencia hacia rocas fuente félsicas con evidencias de alta meteorización química, sugiriendo que el origen de estos sedimentos es debido a cambios climáticos que produce la desintegración de los detritos más inestables, mientras que la zona 3 marca un cambio en el origen de los sedimentos al disminuir su madurez, aumentando el contenido lítico (especialmente sedimentario y magmático) y químicamente generando una afinidad hacia rocas fuentes granodioríticas. Con base en esto, se plantea que el aporte volcanoclástico proviene del arco magmático de la Cordillera Central, mientras que el aporte sedimentario y metamórfico fueron erosionados de la Cordillera Oriental.

Las características texturales muestran una marcada disminución en el tamaño de grano y aumento en la selección de oeste a este, sugiriendo un patrón de transporte en esta dirección, lo cual coincide con lo obtenido en este trabajo (Figura 7).

En relación con los eventos diagenéticos, en ambientes continentales como en el que se depositó la Formación La Paz (ambiente fluvial), durante la eogénesis reacciones que favorecen la precipitación autigénica y el reemplazamiento parcial de lúlicos y silicatos pueden llevar a procesos que disminuyen la calidad de las rocas reservorios en los que se encuentran la formación de calcita y argilominerales, en contraparte la disolución de minerales inestables como los feldespatos y los fragmentos de rocas es responsable de la creación de porosidades secundarias en areniscas, este proceso, sin embargo, aumenta de intensidad durante la mesogénesis entre los 2 y 3 km de profundidad. Durante la diagénesis media o mesogénesis las elevadas temperaturas agregan energía al sistema incrementando la tasa de reacciones, favoreciendo la formación de minerales menos hídricos y más densos, por ejemplo, en condiciones superficiales el catión Fe^{2+} permanece hidratado, lo que impide su reacción con el ion bicarbonato. Una vez aumenta la temperatura y la presión, este se deshidrata y el carbonato de hierro (siderita) puede precipitar en aguas porales saturadas cuando su solubilidad decrece (Boggs, Petrology of sedimentary rocks, 2009)

La cementación de calcita por su parte puede ocurrir en todas las etapas de la diagénesis. Los iones bicarbonato pueden surgir por la disolución de limolitas y dolomías, los iones Ca y Fe son aportados por reacciones con silicatos con la conversión de esmectita a illita y la disolución de feldespatos cálcicos y minerales ferromagnesianos presentes en rocas máficas volcánicas. Esta cementación puede ser muy heterogénea, como se puede observar en la muestra 7707.5' del Pozo Oeste, que en pocos metros pasa de rocas pobre a completamente cementadas. Este escenario puede ser debido a la precipitación desigual o a la remoción parcial del cemento, para el pozo

estudiado no se evidencia disolución de calcita, lo que hace más probable la primera explicación (Boggs, Petrology of sedimentary rocks, 2009).

En relación con la ocurrencia de argilominerales, la caolinita derivada de feldespatos y precipitada en poros acuosos es formada durante la eogénesis y la telogénesis debido a que este mineral solo se forma a temperaturas menores de 25 C (Boggs, 1987), por otra parte, la illita y la clorita derivadas de caolinita se forman durante la mesogénesis debido a reacciones de sustitución en las que participan cationes de K^+ , Mg^{2+} , Fe^{2+} y Fe^{3+} (Sandoval, 2000).

8. Conclusiones

Para la Formación La Paz (VMM), el Pozo Oeste presenta las petrofacies Litoarenita feldespática y Litoarenita, mientras que del Pozo Este hacen parte las petrofacies Sublitoarenita, Arcosa lítica y Litoarenita feldespática, las cuales son composicional y texturalmente más maduras que las del Pozo Oeste. La variación de petrofacies en los pozos Oeste y Este tiende a ser cíclica, a su vez, la variación de petrofacies, de espesores y de tamaño de grano entre los dos pozos es grande.

Los eventos diagenéticos que dieron lugar a la Formación La Paz en los pozos Oeste y Este fueron: compactación (deformación de moscovitas y fragmento de roca metamórfica y fracturamiento de cuarzos y feldespatos, especialmente), cementación de siderita, calcita, arcillas (illita, caolinita, clorita, esmectita) y en proporciones casi nulas barita, disolución (especialmente de líticos volcánicos y feldespatos), alteración (argilización de feldespatos y fragmentos volcánicos y piritización de materia orgánica) y aunque no se considere un evento diagenético es preciso nombrar la migración de hidrocarburo (impregnación de bitumen).

Los procesos diagenéticos que mejoraron la calidad de las rocas de los pozos Oeste y Este fueron el fracturamiento de los granos del armazón y la disolución mientras que los procesos que tuvieron un efecto contrario fueron la compactación, la cementación, la alteración a minerales de arcilla (argilización) y la migración de hidrocarburo (cemento bituminoso).

De la columna estratigráfica del Pozo Oeste se puede observar que el intervalo donde más hubo procesos de disolución fue entre los 7610 y los 7650 pies, mientras que el mayor fracturamiento ocurrió entre los 7707 y 7710 pies, estos procesos ocurrieron de manera asincrónica e inversa, es decir cuando uno aumentaba el otro disminuía. Por otra parte, en este pozo se presenta un patrón de oscilación en el contenido de cuarzo, feldespatos, líticos y porosidad primaria entre los 7650 y 7680 pies y 7700 y 7720 pies, los cuales coinciden con los cambios de petrofacies y señalan un cambio rápido en la depositación. A su vez, la cementación tuvo una fuerte presencia a una profundidad de 7707 pies debido a la precipitación anormal de calcita, la cuál alcanzó porcentajes de 17%.

De la columna estratigráfica del Pozo Este se concluye que los procesos de fracturamiento y disolución ocurrieron simultáneamente, coincidiendo también con la variación en la porosidad primaria. Del mismo modo se puede relacionar el contenido de matriz con la precipitación de cemento en este pozo.

Del promedio aritmético del conteo de puntos realizado en el Pozo Este se obtiene que la muestra más cementada pertenece a la petrofacies Litoarenita feldespática y contiene 29,6% de cemento; a su vez 5,7% de este pozo constituye cemento del cuál 73,3% corresponde a siderita, 24,5% a calcita y 2,2% a arcillas. Por su parte, en el pozo Oeste, la sección delgada más cementada contiene 17,4% de cemento y hace parte de la petrofacies Litoarenita; 3,6% de este pozo corresponde a minerales cementantes, de los que 45,3% son arcillas, 29,8% siderita y 24,9%

calcita. A través de esto, se concluye que la cementación fue mayor en el pozo Este que en el pozo Oeste, siendo la siderita y los minerales arcillosos los minerales cementantes más comunes en cada pozo.

En el Pozo Este, la muestra más porosa hace parte de la petrofacies Sublitoarenita con 22,4% de poros, en total, este pozo contiene 13,4% de espacios porosos de los cuales 6,4% se deben a disolución y 3,5% a fracturamiento. Por su parte, la sección delgada con mayor porosidad del Pozo Oeste pertenece a la petrofacies Litoarenita feldespática y contiene 26,2% de poros, en general, el 15,3% del volumen de este pozo corresponde a espacios porosos, siendo 12,6% debido a procesos de disolución y 3,9% a fracturamiento. De estos datos se concluye que los procesos de disolución y fracturamiento generadores de porosidad secundaria fueron mayores en el Pozo Oeste.

Las muestras del Pozo Oeste alcanzan valores máximos de 34,7% de porosidad debido a disolución y 18,2% debido al fracturamiento en cuanto los del Pozo Este son 21,3% debido a disolución y 9,9% fracturamiento. Este resultado afirma el importante control que la porosidad secundaria y los eventos que la produjeron tienen en la calidad de la Formación La Paz, especialmente en las rocas del Pozo Oeste.

9. Recomendaciones

Realizar nuevos estudios petrográficos a muestras de pozo y de afloramiento de la Formación La Paz en la Cuenca del Valle Medio del Magdalena con el fin de aumentar el conocimiento que se tiene sobre este importante reservorio de Hidrocarburos.

Comparar la petrografía de las muestras de núcleos de la Formación La Paz con aquella que se ha obtenido a partir de muestras de afloramiento con el fin de evaluar a profundidad el impacto de los eventos diagenéticos en su calidad como rocas reservorios.

Referencias bibliográficas

- Agencia Nacional de Hidrocarburos. (2011). *Middle Magdalena Basin* (Vol. 11). (F. Cediél, Ed.)
Medellín: Impresos El Día.
- Agencia Nacional de Hidrocarburos. (2012). *Cuenca del Valle Medio del Magdalena*. Bogotá.
- Boggs, S. (1987). *Principles of sedimentology and stratigraphy* (5 ed.). New Jersey: Pearson Education.
- Boggs, S. (2009). *Petrology of sedimentary rocks* (2 ed.). New York: Cambridge University.
- Donaldson, y Tiab. (2012). *Petrophysics Theory and Practice of Measuring Reservoir Rock and Fluid Transport Properties*. Oxford.
- Etayo, F., Caceres , C., y Cediél, F. (2003). *Maps of Sedimentary Facies and tectonic Setting of Colombia through the Proterozoic and Phanerozoic*. Bogotá: Ingeominas.
- Etayo, Renzoni, y Barrero. (1969). *Contornos Sucesivos del mar Cretaceo en Colombia*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Folk, R. (1974). *Petrology of Sedimentary Rocks*. Texas: Hemphill Publishing Company.
- Folk, R. L. (1954). The Distinction between Grain Size and Mineral Composition in Sedimentary-Rock Nomenclature. En *The Journal of Geology* (Vol. 62, págs. 344-359). Chicago: University of Chicago.
- Folk, R. L., Andrews, P. B., y Lewis, D. B. (1970). Detrital sedimentary rock classification and nomenclature for use in New Zealand. En *New Zealand Journal of Geology and Geophysics* (Vol. 13, págs. 937-968). Taylor and Francis.

- Mack, G. H. (1978). The survivability of labile light-mineral grains in fluvial, aeolian and littoral marine environments: The Permian Citler and Cedar Mesa Formation, Moab, Utah. En IAS, *Sedimentology* (Vol. 25, págs. 587-604).
- Milliken, K. (2003). Late Diagenesis and mass transfer in sandstones - shales sequences. En S. J.E., y Mackenzie (Ed.), *Sediments, diagenesis and sedimental rocks* (págs. 161-165). Oxford: Elsevier-Pergamon.
- Mora. (2009). Implementación y evaluación de nuevas técnicas de correlación en sedimentos clásticos continentales caso del sinclinal de Nuevo Mundo, Valle Medio del Magdalena. En Ecopetrol-ICP, *Nuevas técnicas de correlación aplicadas en sedimentos clásticos* (págs. 58-63).
- Mora. (2009). Procedencia de sedimentos del intervalo Paleoceno-Eoceno en el sinclinal del Nuevo Mundo, VMM - Implicaciones en la evolución e historia de deformación de la cuenca. En Ecopetrol-ICP, *Nuevas técnicas de correlación aplicadas en sedimentos clásticos* (págs. 20-23).
- Morales, L. G., Podesta, D. J., y Hatfield, W. C. (1958). *General geology and oil recurrences of Middle Magdalena Valley, Colombia: Habitat of soil*. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists.
- Poppe, L. J. (2001). *A laboratory manual for X-ray powder diffraction*. Woods Hole: Eastern publications group.
- Porta, J. D. (1974). *Léxico Estratigráfico de Colombia, Terciario y Cuaternario*. Paris.
- Rodriguez, M., y Remolina, L. (1970). *Estratigrafía, sedimentología, porosidad y permeabilidad de la formación La Paz*. Bucaramanga, Santander, Colombia.
- Sandoval, M. E. (2000). *Diagénesis de areniscas*. Caracas: Campos A. Gráficas, C.A.

Servicio Geológico Colombiano, y Google Earth. (2015). Mapa Geológico de Colombia.

Suarez, M. (1996). *Facies analysis of the Upper Eocene La Paz Formation and regional evaluation of the post - Middle Eocene stratigraphy, northern Middle Magdalena Valley basin, Colombia*. Colorado: Universidad de Colorado.

Taborda, A. (1961). *Cuencas sedimentarias de Colombia*. México, D.F.: Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros.

Welton, J. (1984). *SEM Petrology Atlas*. Tulsa: AAPG Book Store.