

**SEDIMENTOLOGÍA DEL MIEMBRO PUJAMANA, SECCIÓN  
AGUABLANCA Y SUS IMPLICACIONES COMO RESERVORIO**

**EFRAIN CASADIEGO QUINTERO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUIMICAS  
ESCUELA DE GEOLOGÍA  
MAESTRIA DE GEOLOGÍA  
BUCARAMANGA**

**2014**

**SEDIMENTOLOGÍA DEL MIEMBRO PUJAMANA, SECCIÓN  
AGUABLANCA Y SUS IMPLICACIONES COMO RESERVORIO**

**EFRAIN CASADIEGO QUINTERO**

**Tesis de grado para optar el título  
Master en Geología**

**Director  
GEORGINA GUZMÁN  
Doctora en Ciencias**

**Codirector  
Carlos Alberto Ríos  
Doctor en Ciencias Aplicadas**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUIMICAS  
ESCUELA DE GEOLOGÍA  
MAESTRIA DE GEOLOGÍA  
BUCARAMANGA  
2014**

## **DEDICATORIA**

A mi esposa Maritza, a mis hijas Ana Sofía y Mariana

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero expresar mis sinceros agradecimientos a la Dr. Georgina Guzmán, quien muy generosamente acepto ser mi directora, por su tiempo de dedicación, su aporte incondicional y críticas constructivas.

Extiendo mis agradecimientos a Campo Escuela Colorado por poner su confianza en mí y financiar de principio a fin el proyecto.

Yo quiero agradecer al Laboratorio de Difracción de Rayos-X del ICP, por transmitirme el conocimiento en preparación de las muestras en esta técnica. Igualmente agradezco al Laboratorio de Microscopia y de DRX de la Universidad Industrial de Santander.

Debo agradecer especialmente al profesor Carlos Ríos por acompañarme y apoyarme en este proyecto. Igualmente agradezco la interacción con otros científicos como mis compañeros Carlos Parra, Diego Torres, Angélica Carreño, Juan José Gómez, Katerine Jerez, la Dra. Zarith Pachón, Claudia Santos y Javier Serrano.

Toda mi gratitud y amor a mi esposa Maritza, por tenerme paciencia en estos años en los que no le pude dedicar todo mi tiempo, por acompañarme a campo y sus concejos para darle fin a este proyecto.

De igual manera quiero agradecer a todas las personas del área administrativa de la Escuela de Geología, al profesor Sait Kurama, Juan Diego Colegial y en general a todas las personas que de una o de otra manera contribuyeron en la realización de este trabajo.

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	17
1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA .....	17
1.1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	17
1.2. PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN.....	18
1.3. SISTEMATIZACIÓN DEL PROBLEMA.....	18
1.4. OBJETIVO GENERAL .....	18
1.5. OBJETIVOS ESPECIFICOS .....	18
2.1. ESTRATIGRAFÍA DE SECUENCIAS DE RESERVORIOS GAS SHALE ....	19
2.2. PETROGRAFÍA DE ROCAS GAS SHALE .....	20
2.3. RELACIÓN ENTRE LA ESTRATIGRAFÍA DE SECUENCIAS Y LA QUIMICA ORGANICA.....	21
2.4. CONCEPTOS DE COUPLET FRAGIL-DUCTIL EN ROCAS GAS SHALE..	22
4.1. DESCRIPCIÓN DE AFLORAMIENTOS.....	25
4.2. SECCIONES DELGADAS .....	26
4.3. DIFRACCION DE RAYOS X, SEM Y GEOQUIMICA.....	27
5.1. DESCRIPCIÓN DE LA SECCIÓN AGUABLANCA .....	27
5.2. DESCRIPCIÓN DE SECCIONES DELGADAS Y SEM.....	36
5.2.1. Textura.....	36
5.2.2. Composición .....	36
5.2.3. Facies A.....	37
5.2.4. Facies B.....	42
5.2.5. Facies C y E.....	49

5.2.6. Facies D.....	53
6. DISCUSIÓN E INTERPRETACIÓN .....	56
6.1. TIPO DE GRANO Y AMBIENTE DE DEPOSITACIÓN.....	56
6.2. POROSIDAD.....	66
7. SECUENCIA ESTRATIGRAFICA .....	76
8. DEFINICIÓN DE LAS MEJORES FACIES PROSPECTIVAS.....	81
8.1. MADUREZ TERMAL DE LA MATERIA ORGÁNICA.....	81
8.2. ÍNDICE DE FRAGILIDAD .....	85
9. CONCLUSIONES .....	88
BIBLIOGRAFIA.....	90
ANEXOS.....	91

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ambiente de depositación de la Formación La Luna. ....	23
Figura 2. Localización área de estudio, mostrando las morfología, formaciones del área de estudio y puntos de muestreo. ....	24
Figura 3. Columna estratigráfica generalizada y ciclos. ....	25
Figura 4. Foto de afloramiento de la facies A. Se puede observar la textura masiva ..... .....	29
Figura 5. Foto de afloramiento de la facies B. Se puede observar la variación estructural ..... .....	32
Figura 6. Foto de afloramiento de la facies C. (A) y (D) Concreción dentro de capa de arcillolita deformada por la compactación. ....	33
Figura 7. Foto de afloramiento de la Facies D. ....	34
Figura 8. Foto de afloramiento de la Facies E. ....	35
Figura 9. Ubicación de las muestras analizadas de la Sección Aguablanca según el diagrama de clasificación para híbridas ..... .....	37
Figura 10. Datos de difracción de rayos-X usando los datos del Bulk. Obsérvese la clasificación de las muestras según la composición ..... .....	39
Figura 11. Fotografías y microfotografías de la facies A. La cruz roja ubica el lugar de la medición del difractograma. .... .....	40
Figura 12. Fotomicrografías de la litofacies A de la sección Aguablanca. (A), (B), (D) y (E) ..... .....	41
Figura 13. Fotografías y fotomicrografías de la facies B. La cruz roja ubica el lugar de la medición del difractograma ..... .....	44
Figura 14. Fotomicrografías en luz polarizada plana de la litofacies B y C de la sección Aguablanca. .... .....	45
Figura 15. Fotomicrografías de la litofacies B de la sección Aguablanca. ....	46
Figura 16. Imágenes de SEM de la microtextura y composición de la Facies B. ....	47
Figura 17. Imágenes de SEM de la microtextura y composición de la Facies B. ....	48
Figura 18. Composición y textura de la Facies C. Bi: Bioclastos. ....	49
Figura 19 Composición y textura de la facie E. ....	50

Figura 20. A y B, composición y textura de la facie E.....	51
Figura 21. Composición y textura de la Facie E.....	52
Figura 22. Composición y textura de la Facies D.....	54
Figura 23 Composición y textura de la Facies D.....	55
Figura 24. Parasecuencia generalizada de la diagénesis.....	59
Figura 25. Microfotografía de fractura rellenada por calcita (Ca) que anteriormente había estado rellena por materia orgánica (Mo). .....	60
Figura 26. Microfotografía de deformación de la matriz arcillosa (Arc). .....	60
Figura 27. Porosidad moldica de foraminíferos por disolución del carbonato. ....	61
Figura 28. Foraminífero relleno de carbonato (A). Obsérvese la cruz roja (C) marca la composición dada por el espectral (B). .....	61
Figura 29. Deformación de las láminas debido a las concreciones formada en la diagénesis temprana.....	63
Figura 30. Microfabrica de las arcillas de la Formación La Luna en la Sección Aguablanca. ....	64
Figura 31. Variación de la materia orgánica con la laminación. Arc: Arcillas; Mo: Materia orgánica .....	65
Figura 32. Variación de porosidad encontrada en la sección Aguablanca de muestras analizadas por SEM. ....	66
Figura 33. Microfracturas perpendiculares a la laminación resaltadas con las flechas amarillas (Superior). .....	67
Figura 34. Clasificación de los microporos usando imágenes de SEM.....	68
Figura 35. Porosidad en floculos de poro y microcanales.....	69
Figura 36. Microporosidad entre lodo calcáreo. ....	70
Figura 37. Porosidad tipo órgano-poro en facies Wackestone.....	71
Figura 38. Porosidad en arcillolitas silíceas. ....	73
Figura 39. Porosidad interparticula y en los fragmentos fósiles. ....	74
Figura 40. Diagrama composicional de las arcillitas .....	75

Figura 41. Columna estratigráfica que muestra el cambio de la sucesión de Facies. Sección Aguablanca, Oeste de Bucaramanga .....	76
Figura 42. Modelo esquemático que muestra la distribución espacial .....	79
Figura 43. Modelo esquemático que muestra la distribución espacial de la secuencia de.....	81
Figura 44. Crossplot del Índice de Producción versus $T_{max}$ .....	84
Figura 45. Diagrama de Van Krevelen del miembro Pujamana .....	85
Figura 46. Zonas frágiles y dúctiles obtenidas con el índice de fragilidad. ....	87

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Lista de facies observadas.....	28
Tabla 2. Tabla de resumen de la composición y texturas de las Facies A, B y D de la sección Aguablanca. ....	30
Tabla 3. Composición geoquímica de 18 muestras de la sección Aguablanca .....	84

## LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Sección Aguablanca Segmento 1.....	93
Anexo B. Sección Aguablanca Segmento 2.....	93

## RESUMEN

### TITULO

**SEDIMENTOLOGÍA DEL MIEMBRO PUJAMANA, SECCIÓN AGUABLANCA Y SUS IMPLICACIONES COMO RESERVORIO\***

### AUTOR

EFRAIN CASADIEGO QUINTERO\*\*

### PALABRAS CLAVES

Facies, arcillolitas, carbonatos, estratigrafía, petrografía, Formación La Luna.

### DESCRIPCIÓN

La Formación La Luna ha sido considerada roca generadora y sello durante varias décadas, pero los últimos años ha despertado un importante interés como reservorio no convencional de hidrocarburo. El siguiente trabajo estudio el miembro Pujamana localizado en la Sección Aguablanca, en el Valle Medio del Magdalena (VMM) al Este de Colombia. En el trabajo se integró técnicas como Microscopia Electrónica de Barrido (SEM) y Difracción de Rayos X (DRX), que dieron un mayor detalle visual y que permitieron conocer la composición de la roca que no es fácilmente distinguido en secciones delgadas. El Miembro Pujamana en la sección Aguablanca consiste de dos unidades depositacionales: una unidad inferior (regresiva) con interestratificaciones de calizas y arcillolitas calcáreas macizas a levemente laminadas y presencia moderada de bioturbación; y una unidad superior (transgresiva) que consiste de arcillolitas bien laminadas (con menor evidencia de bioturbación). Las rocas calcáreas mixtas observadas tienen cinco microfacies: 1) wackestone-Packestone biomicrítico; 2) packestone bioclástico, bien laminado, rico en materia orgánica; 3) mudstone con bioclastos, rico en sílice, moderadamente laminado; 4) arcillolita silícea, maciza y 5) cenizas de caída.

Por medio del conocimiento de la mineralogía y las microestructuras de las diferentes facies se pudo inferir un Índice de Fragilidad para las litologías encontradas en la sección Aguablanca, donde la mayor fragilidad la presentan las siguientes facies: Wackestone de foraminíferos masiva a levemente laminar; Arcillolitas silíceas fosilíferas macizas; y Arcillolitas muy fosilíferas, ricas en materia orgánica.

---

\* Tesis de Maestría

\*\*Facultad de Ingeniería Físicoquímicas. Escuela de Geología. Director: Ph.D. Georgina Guzman. Codirector: Ph.D. Carlos Alberto Rios

## ABSTRACT

### TITEL

### SEDIMENTOLOGY OF THE PUJAMANA MEMBER, AGUABLANCA SECTION AND ITS IMPLICATIONS AS RESERVOIR\*

### AUTHOR

EFRAIN CASADIEGO QUINTERO\*\*

### KEYWORDS

Facies, claystone, carbonate, stratigraphy, petrography, The Luna Formation.

### DESCRIPTION

The Luna Formation has been considered a generator rock and a seal during several decades, but the last years it has brought back an important interest as a not conventional hydrocarbon reservoir. The next work studied the Pujamana member, localized in Aguablanca section, in the Middle Valley of Magdalena at the East of Colombia. The petrographic analysis was integrated with technologies like (Scanning Electron Microscope) SEM and (X-Ray Difrraction) DRX that gave a better visual detail and that allowed to know the composition of the rock that is not easily distinguished in thin sections. The Galemba Member of Aguablanca section consists of two major depositationals units: a low (regressive) unit with interstratifications of limestones and shale massive calcareous to slightly laminated with moderate presence of bioturbation; and a top (transgressive) unit that consists of well laminated arcillolitas (with minor evidence of bioturbation). The analysis of the mixed calcareous rocks let to identify five main microfacies. The microfacies are: 1) wackestone-Packestone biomicritic; 2) bioclastic packstone, rich in organic matter laminae; 3) mudstone with bioclast, rich in silica, moderately laminated); 4) siliceous claystone, massive and 5) ashes of fall.

Through of the knowledge of mineralogy and the microstructure of the different facies, it could infer a brittle rate for the litologies found in Aguablanca section, where most fragility have the following facies: massive foraminifera wackestone to slightly laminar; Massive fossiliferous siliceous claystones; fossiliferous claystones and very rich in organic matter.

---

\* Master Thesis

\*\* Facultad de Ingeniería Físicoquímicas. Escuela de Geología. Director: Ph.D. Georgina Guzman. Codirector: Ph.D. Carlos Alberto Rios

## INTRODUCCIÓN

Los Roca Gas Shale hacen parte de los Reservorios No Convencionales después de los años 70s cuando debido al aumento de precios de los hidrocarburos en Estados Unidos estos fueron elevados a recursos económicamente viables, (Law and Curtis, 2002). Los Yacimientos de Gas No Convencionales (Gas Shale, Metano en capas de carbón y las Arenas Bituminosas) son importantes para tener en cuenta en la exploración petrolera, debido a sus propiedades de almacenamiento de gas y al potencial como un gran recurso recuperable. En la actualidad, es importante que los Geólogos e Ingenieros que investigan los Reservorios de Gas Shale, modifiquen y amplíen los conceptos tradicionales para obtener datos de este tipo de rocas que son generadoras de Gas, donde ocurre la expulsión, migración, entrapamiento y el reservorio (Ross and Bustin, 2008). Las rocas reservorio de Gas Shale son rocas generadoras con un buen contenido de TOC (mayor a 0.5%), la cual necesita además como mínimo de la depositación de la roca generadora, también un enterramiento suficiente para alcanzar la madurez asociada con la temperatura. Esto asociado a una buena fragilidad de la roca reservorio, es lo que hace viable la producción del reservorio (McCarthy, et al., 2011; Ross, et al., 2009).

## **1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA**

### **1.1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

Las rocas shale han sido consideradas rocas generadoras y sello durante varias décadas, pero los últimos años han despertado un importante interés como reservorio no convencional de hidrocarburo. En el caso de la Formación La Luna siempre se ha estudiado como roca generadora de hidrocarburo, por eso la mayoría de estudios son de geoquímica, para conocer su madures termal y el tipo de materia orgánica, su análisis en estudios anteriores tienen poco detalle a nivel mineralógico y la relación de la materia orgánica con la litología no ha sido entendida. Además la litología de la Formación La Luna en el Valle Medio del Magdalena (VMM), se ha comparado con La Luna de la Cuenca del Catatumbo, las cuales son estratigráfica y mineralógicamente diferentes.

La mayoría de información que se tiene de la Formación La Luna en el VMM, es de afloramientos discontinuos que se encuentran a más de 5 km de la sección tipo, que necesitan ser completados con la revisión de otras secciones para establecer un modelo estratigráfico regional, y caracterizar la variación de las propiedades de la roca y las facies laterales (Bernal, 2009).

La falta de conocimiento de las propiedades de la roca gas shale, puede conllevar ha sobrestimar o menospreciar sus cualidades como reservorio, por eso se deben crear nuevas técnicas de investigación para reservorios no convencionales, que reflejen las características de la roca productora de hidrocarburo.

## **1.2. PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN**

¿Cómo integrar datos multiescala para caracterización de reservorios gas shale?

## **1.3. SISTEMATIZACIÓN DEL PROBLEMA**

- ¿Cuáles son las sucesiones de Facies Inorgánicas del Miembro Pujamana de La Formación La Luna, en la Sección Aguablanca, al Este del VMM?
- ¿Cómo la Geoquímica orgánica está estrechamente vinculada a litofacies, y revelan variaciones cíclicas en ambientes depositacionales óxico-anóxicos?.
- ¿Cuáles fueron las condiciones paleoambientales de depositación del Miembro Pujamana?
- ¿Cómo las facies y el contenido de materia orgánica se relacionan con la ductilidad ó fragilidad en un yacimiento no convencional?

## **1.4. OBJETIVO GENERAL**

Realizar la caracterización de reservorios gas shale, interpretando e integrando datos multiescala del Miembro Pujamana en la Formación La Luna, Sección Aguablanca, Este de la Cuenca del Valle Medio del Magdalena

## **1.5. OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- ▣ Levantar la sección estratigráfica de la Sección Quebrada Aguablanca, para ser representada a escala 1:200 utilizando información de afloramientos de la Formación La Luna.
- ▣ Reconstruir condiciones paleoclimáticas y paleoambientales por medio de la relación de la geoquímica y las litofacies.
- ▣ Entender la naturaleza de las sucesiones y características depositacionales en la sección, basados en nuevas hipótesis de sedimentación y en las facies representativas.
- ▣ Relacionar las facies y el contenido de materia orgánica con la ductilidad ó fragilidad de la roca.

## **2. MARCO TEORICO DE RESERVORIOS GAS SHALE**

Los reservorios gas shale hacen parte de los reservorios no convencionales que después de los años 70s fueron elevados a recursos económicamente viable por el aumento del precio del hidrocarburo en Estados Unidos (Law and Curtis, 2002). Los yacimientos de gas no convencionales (shale gas, metano en capas de carbón y las arenas bituminosas) son importante para tener en cuenta en la exploración de petróleo, debido a sus propiedades de almacenamiento de gas y potencial como un gran recurso recuperable. En la actualidad es importantes que se investiguen los reservorios gas shale, se modifiquen y amplíen los conceptos tradicionales para obtener datos de este tipo de rocas que son generadoras de gas, expulsión, migración, entrapamiento y reservorio (Ross and Bustin, 2008). Las rocas reservorio gas shale son rocas generadoras con un buen contenido de TOC mayor a 0.5%, además es necesario como mínimo la depositación de la roca generadora y el enterramiento necesario para lograr la maduración asociada con la temperatura, lo cual hace que sea viable en la producción del reservorio, si este presenta buena fragilidad de la roca (McCarthy, et al., 2011).

### **2.1. ESTRATIGRAFÍA DE SECUENCIAS DE RESERVORIOS GAS SHALE**

La Formación La Luna del Valle Medio de Magdalena fue depositada en un ambiente marino de aguas profundas, con poca oxigenación en el fondo, durante el Cretácico Superior, en un periodo de 10 millones de años (Royero, et al., 2001 y Barrero, et al., 2007), en una cuenca de Rift a Foreland Broken. La depositación de la Formación La Luna tomo lugar durante la última parte de un megaciclo de cinta de facies transgresiva (TST) (transgressive systems tract) en sus inicios durante el Turoniano donde se depositó posiblemente el Miembro Salada y Pujamana; culmino con una cinta de facies de nivel alto del mar HST (highstand systems tract) con la depositación del Miembro Galembó (Reyes, et al, 2000). La proveniencia de los sedimentos que rellenan la cuenca son depósitos continentales Jurásicos, recubiertos por sedimentos siliciclasticos y calcáreos

autigenicos de origen transicional a marino, junto algunos pulsos volcánicos que se extienden sobre la cuenca (Royero, et al., 2001; Torres, 2013).

## **2.2. PETROGRAFÍA DE ROCAS GAS SHALE**

Las litologías encontradas en rocas gas shale, corresponden en su mayoría a variaciones de minerales arcillosos, cuarzosos y calcáreos. Se encontraron otros minerales en cantidades trazas a cantidades menores.

### **Calcita**

La calcita se puede distinguir de acuerdo a la composición y tamaño del grano en la matriz ó en los granos esqueléticos. En la matriz se puede encontrar como material intersticial entre granos, desde tamaño criptocristalino a microcristalino (*micrita*) [ $< 4 \mu\text{m}$ ], también en tamaño de grano fino (*microesparita*) [5-30  $\mu\text{m}$ ] y en cristales de *esparita* que puede ser visto con los ojos (Flügel, 2010).

### **Sílice**

El sílice se puede encontrar en minerales cuarzosos tamaño limo y microcuarzo, calcedonia. Se puede observar preservando foraminíferos ó radiolarios (Boggs, 2009). La mineralogía cuarzosa puede ser derivada de cuatro posibles generaciones (Schieber, et al., 2000; Boggs, 2009): biogénica (radiolarios, etc.), detrítica, hidrogena (precipitado o absorbido de agua marina) e hidrotermal.

### **Fosfatos**

Los depósitos de fosfatos se encuentran intercalados con rocas carbonatadas, lodolitas o chert. Las mayores acumulaciones de fosforitas se pueden encontrar en triple asociación de fosfatos, chert y sedimentos con abundante materia orgánica (Boggs, 2009; Monroe, 2009). El decrecimiento de temperaturas en el océano puede dar como resultado depositación de fosfatos antigénicos. Los fosfatos biológicos es el resultado de la acumulación de huesos, dientes y coprolitos en el fondo del mar. Los nódulos de fosfato y sedimentos fosfáticos pueden ocurrir en el

fondo oceánico aproximadamente cerca desde los 400 m, también cerca de las líneas de costa con empobrecimiento de oxígeno y condiciones alcalinas moderadas. Los fosfatos se pueden presentar como ooides, colofana ó rellenando fósiles.

### **Pirita**

La pirita es otro de los minerales más frecuentes en encontrar en este tipo de roca de ambientes de aguas profundas y cuencas anóxicas (Monroe, 2009). En las bajas ratas de sedimentación donde puede haber bajas ratas de reducción del sulfato que forma pirita, esta pirita puede ser conservada en condiciones anóxicas, pero en condiciones oxicas es re-oxidada y no se preserva. La pirita se puede presentar en varias formas, como dispersa o framboidal.

### **Glaucionita**

La glauconita es un indicador de baja rata de sedimentación y es uno de los más confiables marcadores estratigráficos de los sedimentos marinos abiertos. Además la concentración de glauconita puede ocurrir en la base de TST, donde la rata de sedimentación es baja y se puede encontrar en pelets (Boggs, 2009).

## **2.3. RELACIÓN ENTRE LA ESTRATIGRAFÍA DE SECUENCIAS Y LA QUIMICA ORGANICA**

Los continuos cambios en el nivel del mar pueden afectar el modelo de depositación y la estratigrafía. Los shale pueden ser interpretados como la combinación de límites de secuencias con bajos contenidos de materia orgánica y superficies de inundación de valores altos de materia orgánica. Las máximas superficies de inundación pueden concordar con altos valores de gamma ray (Slatt and Abousleiman, 2011).

## **2.4. CONCEPTOS DE COUPLET FRÁGIL-DUCTIL EN ROCAS GAS SHALE**

La fragilidad es la medición de la habilidad de la roca para romperse o fracturarse, esta depende de los esfuerzos efectivos, la litología, la textura, la temperatura, tipo de fluido (Wang and Gale, 2009; Slatt, 2011), diagénesis y TOC (Walls, 2004). La profundidad de la roca puede afectar la fragilidad de la roca, debido a que aumentan las presiones, temperaturas y la diagénesis disminuye el TOC. La laminación de la roca y su variación litológica también influye en la fragilidad y rompimiento de la roca. Las litologías frágiles (cuarzo, calcita, dolomita) tienden a romperse con los esfuerzos, mientras los dúctiles (arcillas y ricas en materia orgánica) tienden a deformarse. El grado de laminación (fábrica de gran escala a nanómetros) puede variar junto a las propiedades geomecánicas y la anisotropías. Estas laminas pueden formarse individuales (< 1 cm de espesor) o conformar capas (> 1 cm de espesor), generadas por el transporte del sedimento y depositación de estratos por físico-química.

La combinación de estratigrafía de secuencias y las propiedades geomecánicas ayudan a la interpretación de la pareja frágil-dúctil (Slatt and Abousleiman, 2011).

## **3. ANTECEDENTES**

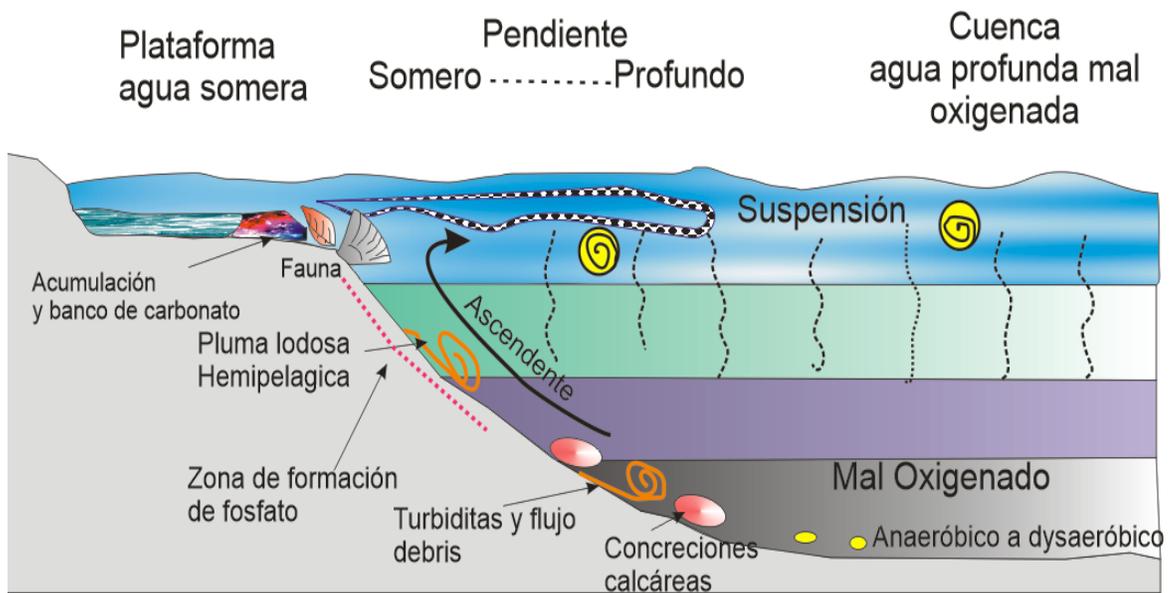
La Formación La Luna fue definida en Colombia en el área de Concesión Barco por Notestein, et al. (1994) y Richards (1968) según (Royero, et al., 2001); La Formación La Luna se ha subdividido en tres miembros que de base a techo son: Salada, Pujamana y Galembo (Naranjo, 2009).

El Miembro Salada del Turuniano Inferior consiste de capas muy delgadas de shale limoso ocasionalmente intercalado con capas delgadas de lodolitas negras de grano fino (Ramón y Dzou, 1999). Rangel et al. (2002), describe wackstones foraminíferos con algunos vertebrados y huesos de peces con trazas de pirita. Según Ramón y Dzou, (1999) este miembro contiene abundantes foraminíferos planctónicos y radiolarios. Este

miembro se caracteriza por tener venillas y concreciones. El espesor del Miembro Salada puede variar de 50 m a 100 metros (Morales, 1958).

El Miembro Pujamana del Turuniano Superior al Conienciano Inferior, está compuesto de capas muy delgadas de shale calcáreo de gris a negro, shale y mudstones calcáreos fosfáticos (Ramón y Dzou, 1999). Se depositó en un ambiente anaeróbico (ver Figura 1) o con mala oxigenación (Morales, 1958; Rangel, et al. 2002; Bernal, 2009). Morales en (1958), hace una aproximación del espesor del miembro Pujamana, el cual puede variar de 50 m a 225 m.

**Figura 1.** Ambiente de depositación de la Formación La Luna.



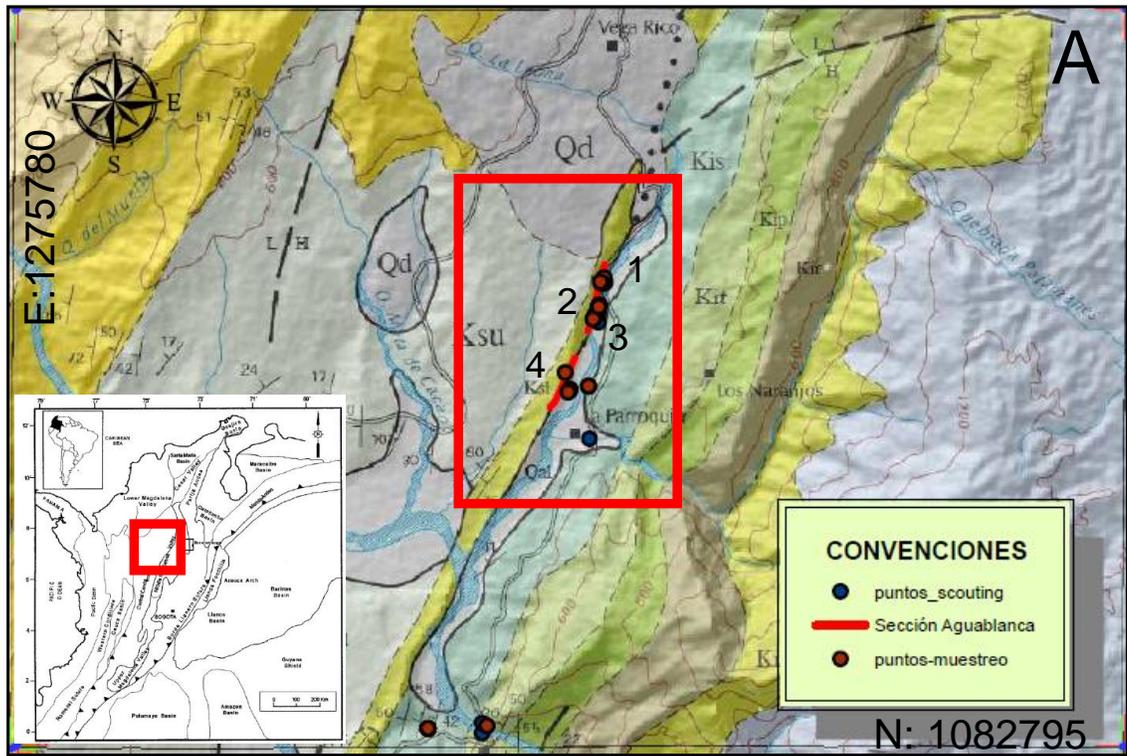
**Fuente:** Según Morales, 1958. Modificado de (Loucks y Ruppel, 2007).

El Miembro Galembó del Conienciano Superior y posible Santoniano, consiste de capas muy delgadas de shale calcáreo negro con intercalaciones de capas delgadas de lodolitas arcillosas. La parte inferior de este miembro consiste en packstones y wackstones fosfáticos (Ramón y Dzou, 1999; Rangel, et al., 2000; Bernal, 2009). El espesor del miembro Galembó puede tener un rango de 180 m a 350 metros (Morales, 1958).

Royero y Clavijo (2001), sugieren que debido a los restos de peces, pellet y apatito, la Formación La Luna se depositó en un ambiente marino de aguas someras, cercanas al borde externo de la plataforma.

Las secciones estratigráficas que se han estudiado de la Formación La Luna en la Cuenca del Valle Medio del Magdalena se han levantado en La Quebrada la Sorda, La Azufrada, y en el sector del Tablazo la Quebrada Aguablanca y el Cerro Galembó (Rangel, et al., 2000; Bernal, 2009), este último el más cercano al área de estudio, (ver **Figura 2**).

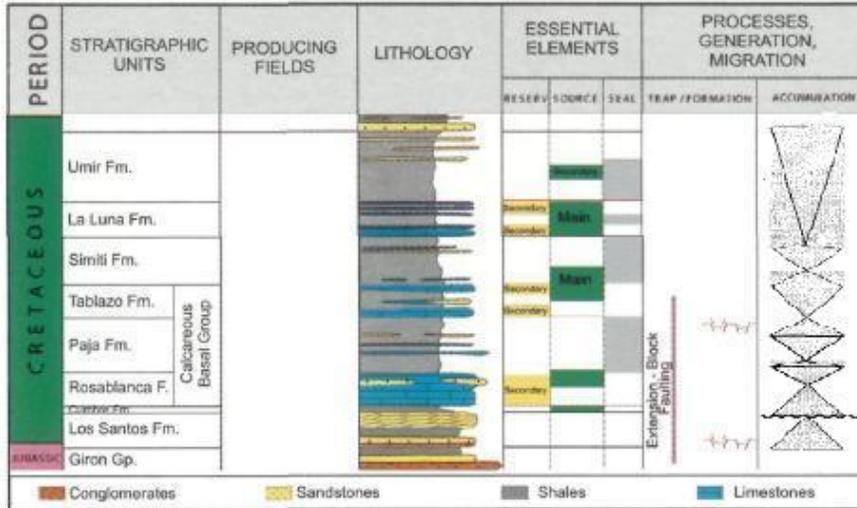
**Figura 2.** Localización área de estudio, mostrando las morfología, formaciones del área de estudio y puntos de muestreo.



**Fuente:** Modificado de (Rangel et al, 2000; Ramos y Dzou, 1999 y La Plancha H12).

La Formación La Luna (Figura 3) es considerada como la principal roca generadora de hidrocarburo en el Cretáceo Superior, en la Cuenca del Valle Medio del Magdalena (Rangel, 2000; García y Parra, 2003; Bernal, 2009) y podría ser una de las Formaciones más importantes como yacimiento no convencional de gas y petróleo en Colombia (Torres, et al, 2012).

**Figura 3.** Columna estratigráfica generalizada y ciclos.



**Fuente:** Modificado de (Reyes et al., 2000; Barrero et al., 2007).

## 4. METODOLOGÍA

### 4.1. DESCRIPCIÓN DE AFLORAMIENTOS

Los afloramientos de la sección Aguablanca se encuentran 70 km al noreste del municipio de Vicente de Chucuri, en las coordenadas N: 1082797, E: 1275781. Aproximadamente 50 m (164 ft) de afloramiento fueron descritos para el estudio de la sección estratigráfica de la Quebrada Aguablanca. En esta sección cinco diferentes litologías fueron determinadas por inspección visual, donde se identificaron las siguientes características composicionales y texturales para una primera clasificación: tamaño del grano, estructuras sedimentarias, geometría de las capas y la composición de las partículas gruesas. El color fue descrito por la carta de color de suelo Munsell. El contenido de carbonato fue determinado por la aplicación de HCl a las muestras de mano.

Se levantó información en 40 estaciones de trabajo de las cuales 25 fueron mediciones de rumbo y buzamiento de las capas, en todas se realizaron

descripciones de afloramientos y análisis estratigráficos (figura 2). Se hizo el levantamiento de columnas estratigráficas detalladas de la sección, un muestreo sistemático de las rocas, reconocidas previamente mediante el levantamiento estratigráfico.

#### **4.2. SECCIONES DELGADAS**

En total 29 secciones delgadas fueron escogidas para análisis petrográfico detallado. Para la selección de los puntos de donde se elaborarían las secciones delgadas se tuvo en cuenta las distintas litologías dominantes de base a techo. Las secciones delgadas fueron elaboradas por el Laboratorio de Procesamiento de Secciones Delgadas Luis Felipe Peña. Las muestras se impregnaron con resina epóxica para reconocer la porosidad y tinción para carbonatos y feldespatos. Posteriormente se realizó un conteo de 300 puntos para el análisis composicional y textural, utilizando el método Gazzi-Dickinson (1984), para eliminar los problemas de la variación de la composición por el tamaño de grano (Ingersoll et al., 1984). El límite limo-arcilla es de 4  $\mu\text{m}$  que coincide con el cut-off usado en análisis de difracción de rayos-x. Los datos fueron tabulados en una tabla de Excel. Las muestras descritas con secciones delgadas están compuestas principalmente de minerales aloquímicos, ortoquímicos y terrígenos de diferentes proporciones (Figura 9). En la clasificación de las muestras se usaron los criterios de Folk (1974) para las rocas mixtas según los diagramas ternarios, Terrigenas/Aloquímicas/Ortoquímicas impuras, mientras la clasificación de Folk (1962) y Dunham (1962) se usó para las calizas. La definición de la composición es apoyada por la descripción de las secciones delgadas y los datos de la difracción de rayos x. Los gráficos ternarios, binarios y análisis estadísticos fueron hechos usando el software libre panplot. En las secciones delgadas la facies de Cenizas de Caída fueron examinadas pero no se contaron los puntos, porque que esa facies no es típica de toda la sección Aguablanca.

### **4.3. DIFRACCION DE RAYOS X, SEM Y GEOQUIMICA**

Una pequeña porción fue removida de cada muestra para análisis geoquímico. La Pyrolysis de Rock-Eval fue hecha por el Grupo de Geoquímica de la UIS en 18 muestras, tomada en todo el intervalo a lo largo de la sección Aguablanca. Los estudios de DRX fueron elaborados en los laboratorios de la UIS-Guatiguara y del ICP, donde se analizaron 22 muestras tomadas de las distintas litofacies de base a tope de la sección. Esos datos incluyen el bulk mineralógico de la roca con la abundancia relativa de la arcilla y la mineralogía gruesa de la fracción mayor a 2  $\mu\text{m}$ .

## **5. RESULTADOSDESCRIPCIÓN DE LA SECCIÓN AGUABLANCA**

El estudio descriptivo del miembro Pujamana en la sección Aguablanca, así como la recolección de macrofauna, se realizó capa a capa y a escala centimétrica. Esto ayudo a que posteriormente se reconocieran cinco (5) distintas asociaciones de facies. Es importante aclarar que debido a lo dificultoso para diferenciar la procedencia del carbonato en las litologías finogranulares, y poder definir si hacia parte de la matriz o de los granos, fue necesario tomar muestras donde se observaran diferencias del color y estructuras sedimentarias para hacer un pre-análisis petrográfico que ayudara a formar un patrón en las características microscópicas que fuera comparable con las macroscópicas observadas en el afloramiento. Posteriormente después del estudio descriptivo de la sección Aguablanca se seleccionaron 24 muestras para sección delgada que dieron un mayor detalle a la interpretación sedimentológica. A continuación se mencionan las cinco facies reconocidas en el miembro Pujamana de la sección Aguablanca. Facies A es un Wackestone de Foraminíferos Maciza a levemente laminar. Facies B que consiste de Arcillolitas Ricas en Materia Orgánica muy Fosilíferas, moderadamente a bien laminada. Concreciones ricas en calcita que comprenden la facies C las cuales pueden contener fósiles y pirita. Facies D, la cual comprende

Arcillolitas Silíceas Fosilíferas Macizas. La facies E la cual se interpreto como Cenizas de Caída, las cuales son muy ricas en caolinita y sílice.

**Tabla 1.** Lista de facies observadas.

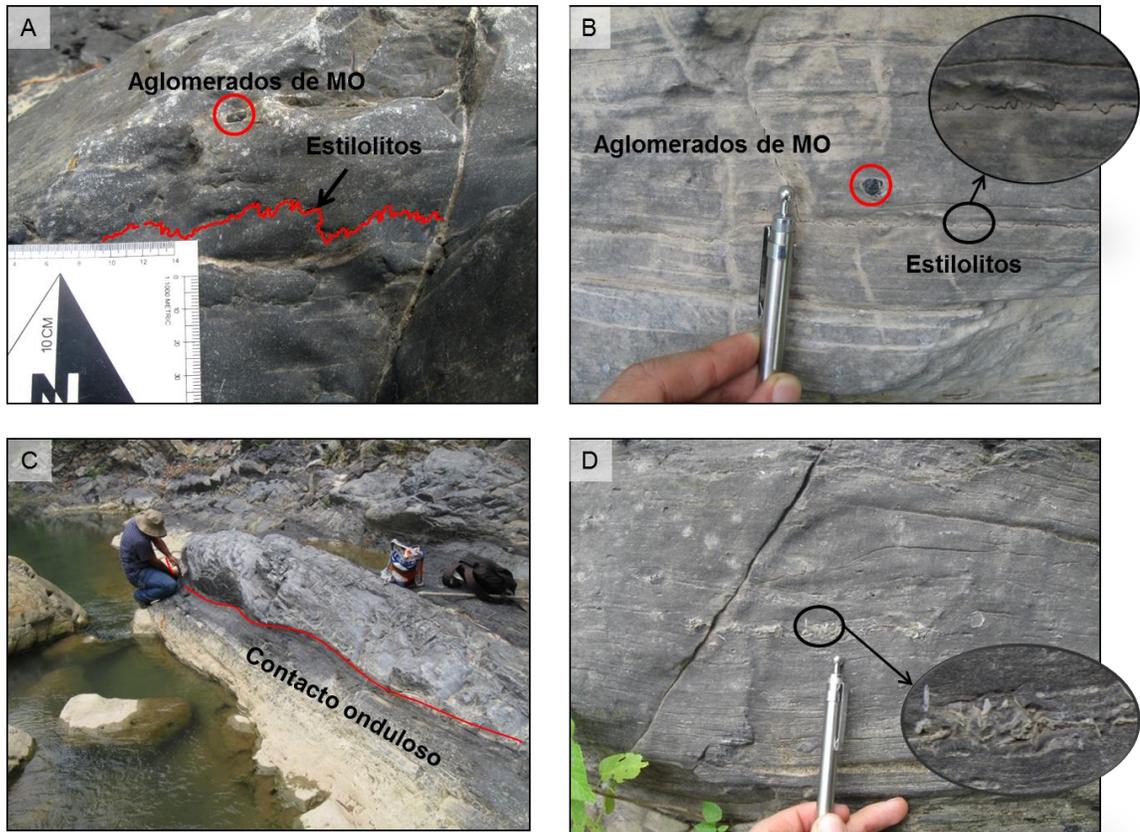
Facies	Descripción
A	Wackestone de foraminíferos maciza a levemente laminar
B	Arcillolitas muy fosilíferas, ricas en materia orgánica, moderadamente a bien laminada
C	Concreciones ricas en calcita
D	Arcillolitas silíceas fosilíferas macizas
E	Cenizas de caída

La Facies A se encuentra con mayor frecuencia en la base de la sección Quebrada Aguablanca, especialmente en las estaciones 1 y 2. Esta comprende el 35% del total de la sección descrita. Está en contacto neto irregular hacia la base de las capas con rocas de Facies B (Figura 4C), y contiene intercalaciones con las facies C y E. La geometría de las capas es onduladas de 20 cm a 40 cm de espesor hacia la base de la sección, variando a capas tabulares planoparalelas de 20 cm a 50 cm de espesor hacia el tope de la sección. La Facies A se compone de mudstone a wackestone macizo a finamente laminado de forma discontinua (Figura 4) que no es afectada por la bioturbación. La roca es principalmente gris oscuro medio en color (5YR 5/1 – N5 en Munsell rock color chart), con algunos grises claros (N6) en las capas delgadas con mayor contenido de fósiles.

Comúnmente se observan bioclastos bien preservados que incluyen fragmentos rotos de bivalvos, peces y escamas organizados de forma oblicua (Figura 4D), formando laminas delgadas (<1 mm) de color blanco (N9) embebidos en la matriz. La disposición de los bioclastos es concordante con la laminación. Los bioclastos que se encuentran desarticulados cóncavos hacia arriba, se observan en la base de canales o en superficies de reactivación. Se observaron algunos estilolitos (Figura 4A y 4B) saturados de alta amplitud (Flügel, 2010) e intraclastos de materia orgánica paralelos a las capas de depositación.

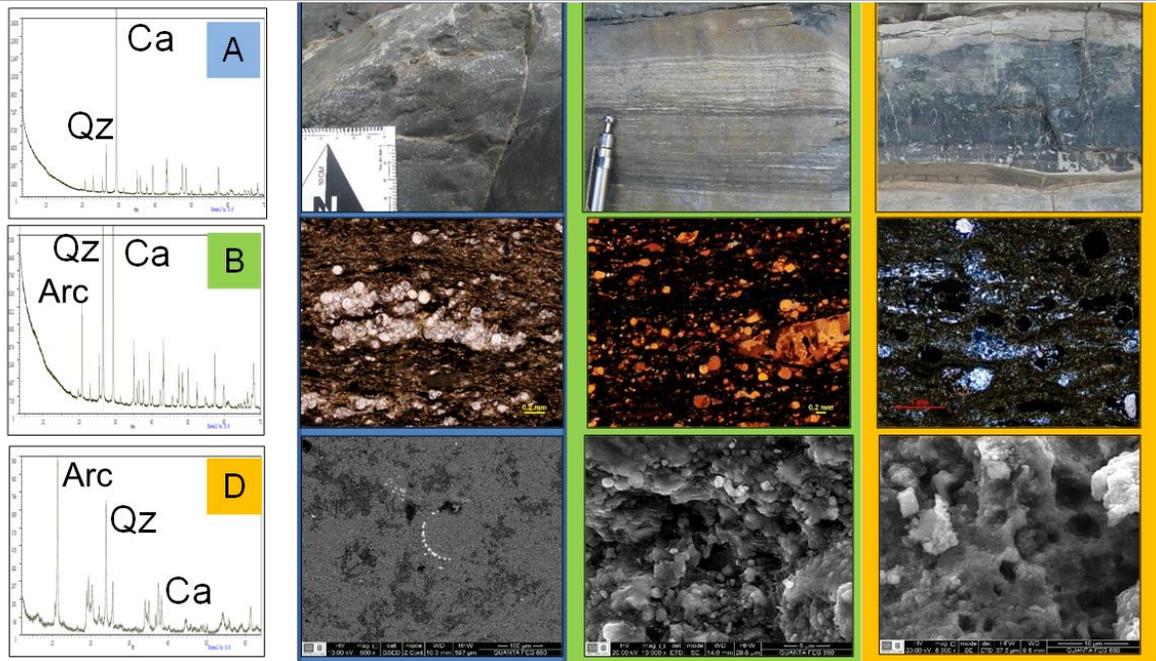
Las capas de la Facies A presenta una cantidad alta de venas rellenas de carbonato y diaclasas perpendiculares a la depositación.

**Figura 4.** Foto de afloramiento de la facies A. Se puede observar la textura masiva (A) a levemente laminar (B), además los estilolitos y los aglomerados de materia orgánica. Nótese el contacto ondulado en la base de las capas de facies A (C), fragmentos de bioclastos rotos organizados de forma oblicua (D).



**Tabla 2.** Tabla de resumen de la composición y texturas de las Facies A, B y D de la sección Aguablanca.

FACIES		A	B	D
		Wackestone de foraminíferos	Arcillolitas muy fosilíferas, ricas en materia orgánica,	Arcillolitas silíceas fosilíferas masivas
ESPESOR (m)	Capas	0,1-0,8	0,1-4,5	0,05-0,3
	Acumulado	11,6	21,5	0,4
ALOQUIMICOS	Microfósiles	15- 53%	17-44%	17-41%
ORTOQUIMICOS	Micrita	5-75%	8-40%	2-5%
	Esparita	5-10%		
	Fosfatos	Tr-4%	1-3%	Tr
	Silice Microcristalina			1-5%
<b>MATRIZ</b>		Tr-41%	34-60%	44-75%
TERR	Detriticos tamaño Limo (Qz, Fk, Plg)	Tr	Tr	Tr
DRX	Laminación	Maciza a levemente laminar	Moderadamente a bien laminada	Maciza a levemente laminar

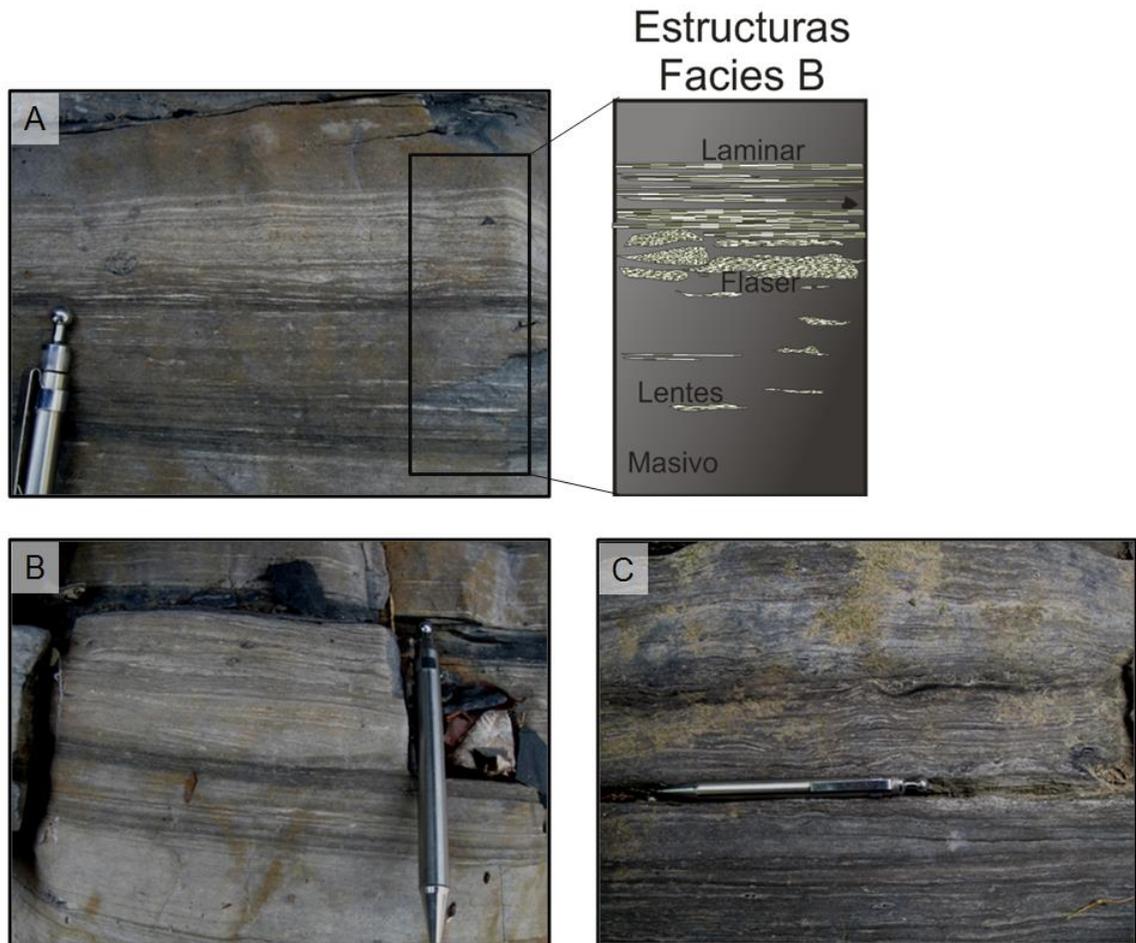


La petrofacies B se encuentra intercalada con la Facies A hacia la base de la sección y con la Facies D hacia el tope de la sección Aguablanca (Figura 5). El color grisáceo de las capas que comprenden esta facies varia en color gris oscuro (N3) a gris oscuro medio (N4). El espesor promedio de las capas es de 0,1 m a 4 m (ver Tabla 2), el espesor tiende a aumentar hacia el tope de la sección. Cinco de esas capas con menor espesor de 0,1 m, se encuentra en la base de la sección.

La Facies B es la más dominante de la sección Quebrada Aguablanca y comprende un (54%) del total. La mayoría de todos los contactos suprayacente e infrayacente con las arcillolitas silíceas de la facies D son netos planar. A la base, los primeros 19 m de la sección del Miembro Pujamana, se componen de capas de arcillolitas calcáreas muy fosilíferas con estratificación planoparalela y ligeramente ondulosa, baja a moderadamente bioturbada en superficies erosivas.

Las estructuras internas de las capas de la Facies B varían de finamente laminadas a laminas medias (0.2 – 0.5 mm) continuas y láminas lenticulares a flaser en la parte inferior (Figura 5A); y a laminas delgadas discontinuas a macizas hacia la parte superior (Figura 5B).

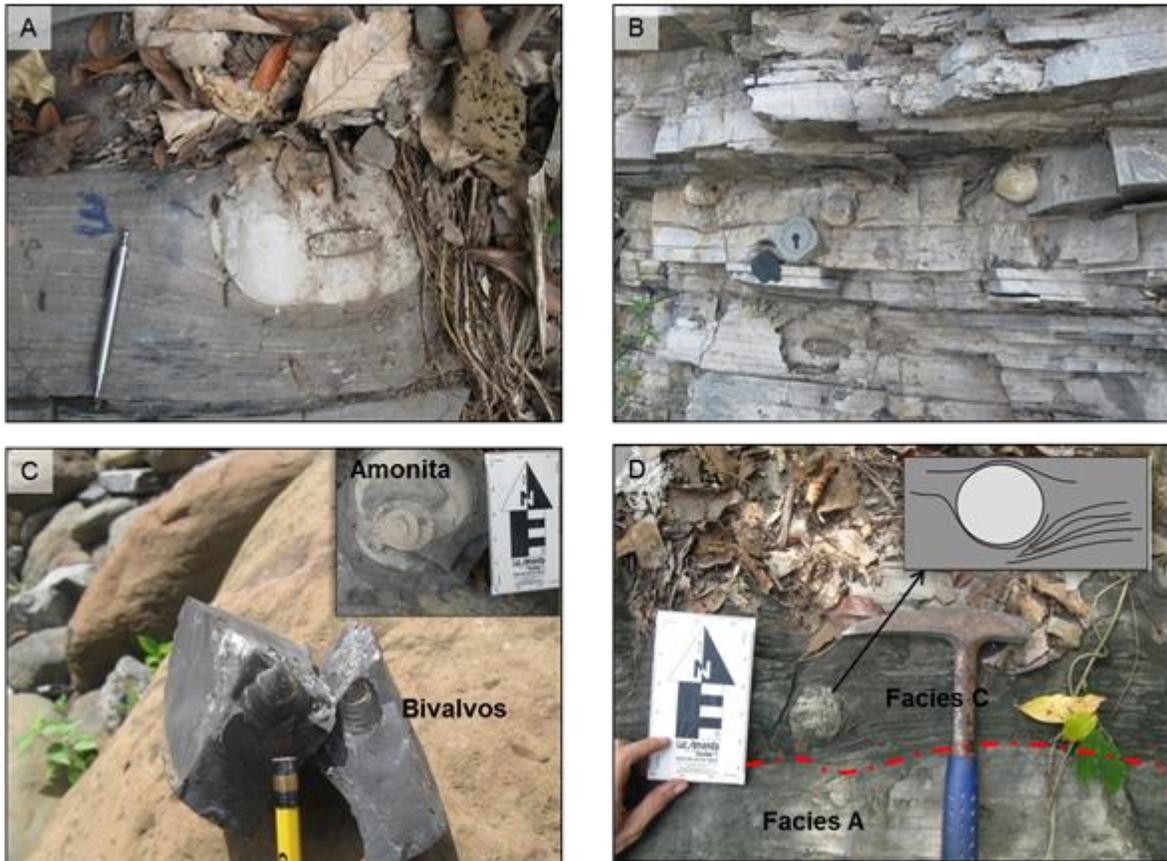
**Figura 5.** Foto de afloramiento de la facies B. Se puede observar la variación estructural de masiva, lenticular, flaser y laminar (A), estructura laminar de la facies B (B), estructuras ripples y laminar (C) formada por la intercalación de fragmentos de bioclastos y arcillas.



La facies C también se observó principalmente en capas de arcillolitas de color gris oscuro (N3) cuando está bien preservado a gris pardo cuando se encuentra alterada, intercalada con arcillolitas ricas en materia orgánica fosilíferas. Las arcillolitas infrayacen y suprayacen capas en contacto irregular en la parte inferior y superior. La Facies C (Figura 6) son capas de arcillolitas con concreciones que se forman en un estado de diagénesis temprana por enterramiento, donde se deforma la laminación preexistente, que en el momento del sobrecrecimiento de las concreciones se estaba litificando (Figura 6D). Estas concreciones son calizas subredondeadas que fueron completamente compactadas. Más de 30

concreciones fueron identificadas en todo el intervalo de base a tope de la sección Aguablanca.

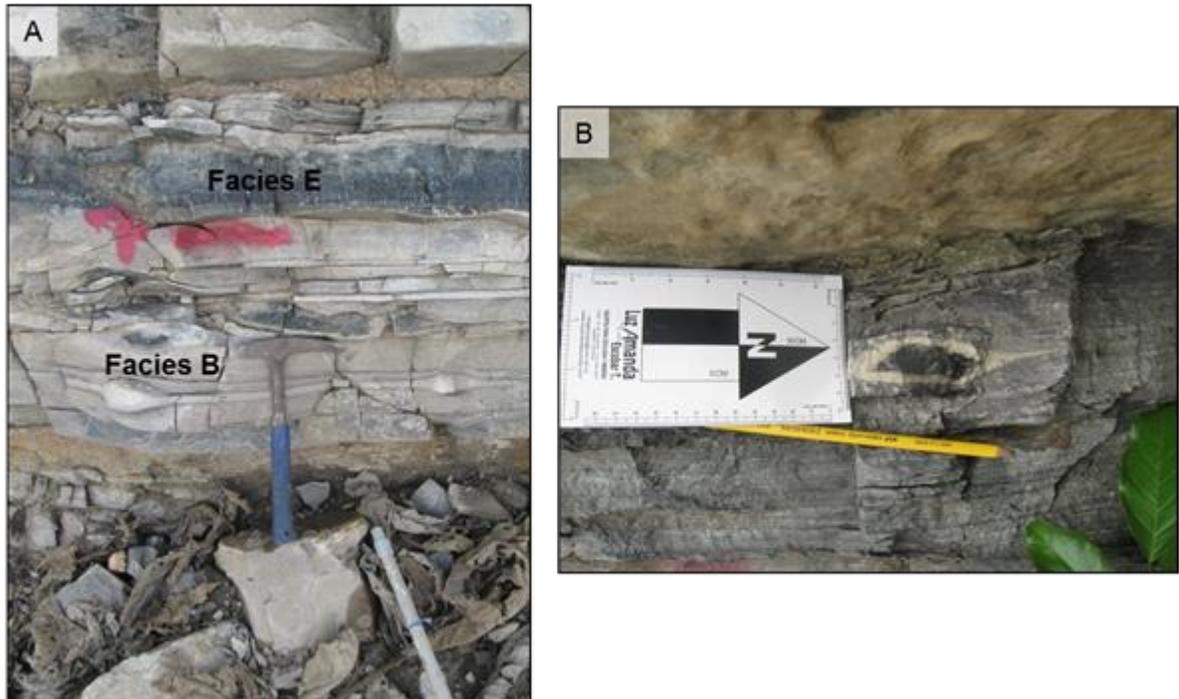
**Figura 6.** Foto de afloramiento de la facies C. (A) y (D) Concreción dentro de capa de arcillolita deformada por la compactación y sobrecrecimiento de las concreciones, en contacto infrayacente con capas de la facies A y B. Se pueden observar concreciones de diámetros iguales dentro de una misma capa (B). Se observan bivalvos y amonitas dentro de las concreciones.



El rango en espesor de las concreciones es de 2 cm a 30 cm con un promedio de 10 cm, la mayoría de concreciones tienen pirritas, fósiles como bivalvos y amonites (figura 6C). El color de las concreciones tiene un rango de gris muy claro (N8) a gris claro medio (N6). La facies C comprende el 4% de la sección.

En menos proporción se observaron las concreciones en facies de Wackestone con leves laminaciones y que se encuentran en contacto con capas con mayor contenido calcáreo.

**Figura 7.** Foto de afloramiento de la Facies D. (A) las capas están en contacto irregular neto con las capas infrayacentes y suprayacentes (B) lentes de arcillolita sílicea dentro capas de arcillolita ricas en materia orgánica.

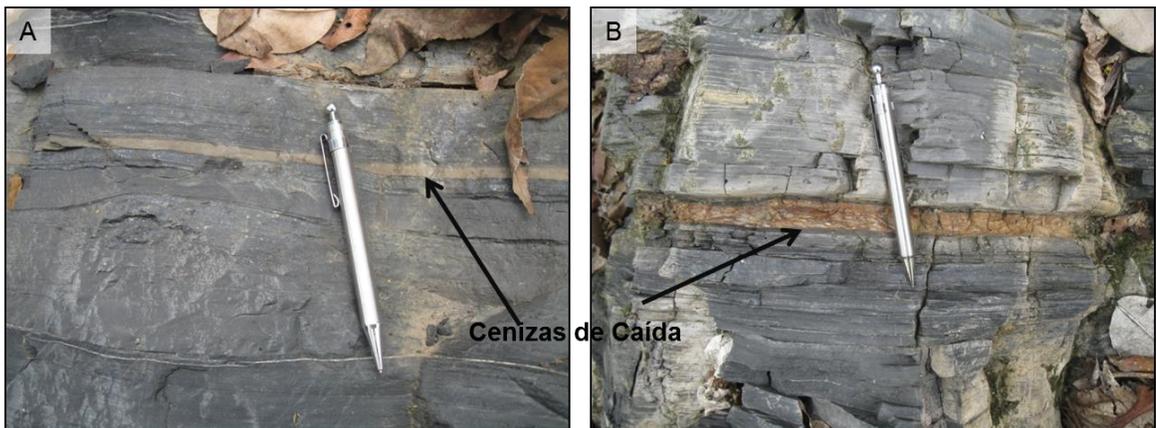


Las Arcillolitas Síliceas con Foraminíferos (Facies D) se caracterizan por el contenido de cuarzo microcristalino, el moderado contenido de foraminíferos y la estructura sedimentaria maciza. La Facies arcillolitas síliceas consiste de capas de geometría tabular con espesores 5 a 10 cm (Figura 7A). La reacción con HCL es muy baja. Las capas de arcillolitas síliceas son solo el 1% y se encuentran principalmente en el tope de la sección. Las capas tienen un rango de color negro grisáceo (N2) a gris oscuro (N3), son de 5 cm a 15 cm de espesor y se encuentran intercaladas por capas de la Facies B (arcillolitas ricas en materia orgánica muy fosilíferas). El contacto entre las capas infrayacentes y suprayacentes de las arcillolitas ricas en materia orgánica fosilíferas son irregulares y netos (Figura 7).

La Facies E representa menos del 1% de capas en el intervalo de la sección Aguablanca. La roca consiste de predominantemente de partículas tamaño arcilla que no reacciona con el HCL. La facies E son capas muy delgadas de 1cm a 2 cm

de espesor de color naranja amarillento pálido (10YR 8/6) con motas de color naranja muy pálido (10YR 8/2). Las capas de la facies E se encuentran en contacto neto plano con la Facies B. Esta roca tiene una larga extensión y continuidad lateral a pesar de su poco espesor, tiene poca dureza comparado con las capas que la suprayacen e infrayacen y se disgregan con facilidad (Figura 8). En algunas capas en la parte suprayacente, se presenta mayor contenido de sílice y en las capas infrayacentes, de contenido arcilloso se observa pequeñas ondulitas o turbación de la laminación producto del movimiento tectónico generado por el volcán en el momento de la erupción (Figura 8B). El color naranja pálido observado es posiblemente porque las cenizas de caída son fácilmente alteradas por la meteorización.

**Figura 8.** Foto de afloramiento de la Facies E. (A) y (B) capas muy delgadas de cenizas de caída entre capas delgadas y gruesas de arcillolitas ricas en materia orgánica fosilíferas.



## **5.2. DESCRIPCIÓN DE SECCIONES DELGADAS Y SEM**

Se contaron 300 puntos de 27 secciones delgadas y se hizo análisis cualitativo de 2 secciones delgadas adicionales y de 8 muestras con análisis de SEM, que revelan la composición y textura del miembro Pujamana en la sección Aguablanca, San Vicente de Chucuri, Santander. En la Tabla 2 se representa el análisis modal detallado. Los datos texturales de las Facies A, B y D resulta de la determinación del tamaño de grano hecho del conteo de 200 puntos en las secciones delgadas. El análisis textural de las conchas de la facies A y B es por análisis visual de muestras de mano y las secciones delgadas. En la facies de las concreciones (Facies C) no se presentan datos texturales porque este consiste en su mayoría de calcita diagenética que contiene fósiles indiferenciados.

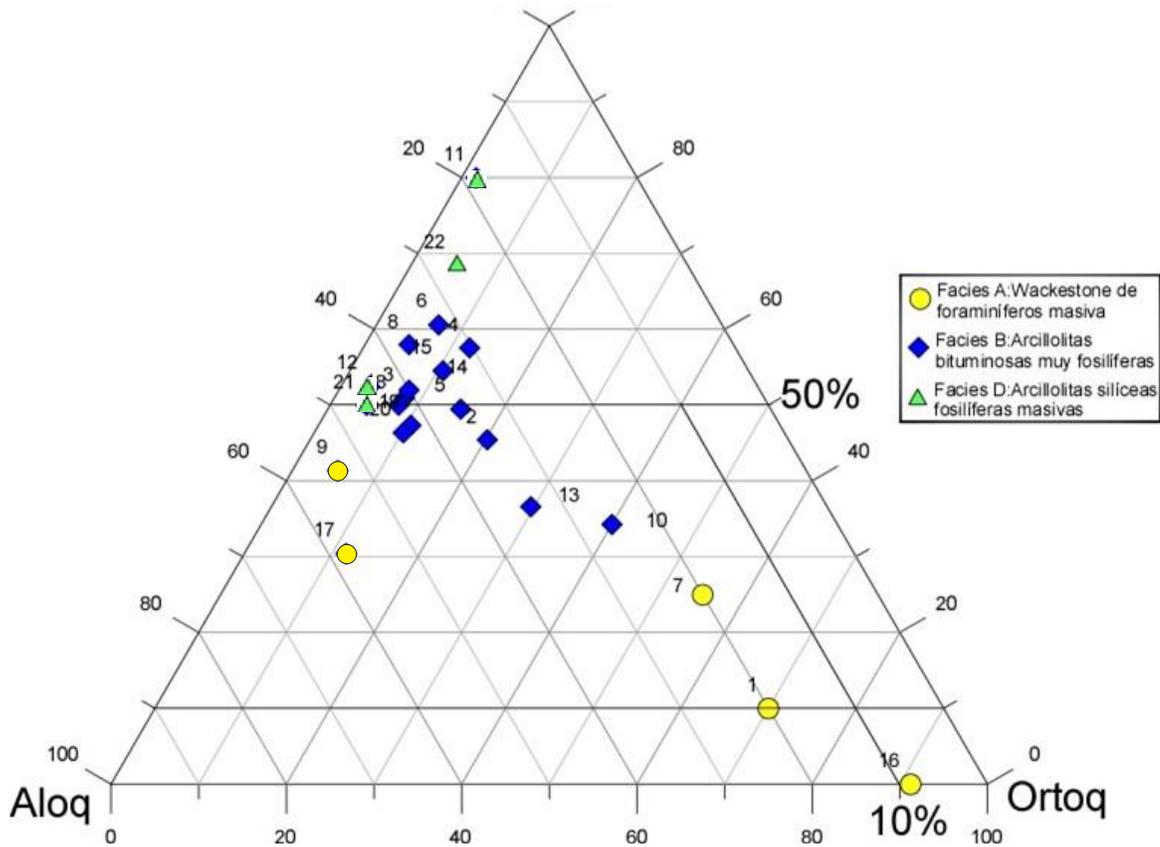
### **5.2.1. Textura**

Para la definición textural de las petrofacies, se tuvo en cuenta el tamaño de grano, disposición y frecuencia de la laminación, (ver Tabla 2). Las láminas están conformadas por aglomerados de bioclastos (foraminíferos planctónicos principalmente) intercalada con una matriz de mineralogía arcillosa, silíceas, calcárea ó mezcla de todas.

### **5.2.2. Composición**

Las variaciones composicional más representativas encontradas en las muestras son: los terrígenos, los aloquímicos y ortoquímicos. El material calcáreo consiste de dolomita romboedral, micrita, foraminíferos, espículas de esponja calcáreas, bioclastos calcáreos y cemento calcáreo. La mineralogía silícea incluye espículas de esponjas, bioclastos rellenos de cuarzo microcristalino y criptocristalino, granos de cuarzo y de chert, matriz silícea y cemento. Se observaron otros minerales accesorios que comprenden menos del 3% e incluyen feldespatos, pirita, circones, granos opacos y granos de fosfatos.

**Figura 9.** Ubicación de las muestras analizadas de la Sección Aguablanca según el diagrama de clasificación para híbridas



Fuente: Según Folk (1974).

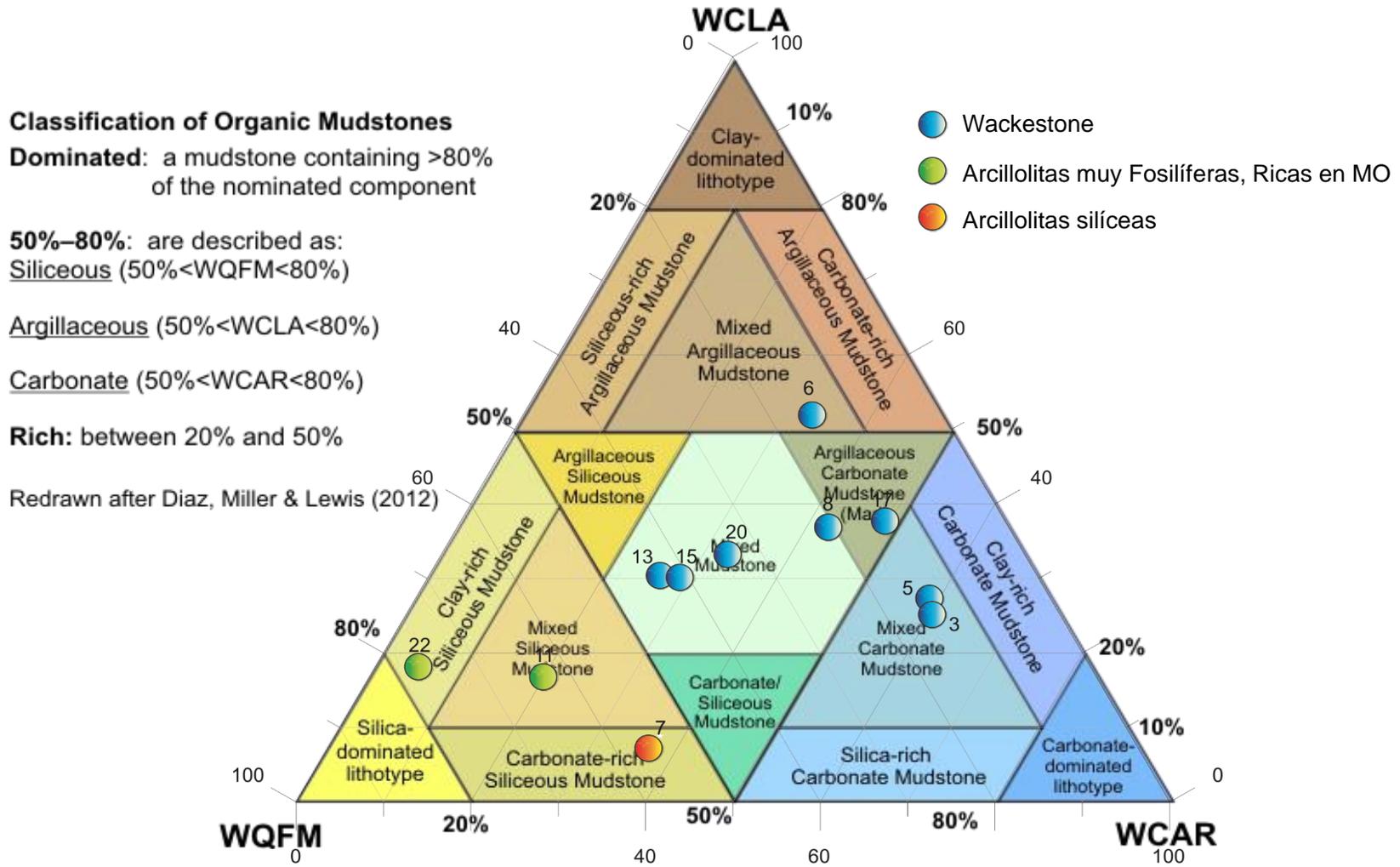
### 5.2.3. Facies A

La facies es maciza a levemente laminar, su composición es en su mayoría aloquímicos y ortoquímicos impuros (Figura 9). La laminación disminuye a medida que aumenta el contenido calcáreo de la roca. Está conformada por mineralogía calcárea que incluyen cantidades trazas a escasas de micrita (Tr-3%), microesparita 52% al 78%, pseudoesparita en trazas al 3%. El contenido de mineralogía arcillosa es de cantidades comunes (6 al 8 % en peso), mineralogía silíceas se obtuvo en cantidades comunes (18 al 17 % en peso) y la mineralogía calcárea según datos de DRX se encuentra en cantidades abundantes (73 a 74 % en peso), Figura 10. Esta facies se presenta en la mayoría de la sección, pero principalmente se observa en la base de la sección con los mayores espesores. La

Facies A tiene un contacto basal irregular neto. Este es rico en foraminíferos y bioclastos.

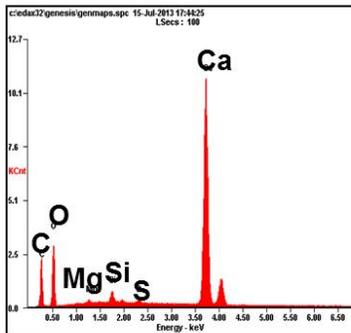
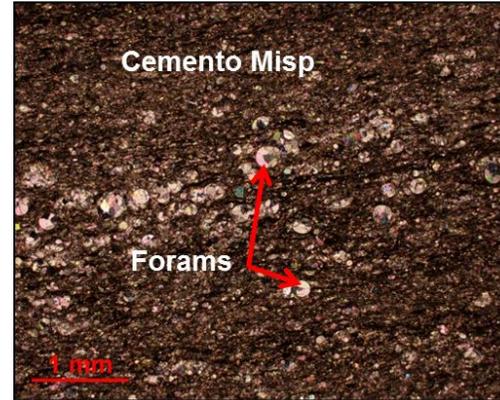
La Facies A se caracteriza por la estructura maciza, alto contenido de foraminíferos y en menos proporciones espículas de equinodermos, bivalvos y bioclastos reemplazados por calcita y pirita (Figura 11 y Figura 12F), la materia orgánica se encuentra en aglomerados embebidos en cemento calcáreo. La mayoría de los foraminíferos aparecen orientados en su eje más largo (Figura 12B y 12E), lo cual es debido al corte transversal de la sección. Los foraminíferos aglutinados se encuentran formando floculos unidos por lodo calcáreo que en la mayoría de los casos sufrió diagénesis y recristalización por neomorfismo (microesparita y pseudoesparita). Esta facies representa un cambio de ambiente depositacional más somero que las facies B y D, con mayor abundancia de foraminíferos y donde la calcita en la matriz es de origen autigénico (Figura 12C), como se observa en las imágenes de SEM de cristales de calcita bien formados.

Figura 10. Datos de difracción de rayos-X usando los datos del Bulk. Obsérvese la clasificación de las muestras según la composición

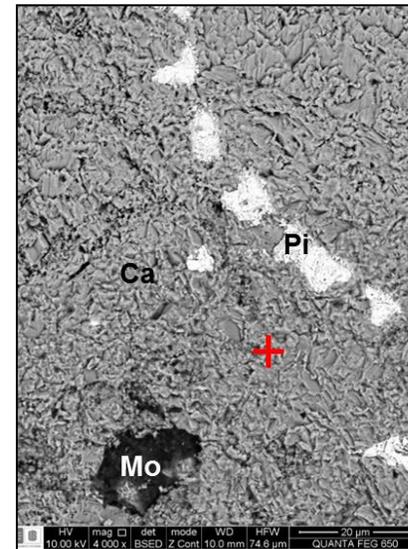


. Fuente: Modificado de (Díaz, Miller y Lewis, 2012).

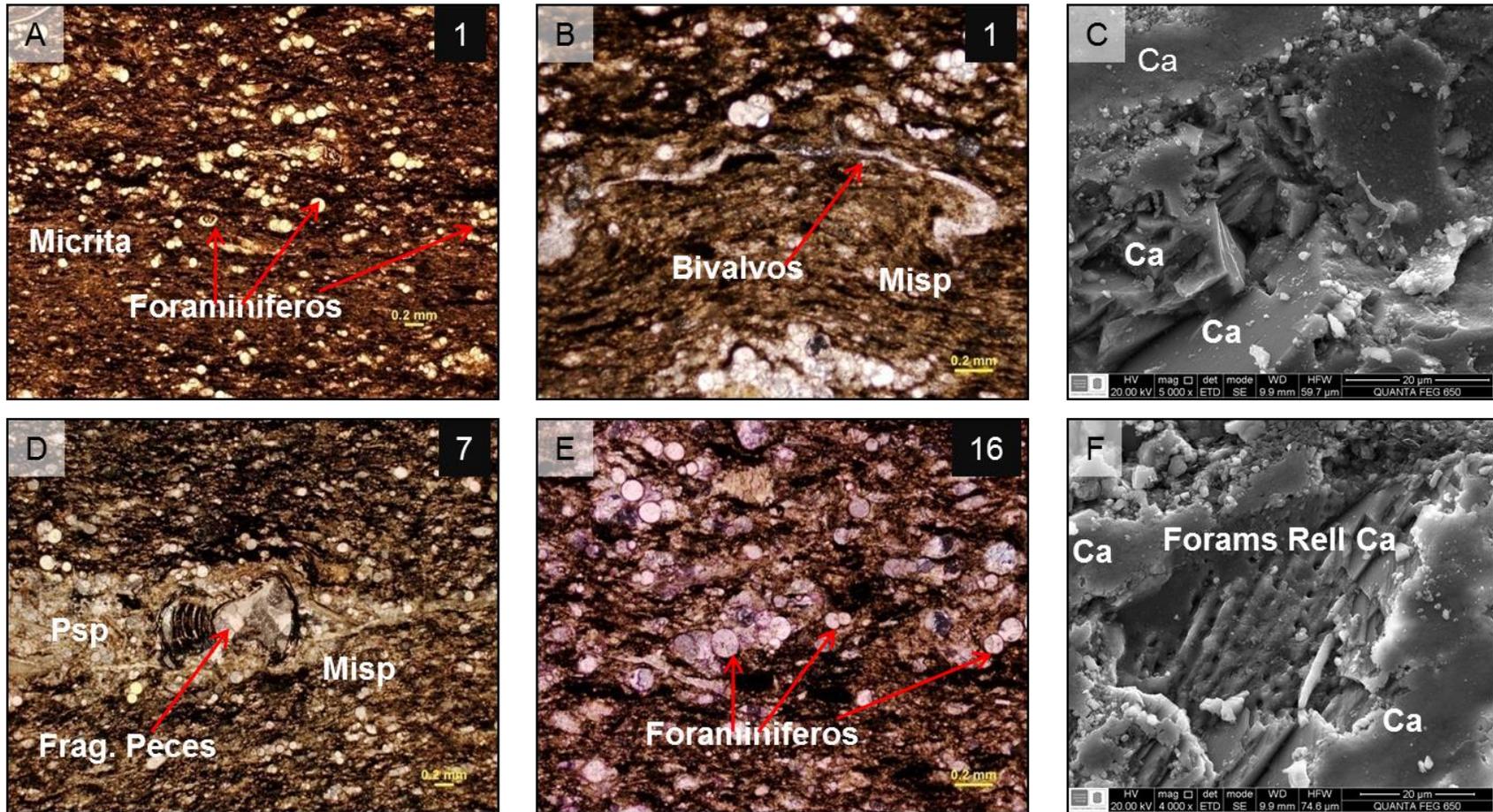
**Figura 11.** Fotografías y microfotografías de la facies A. La cruz roja ubica el lugar de la medición del difractograma que da como resultado principalmente calcita en la matriz. Además de la pirita reemplazando foraminíferos y la materia orgánica aglutinada. Misp: Microesparita; Mo: Materia orgánica; Pi: Pirita; Ca: Calcita.



Element	Wt%	At%
OK	38.47	50.46
MgK	00.57	00.49
SiK	01.51	01.13
SK	00.38	00.25
CaK	45.37	23.75
Matrix	Correction	ZAF



**Figura 12.** Fotomicrografías de la litofacies A de la sección Aguablanca. (A), (B), (D) y (E) Alto contenido de calcita en la matriz, y relleno foraminíferos y bioclastos. (C) cristales de calcita y (F) poros en las caparazón de los foraminíferos reemplazada por calcita. Misp: Microesparita; Psp: Pseudoesparita; Mi: Micrita; Ca: Calcita.



#### 5.2.4. Facies B

Las arcillolitas fosilíferas ricas en materia orgánica de la Facies B constituyen el 64% de la sección Aguablanca. Estas rocas están compuestas principalmente de mineralogía arcillosa con materia orgánica que se encuentra principalmente en la matriz (Figura 13). La petrografía y el análisis mineralógico indican que la principal composición es arcillas y calcita, este último se encuentra formando floculos de carbonato en la matriz y rellenando foraminíferos, formando laminaciones discontinuas. Las arcillolitas fosilíferas ricas en materia orgánica contienen trazas a cantidades menores (Tr – 7 % en peso) de mineralogía arcillosa, (36 – 73 % en peso) de mineralogía calcárea (representada en su mayoría por foraminíferos, fragmentos de gasterópodos y bioclastos) y menos del 9 % en peso de mineralogía silícea. Los componentes biogénicos comunes son los foraminíferos aglutinantes (0% al 40%) y bioclastos indiferenciados (trazas al 26%). Los pocos fragmentos de conchas y bioclastos indiferenciados son de composición calcárea y muestran evidencias de deformación y rompimiento durante la compactación (Figura 14A y 14C). Las imágenes analizadas de SEM muestran algunos cocolitos y fragmentos de espículas rotos (Figura 17B y 17C), además se puede observar que la Facies B presenta sedimentación hemipelagica rica en calcita y con baja preservación de nanofósiles. La pirita en esta facies se encuentra principalmente en forma framboidal y dispersa (Figura 16D). La microfabrica muestra floculos de illita (Figura 15C), las arcillas se encuentran en contacto cara-cara (figura 15C) en columnas de agua marina hemipelagica y borde-borde en los floculos debido a la atracción electroestática según (Scheiber et al., 2007).

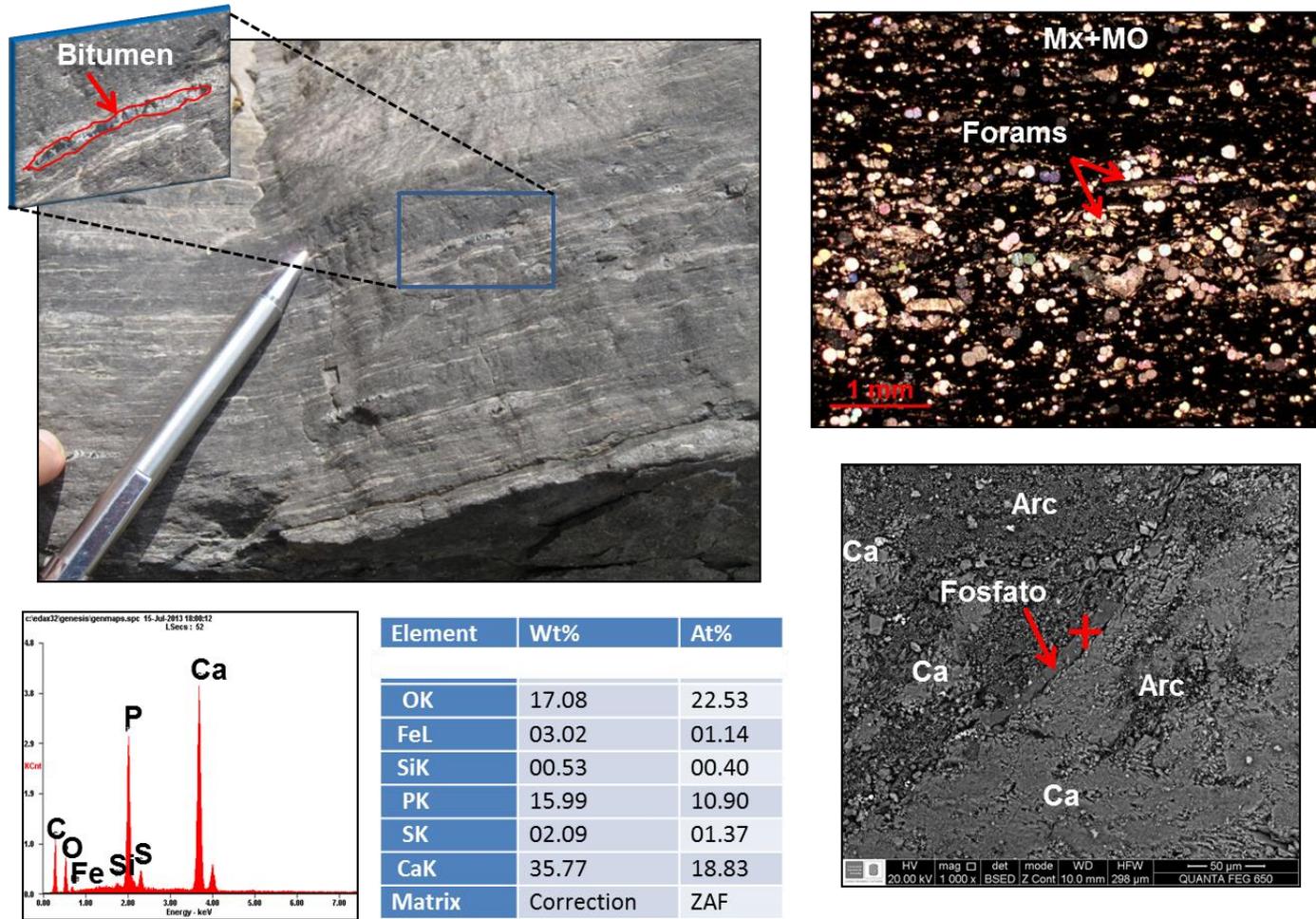
El sílice se encuentra en la matriz tamaño arcilla y en los lentes de cuarzo microcristalino (Figura 15A), estos lentes son de origen autigénico. El componente silíceo de la matriz es evidenciado por los porcentajes moderados a altos reportados por el análisis de DRX en roca total que varía de 42% (muestra 13) a 14 % en peso (muestra 5). En ninguna de las muestras se observó cuarzo terrígeno mayor o igual a tamaño limo, por eso se infiere que el sílice reportado en

DRX hace parte de la matriz ( $<4\mu\text{m}$ ). Con estos resultados se puede deducir que en la medida que aumenta el componente silíceo, disminuye el componente calcáreo y arcilloso.

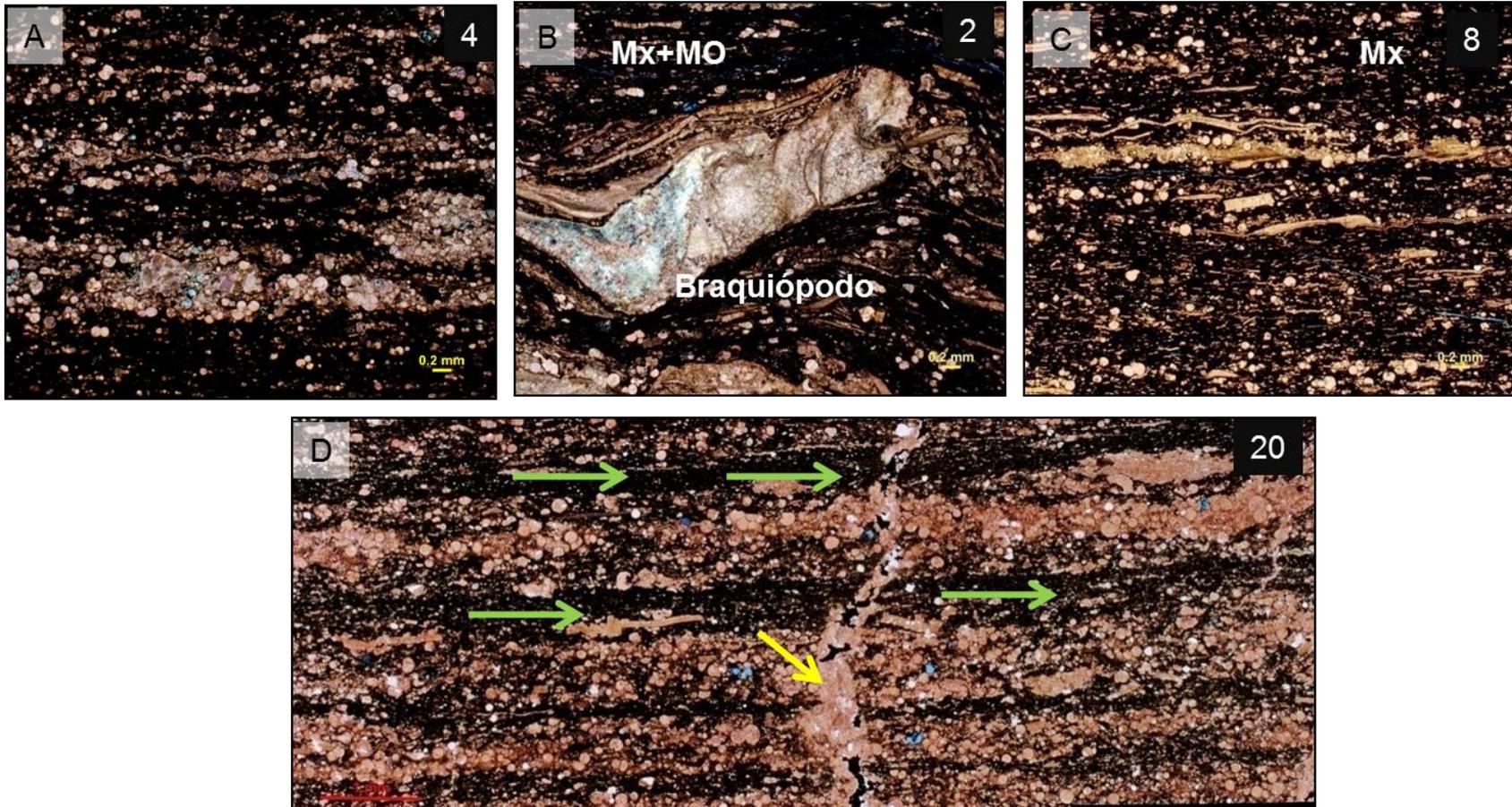
En las arcillolitas del tope de la sección se observó bitumen relleno las fracturas (Figura 14D) y algunos foraminíferos. Como minerales accesorios y trazas se encontraron fosfatos (Figura 13), barita y apatitos (Figura 17A y 17D).

El análisis de SEM, reporta composición silícea y minerales arcillosos (principalmente floculos de illita) en laminillas de bordes irregulares sin dirección preferencial a contacto cara-cara, microfabrica levemente planar y relativamente abierta.

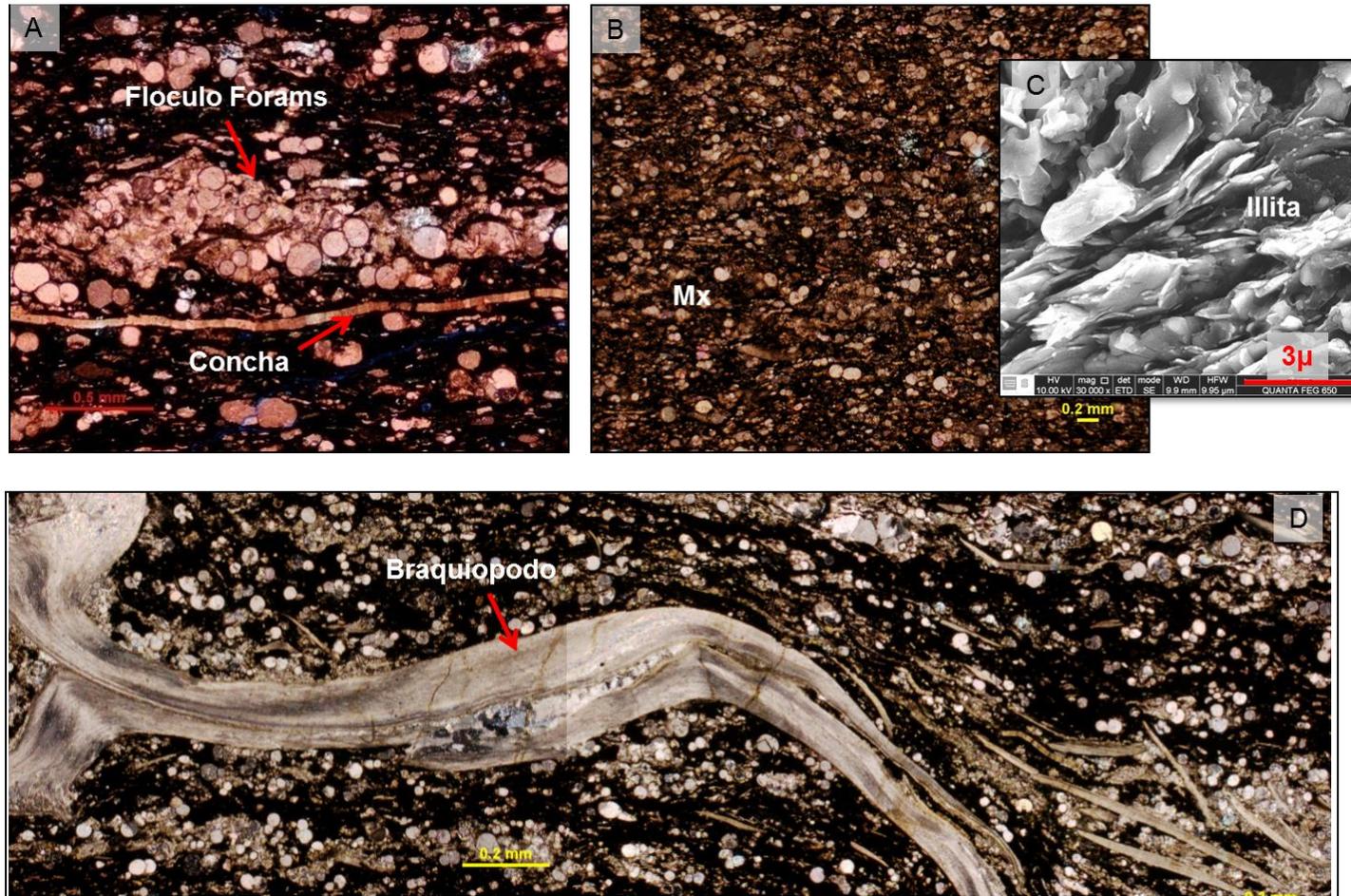
**Figura 13.** Fotografías y fotomicrografías de la facies B. La cruz roja ubica el lugar de la medición del difractograma que da como resultado principalmente fosfato. La materia orgánica se observó entre los fluculos de foraminíferos. Ca: Calcita; Arc: Arcilla; Mx: Matriz; MO: Materia Orgánica.



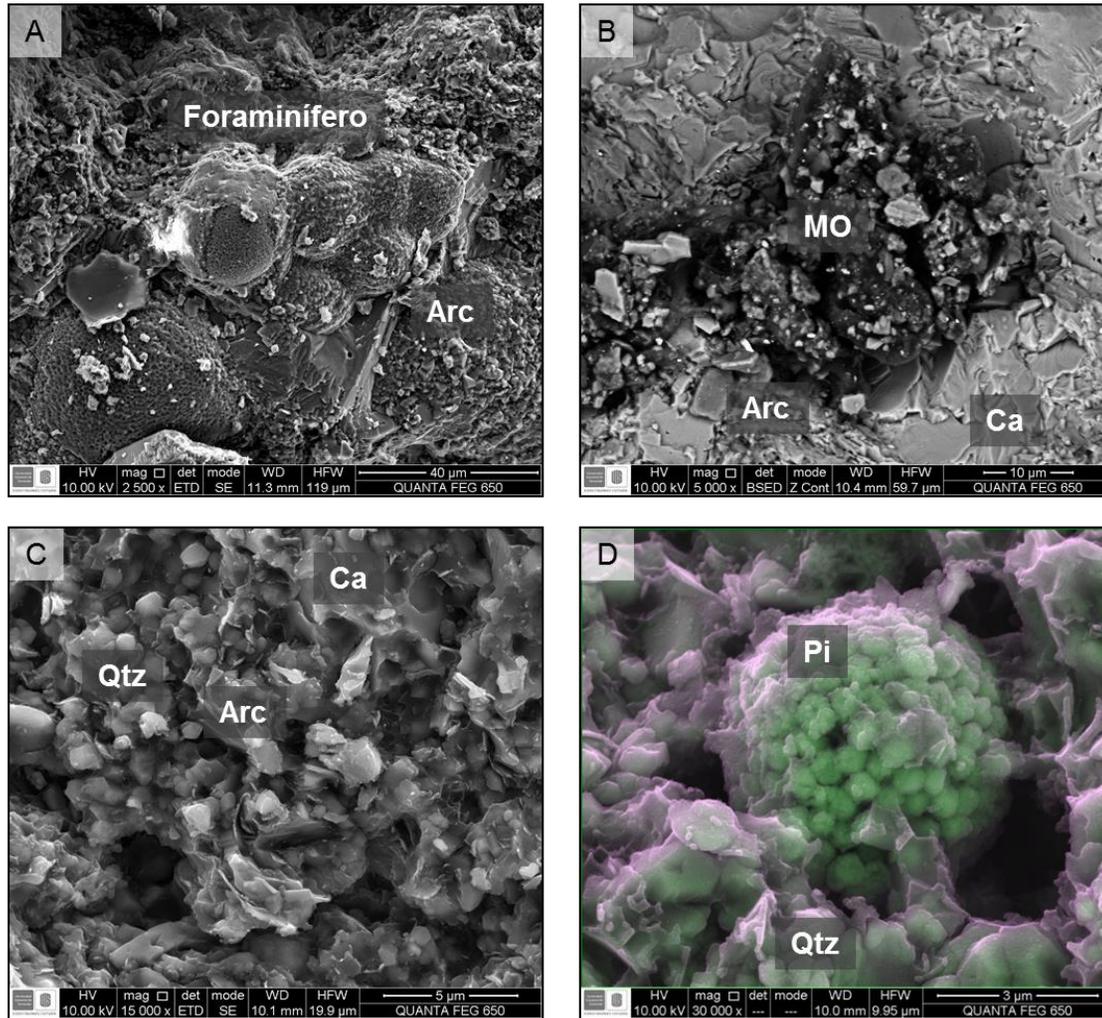
**Figura 14.** Fotomicrografías en luz polarizada plana de la litofacies B y C de la sección Aguablanca. (A) Obsérvese la intercalación de la matriz con materia orgánica y los aglomerados de foraminíferos, en el tope de la sección materia orgánica laminar. (B) y (C) Abundante materia orgánica en la matriz. (D) Obsérvese la microfractura (flecha amarilla) rellena de Ca y Mo, perpendicular a la laminación de las arcillas intercaladas con los floculos de foraminíferos (flecha verde).



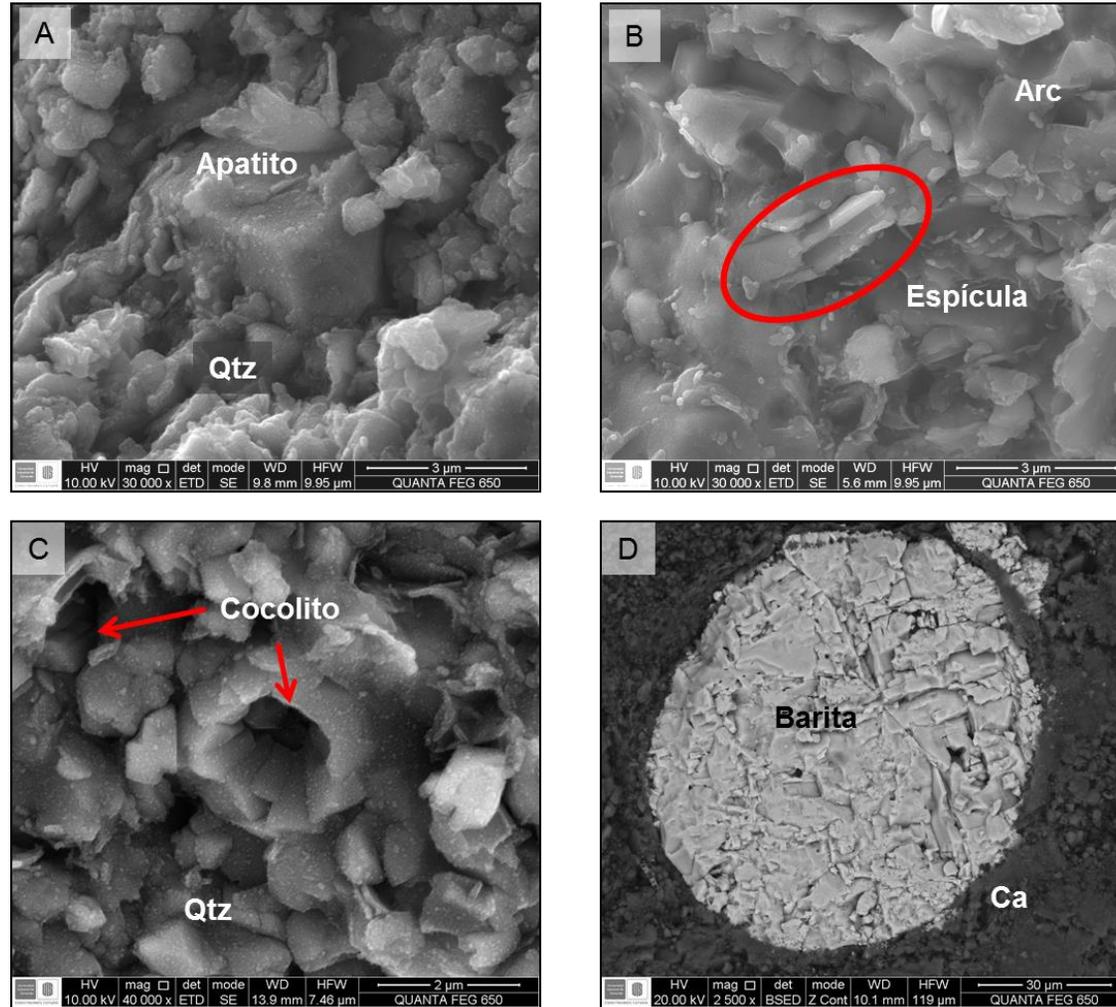
**Figura 15.** Fotomicrografías de la litofacies B de la sección Aguablanca. (A) Aglomerados de foraminíferos en una matriz rica en materia orgánica. (B) Obsérvese el alto contenido de foraminíferos en una matriz de mineralogía arcillosa en la muestra 5. (C) Imagen de SEM de la matriz compuesta principalmente de illita. (D) Braquiopodo en matriz arcillosa.



**Figura 16.** Imágenes de SEM de la microtextura y composición de la Facies B. (A) Foraminífero rodeado de matriz mezcla de mineralogía arcillosa y calcárea. (B) Materia orgánica cubierta por la matriz arcillosa. (C) Matriz compuesta de cuarzo, arcilla y calcita. (D) Pirita framboidal. Arc: Arcilla; Ca: Calcita; Qtz: Cuarzo; Pi: Pirita y Mo: Materia orgánica.



**Figura 17.** Imágenes de SEM de la microtextura y composición de la Facies B. (A) Apatito cubierto de cristales de cuarzos. (B) Espícula. (C) Cocolito reemplazado por sílice. (D) Foraminífero reemplazado por barita, nótese las microfracturas.

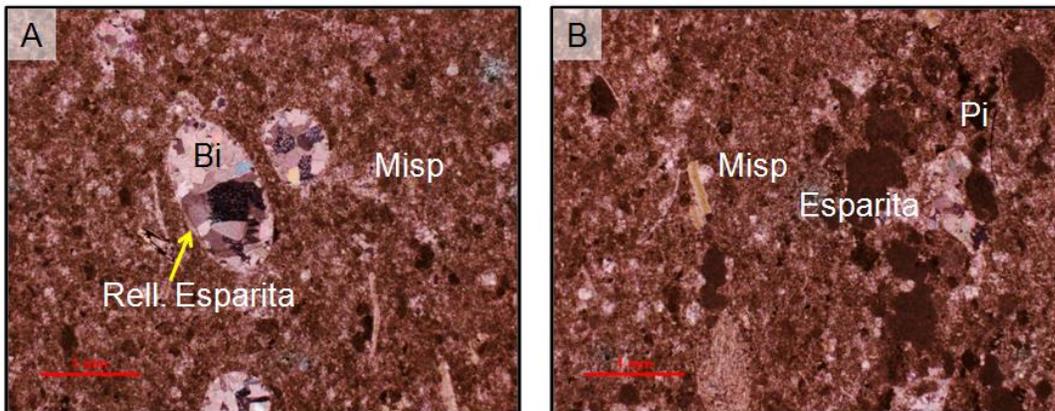


### 5.2.5. Facies C y E

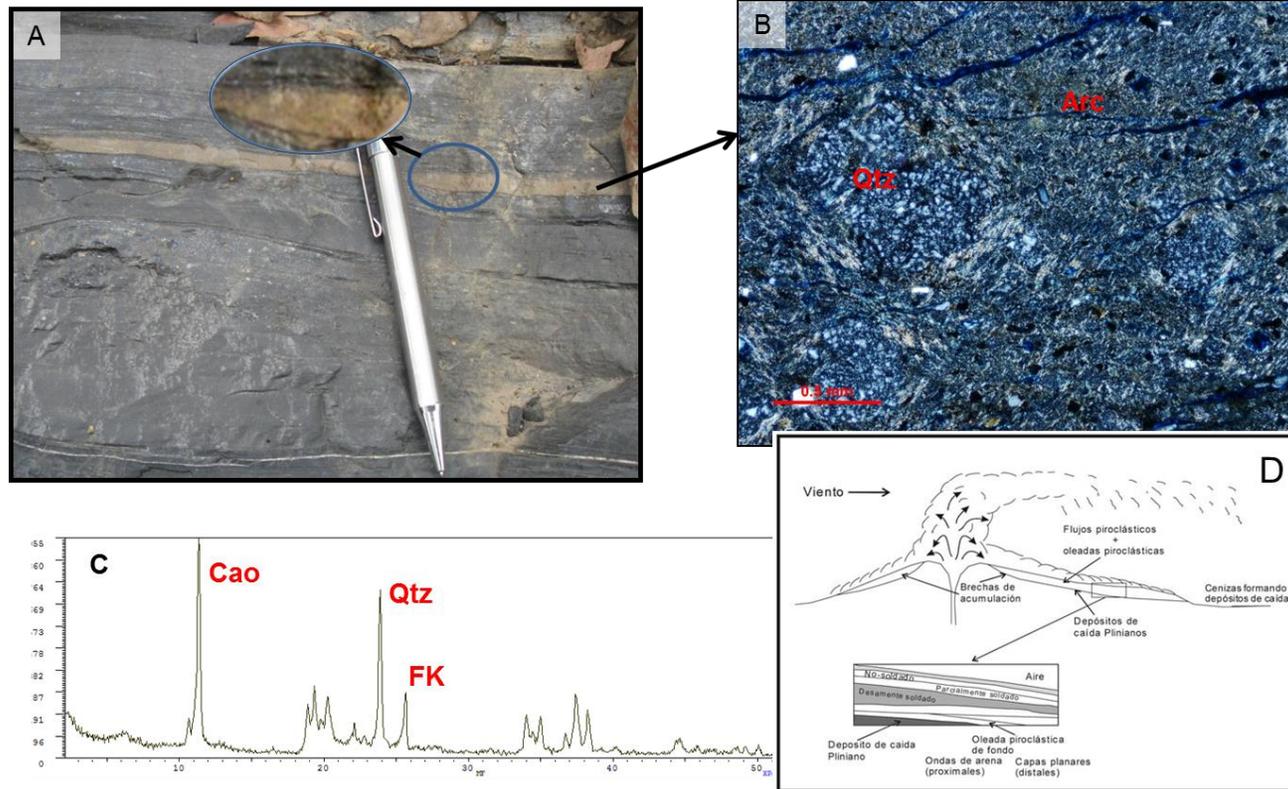
Las rocas de la Facies C constituyen un 5% de la sección Aguablanca consiste totalmente de microesparita y pseudoesparita. Dentro de las concreciones se observaron fragmentos de bioclastos rellenos de esparita (Figura 18). La inspección visual por medio de la petrografía, indica que la principal composición es calcárea, con algunos cristales de pirita y de materia orgánica. Las concreciones de composición microesparítica en la sección Aguablanca muestran un contacto neto con las arcillolitas de color oscuro de la Facies B.

La Facies E es la facies menos dominante del resto de facies, solo se observaron algunas capas en la base de la sección, las cuales tenían menos de 2 cm de espesor. Consiste de cristales microcristalino de cuarzo de hábito tabular (figura 19). Estas cenizas de caída pueden ser tobas, producto de erupciones volcánicas que arrojó granos finos de cenizas volcánicas que fueron transportados por el aire, para posteriormente caer sobre las aguas marinas y ser depositadas en el fondo. El contacto es neto con las capas infrayacenes de arcillolitas y de transición gradual con las capas que la suprayacen. En las secciones delgadas estudiada por descripción visual se observó pirita (5%), feldespato potásico (4%) y en trazas cristales de circón subidiomorfos (Figura 20). De esta muestra se hizo análisis de DRX que dio como resultado una matriz conformada principalmente por caolinita (ver Figura 16C).

Figura 18. Composición y textura de la Facies C. Bi: Bioclastos.



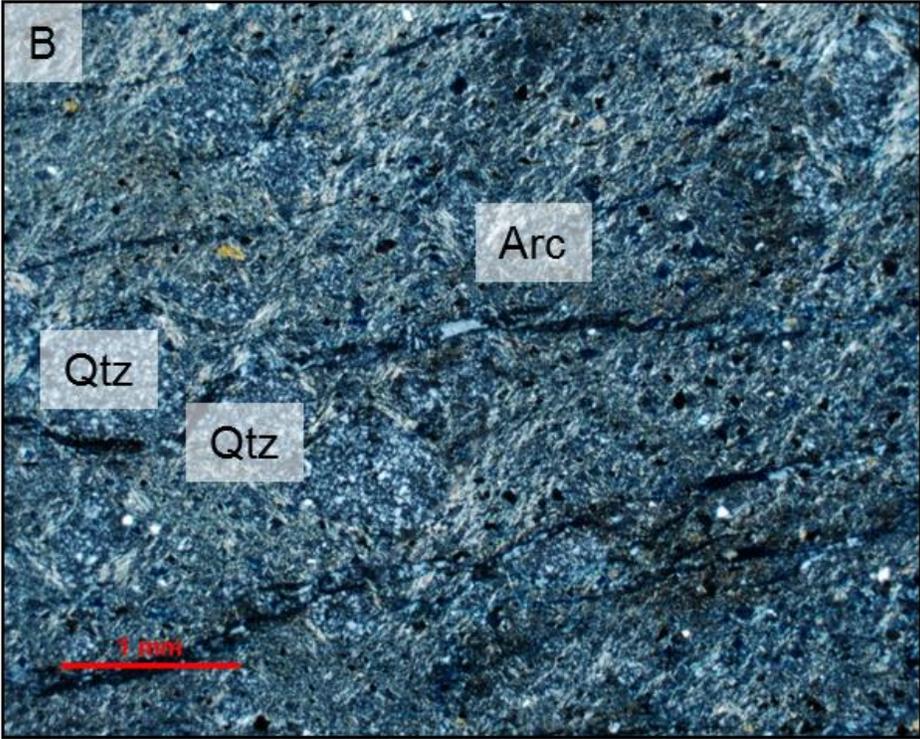
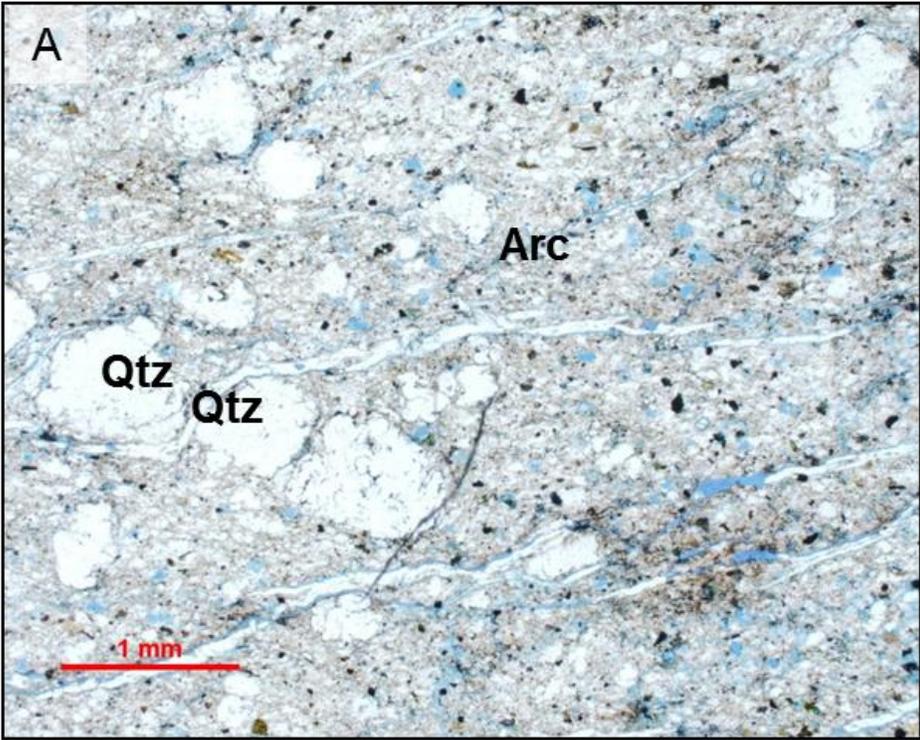
**Figura 19** Composición y textura de la facies E. (A) Facies E en afloramiento, obsérvese el contacto neto en la base y gradacional en el tope de las capas. (B) Cuarzo microcristalino rodeado de arcilla (Arc). (C) Difractograma dado por DRX muestra que la arcilla es principalmente caolinita (Cao). (D) Posible proceso del transporte de cenizas volcánicas a aguas marinas.



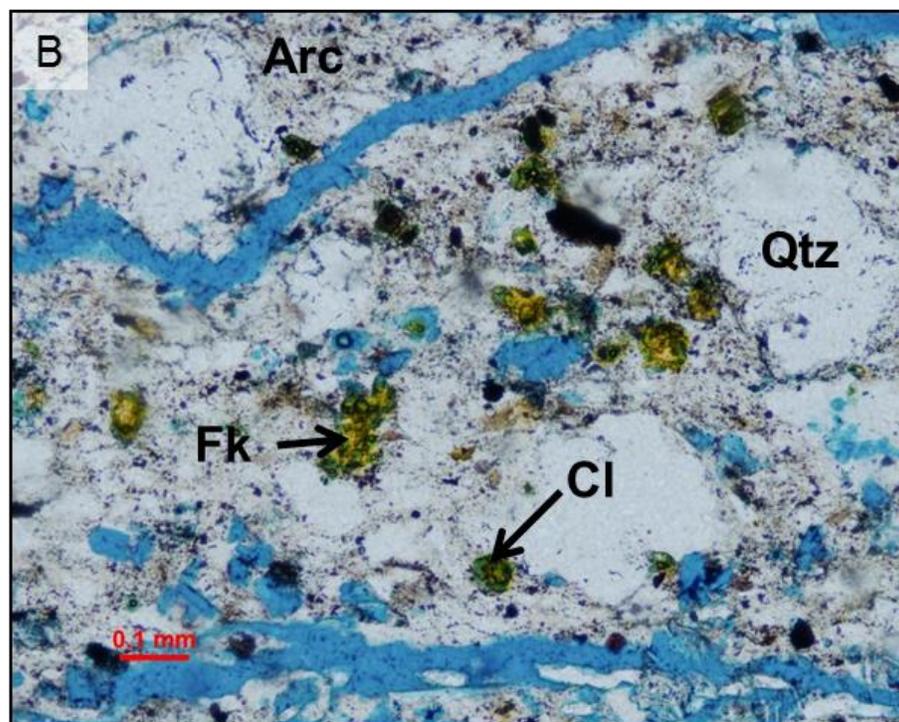
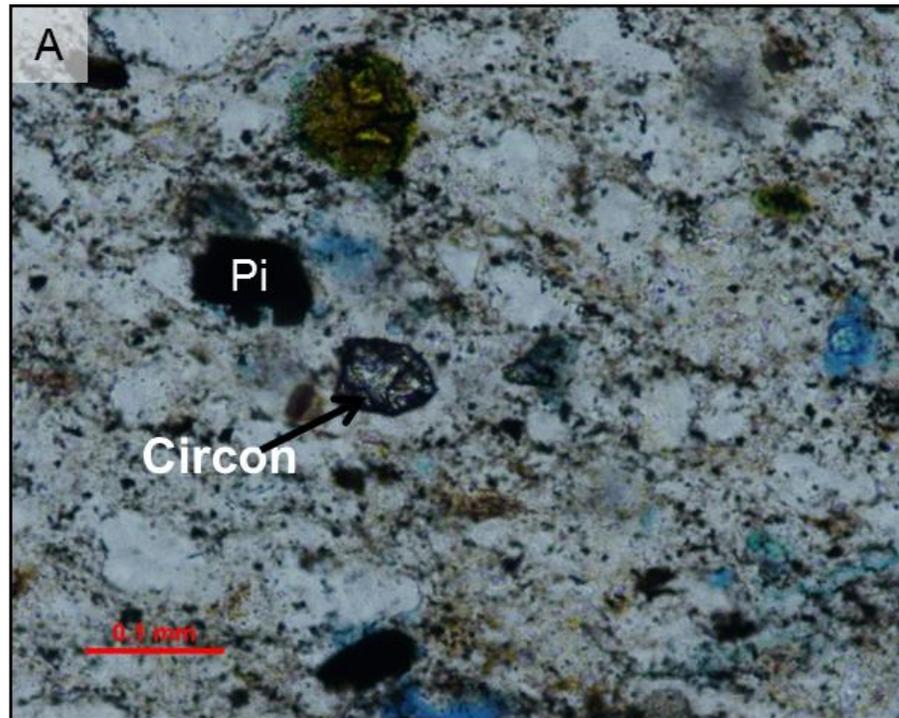
Tomado de Toselli, 2010

Fuente: Figura 19D tomada de Toselli, 2010.

Figura 20. A y B, composición y textura de la facie E.



**Figura 21.** Composición y textura de la Facie E. A) Minerales pesados y pirita en Cenizas de caída. B) Cristales de cuarzo, feldespatos potásicos y clorita en una matriz de caolinita disuelta por alteración.



### 5.2.6. Facies D

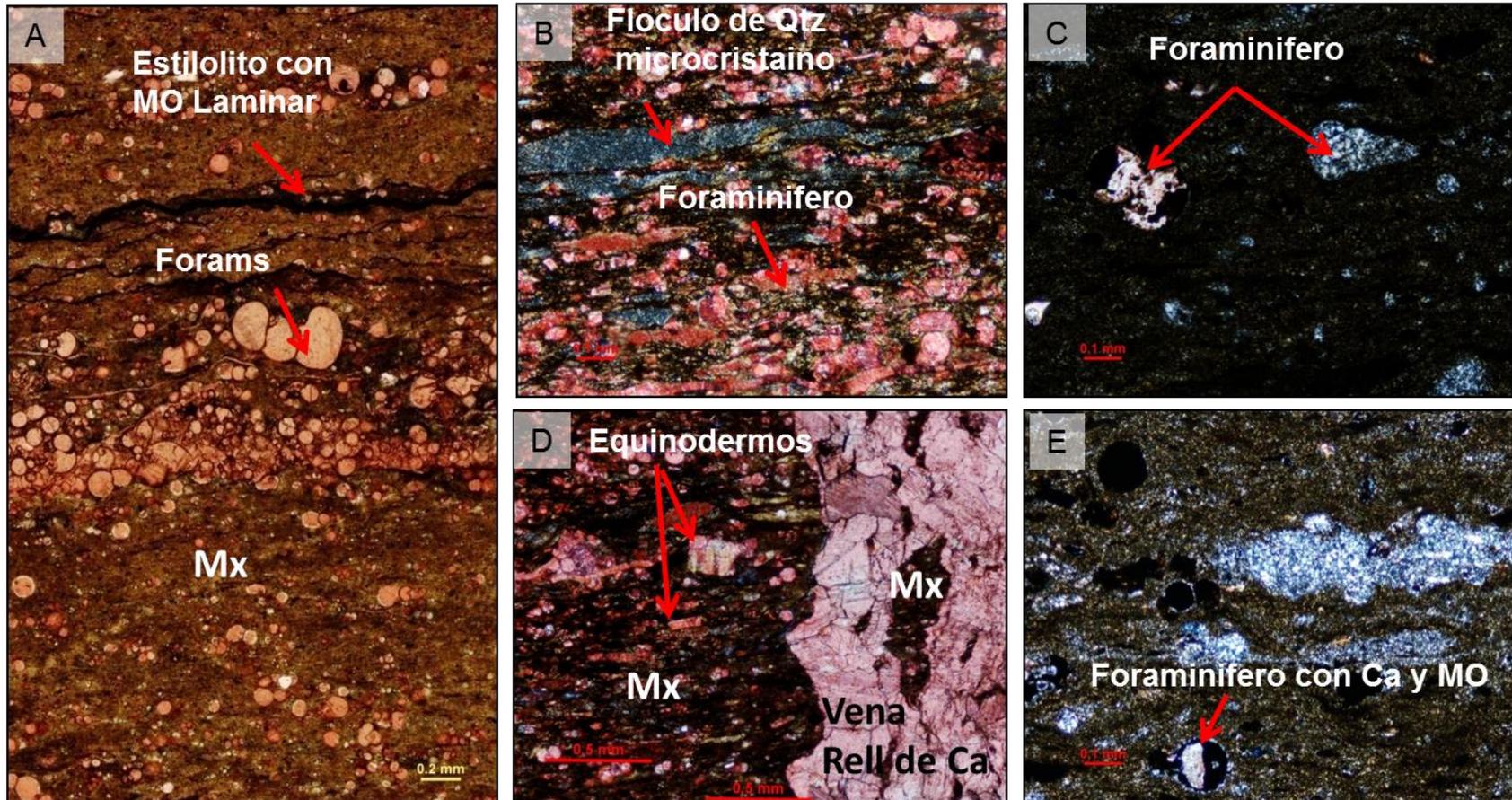
Las arcillolitas silíceas fosilíferas son masivas, su composición en su mayoría son minerales arcillosos y foraminíferos reemplazados por cuarzo microcristalino (figura 22B).

La matriz (65%) es de color marrón negruzco, compuesta por minerales indiferenciables a nivel petrográfico. Según el Análisis de DRX (Tabla 2), el porcentaje de arcillas en roca total es del 27% (% en peso). Tiene un componente silíceo soportado por el Análisis de SEM y por el Análisis de DRX en roca total alcanzando un porcentaje de 63 – 77 (% en peso).

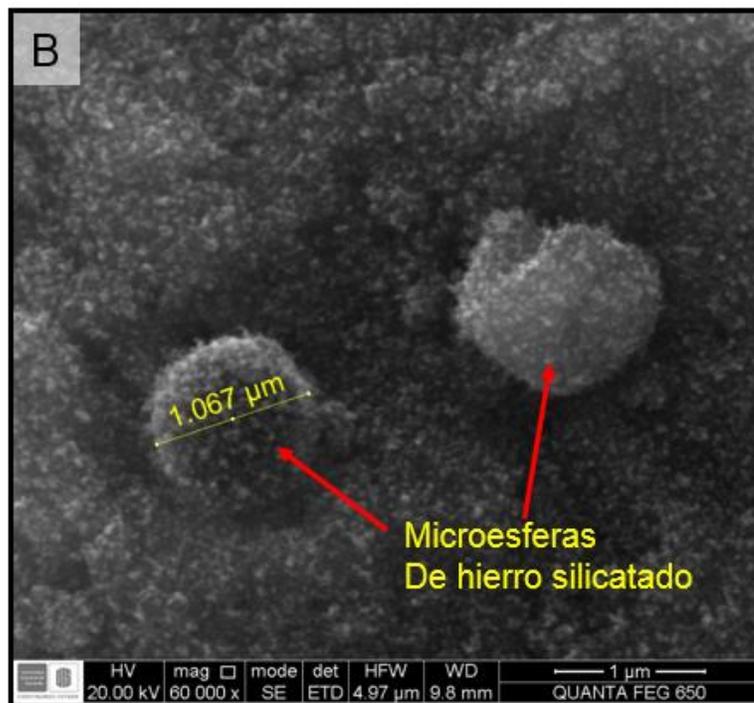
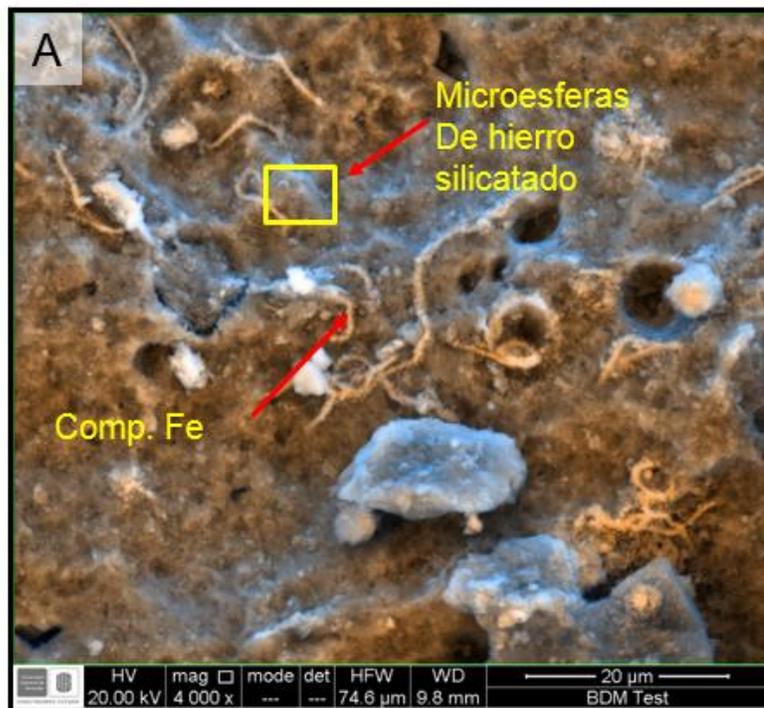
Las láminas ricas en arcilla son onduladas (Figura 22D) por la compactación alrededor de los componentes bioclásticos (foraminíferos planktonicos y bioturbación). Se resalta que la sílice autigénica microcristalina está asociada a los floculos de sílice (Figura 22 E), estos floculos son algo característico de esta facies, este se cuantifica en el cuarzo microcristalino reportado en el Bulk de análisis de DRX (promedio 70% relativo en peso), siendo los valores de cuarzo más alto reportado en el conjunto de muestras analizadas.

El análisis de SEM, reporta además de la composición silícea de la matriz, cristales de calcita euhedrales, y presencia de microesferas de composición silícea (Figura 23A), además de bioclastos de compuestos de Fe (Figura 23B).

**Figura 22.** Composición y textura de la Facies D. A) Arcillolita silícea con estilolitos tipo paralelos a anastomosados rellenos de MO. B y E) Lentes de cuarzo microcristalino. C y E) Foraminíferos planctónicos rellenos de cuarzo microcristalino y calcita con materia orgánica. D) Microfracturas rellenas de carbonato de calcio (seudoesparita y esparita).



**Figura 23** Composición y textura de la Facies D. A) Espacios dejados por los foraminíferos y rellenos por materia orgánica. B) Microesferas hierro silicadas de origen volcánico.



## **6. DISCUSIÓN E INTERPRETACIÓN**

### **6.1. TIPO DE GRANO Y AMBIENTE DE DEPOSITACIÓN**

Los diferentes tamaños de granos encontrados en la sección Aguablanca corresponden a: bioclastos calcáreos, bioclastos silíceos, granos de cuarzo e intraclastos (rip-up). Los foraminíferos planctónicos son los más comunes a abundantes (15%-40%); en cantidades menores se observaron conchas de bivalvos y bioclastos indiferenciados (8%-10%); y en cantidades escasas equinodermos (< 5%). Los fragmentos de fósiles calcáreos se observan principalmente en la facies A y en las otras facies (B y D) en cantidades menores. Los fragmentos de fósiles reemplazados por chert (Figura 22C y 22E) y fosfato fueron observados hacia la parte media superior de la sección Aguablanca en baja abundancia relativa. Los granos de cuarzo se presentaron en cantidades trazas (<1%), son principalmente subangulares a subredondeados, de tamaño limo, no se observa en laminaciones, si no granos flotantes aislados en la matriz arcillosa (Figura 21A) de la facies E.

Los intraclastos arcillosos o de materia orgánica, están presentes en cantidades trazas (<3%), principalmente hacia la parte inferior de la Sección. Son de tamaño limo a gránulos, de color gris oscuro a claro y muestran evidencia de compactación (Figura 13).

Los fósiles presentes en la sección Aguablanca muestran un paleoambiente de depositación predominantemente marino profundo. Leves cambios pueden generar variaciones relativas en la proporción de material terrígeno, precipitación en la materia orgánica y alteraciones diagenéticas.

#### **Facies A**

La Facies A es un Wackestone de Foraminíferos, macizo a levemente laminar, se infiere que se depositó en aguas profundas, quietas, donde hay bajo suministro de sedimentación, en áreas de baja energía de sedimentación hemipelagica, donde

se aglutinan principalmente foraminíferos y hay una restricción de producción de estos organismos (Potter, 2005). El ambiente probablemente sea en la parte media baja del Foreslope, entre la ladera submarina y la cuenca, donde cambia de condiciones dysoxicas a anoxicas. Esta facies se presenta principalmente hacia la parte inferior de la sección Aguablanca (Potter, 2005).

La microesparita de la matriz indica una alteración diagenética posiblemente por el neomorfismo del lodo calcáreo (micrita), posterior a la depositación y en los inicios del enterramiento somero (ver Figura 24). Los wackestone de foraminíferos ocurren en zonas ricas en carbonato y pobres en materia orgánica. Presenta estilolitos de gran amplitud paralelos a subparalelos a la laminación, formados en la compactación química por el enterramiento intermedio y la ventana de generación del hidrocarburo.

### **Facies B y D**

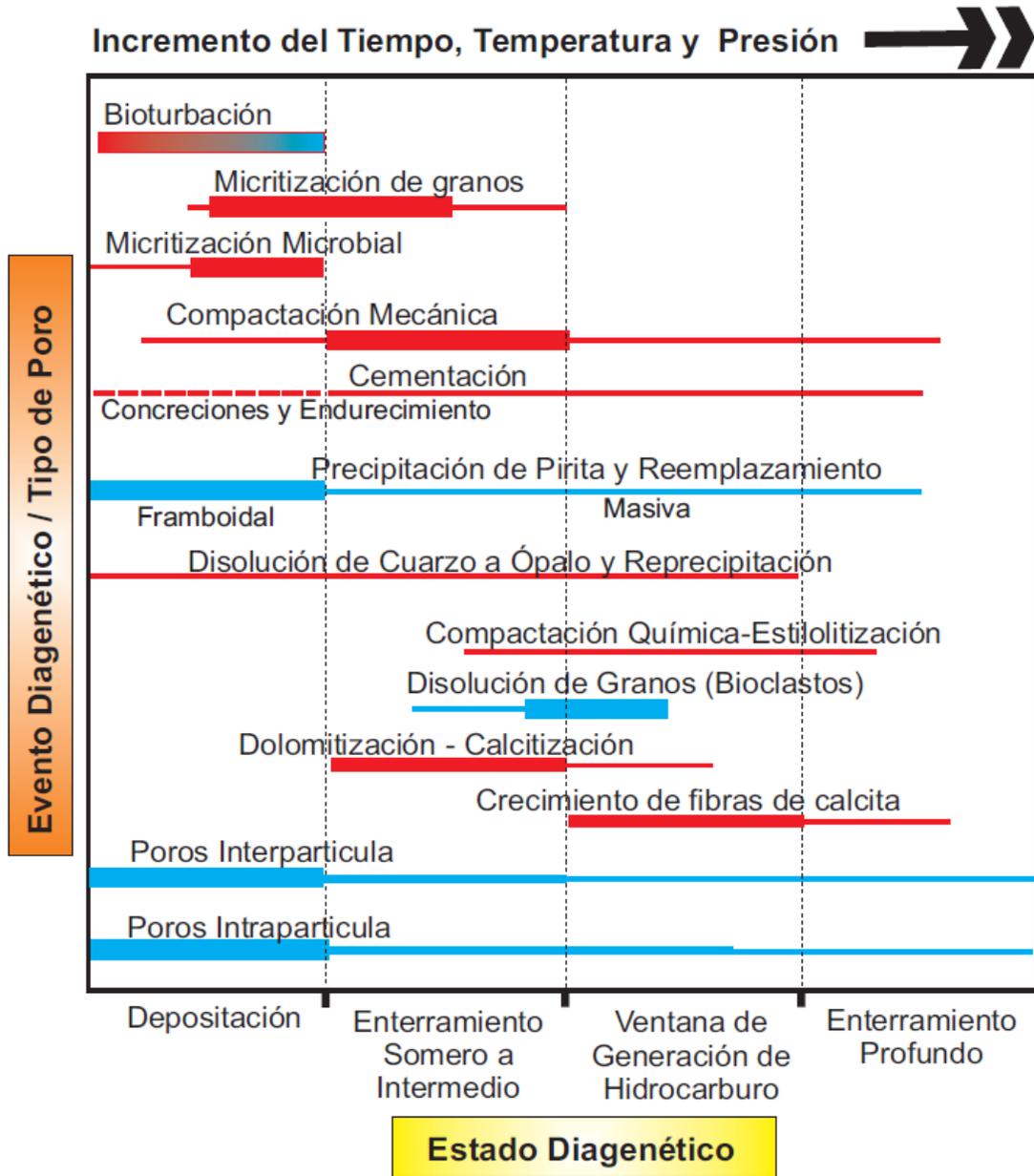
Las Facies B y D son Arcillolitas Fosilíferas, ricas en materia orgánica, moderadamente a bien laminada. Se presentan en condiciones preferiblemente anóxicas con laminaciones paralelas producto de flujos de corrientes submarinas, además de bajo aporte de carbonato pero alto de materia orgánica. El ambiente de depositación es en una cuenca submarina, en áreas de baja energía donde se depositan organismos pelágicos. Los granos tamaño limo a arena fina (Figura 28) son principalmente foraminíferos planctónicos (*Globigineroides* y *Globigirined*), y en contenido traza bentónicos (*Textularia*), espículas de equinodermos, espinas de peces y fragmentos de gasterópodos (rotos) transportados posiblemente por flujos submarinos de baja densidad. Se observa un leve aumento del contenido de foraminíferos bentónicos hacia la parte superior de la sección (Tr-2%).

Las arcillolitas de color gris oscuro (Facies B) están constituidas principalmente por partículas tamaño arcilla y en cantidades comunes partículas tamaño limo a arena media, del que hace parte los foraminíferos a los cuales se les observa un aumento del tamaño hacia la parte superior de la sección (mayor proporción de

foraminíferos tamaño arena gruesa hacia la parte media de la sección). La arcilla es más común hacia la parte superior de la sección donde está compuesta en cantidades comunes a abundantes de mineralogía cuarzosa (13 - 42 % en peso), el incremento de la abundancia de sílice puede ser posible al cuarzo autigénico depositado en matriz y la aparición de espículas de sílice. El contenido de bioclastos calcáreos se ve disminuyendo de la base (3-8%) al tope (Tr-3%).

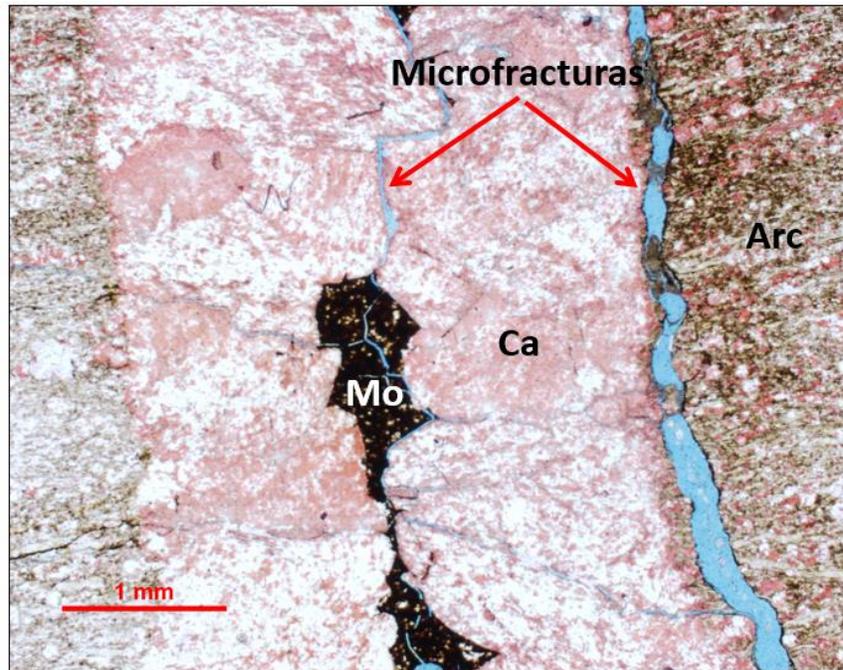
La mineralogía silíceea (63 –77 % en peso) se observa en la matriz de la Facies D, posiblemente esta sílice sea de origen volcanoclastico, producto de cortos periodos de flujos de cenizas de caída que se mezclaron con la depositación del fondo marino. El exceso de sílice en la matriz reemplazo algunos foraminíferos planctónicos con cuarzo microcristalino o calcedonia (ver Figura 22C).

**Figura 24.** Parasecuencia generalizada de la diagénesis de las rocas lodosas por el enterramiento. Barras en azul aporte a la porosidad y rojo a la cementación.

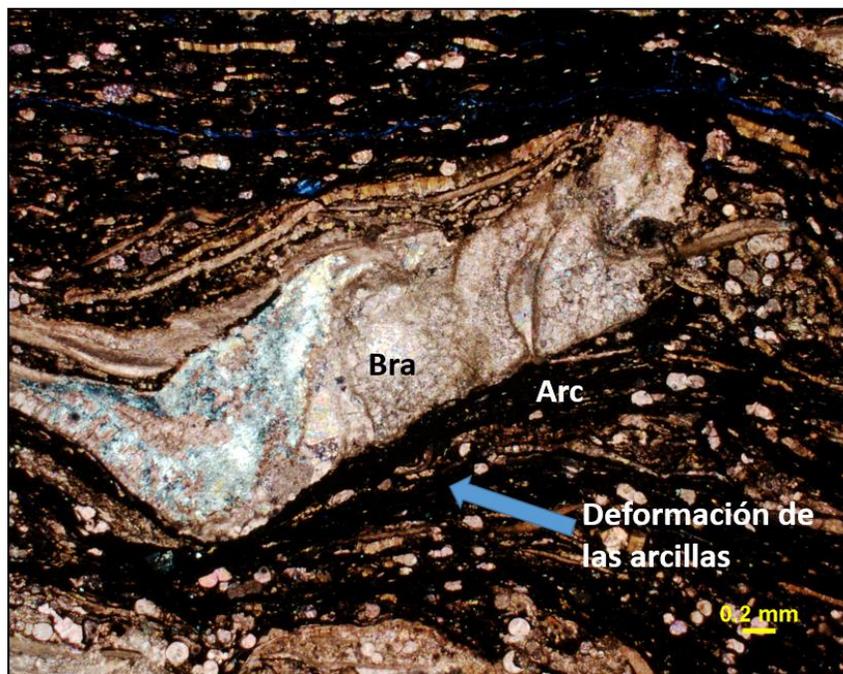


Fuente: Modificada de Loucks, et al., 2011.

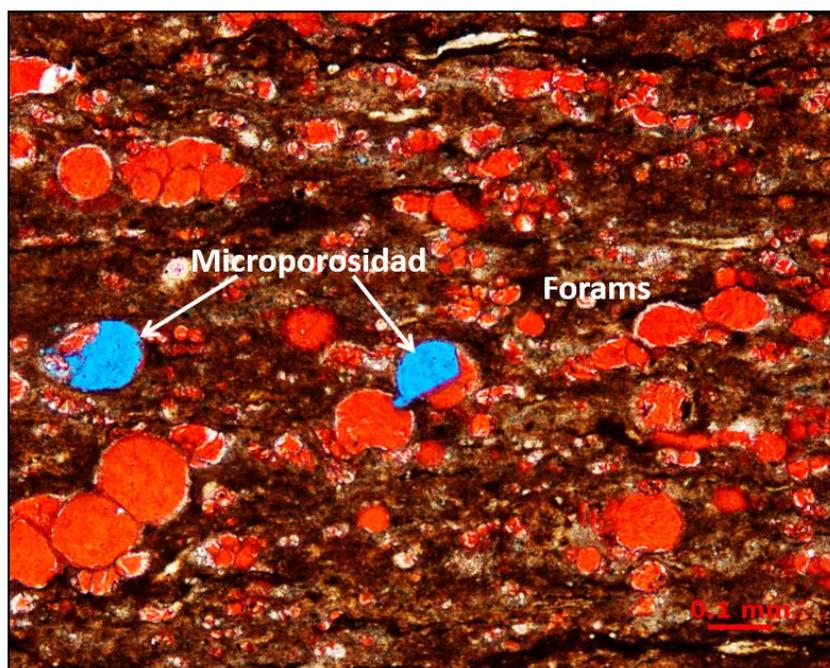
**Figura 25.** Microfotografía de fractura rellenada por calcita (Ca) que anteriormente había estado rellena por materia orgánica (Mo).



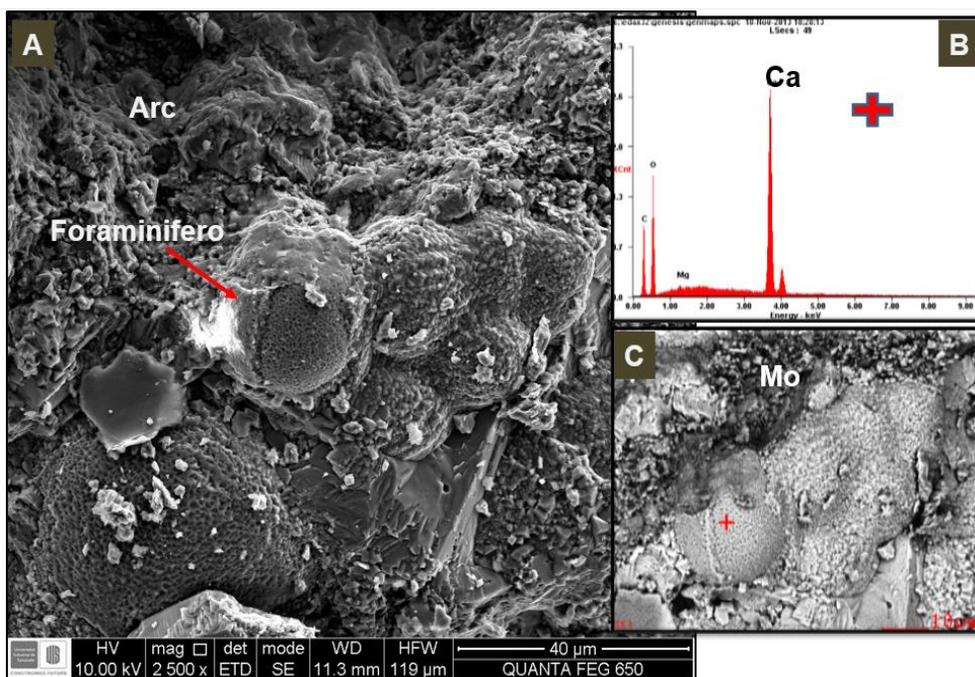
**Figura 26.** Microfotografía de deformación de la matriz arcillosa (Arc).



**Figura 27.** Porosidad moldica de foraminíferos por disolución del carbonato.



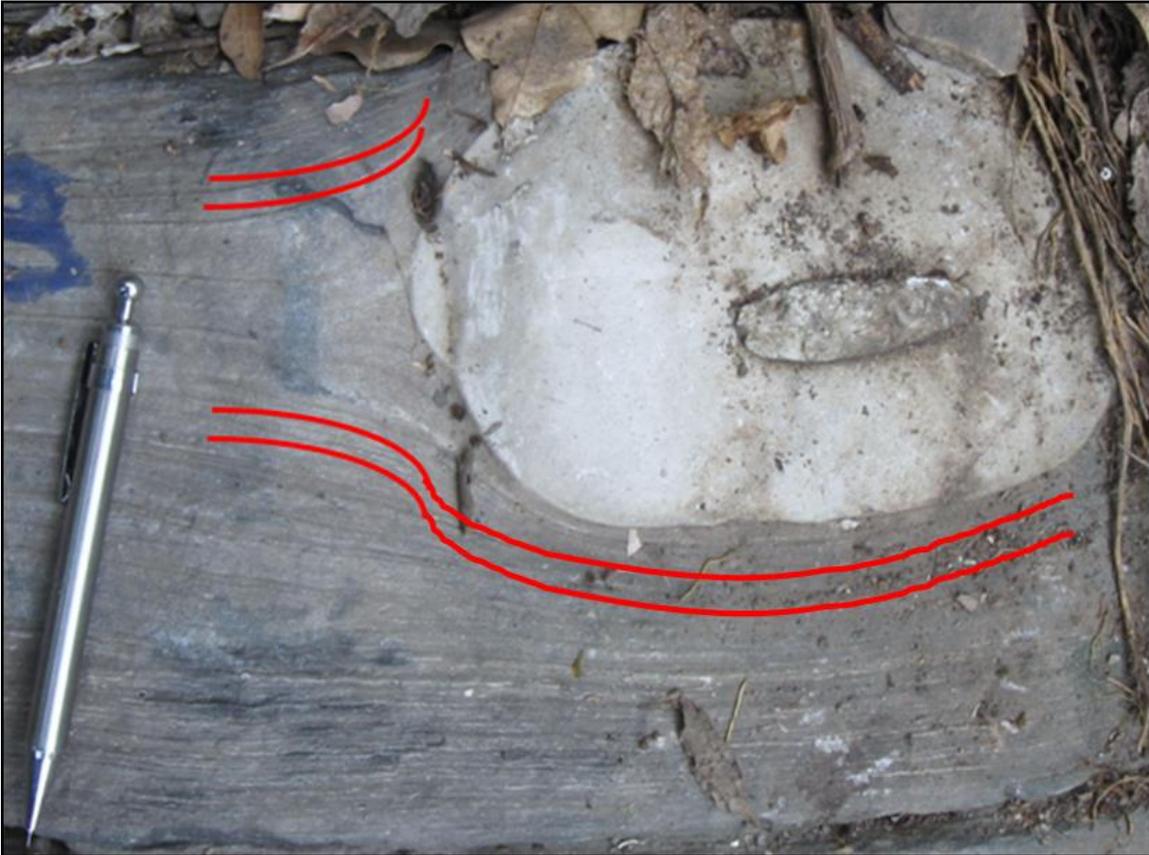
**Figura 28.** Foraminífero relleno de carbonato (A). Obsérvese la cruz roja (C) marca la composición dada por el espectral (B).



La aparición de pirita y la materia orgánica es predominante hacia el tope de la sección, donde se observa relleno de fracturas, bioclastos y foraminíferos (Figura 25). La compactación aumenta a medida que también lo hace la mineralogía arcillosa (Figura 26). Igualmente se observa la disolución de foraminíferos antes de ser rellenos por carbonato (Figura 27).

La deformación generada en la Facies C por las concreciones es debida a la diagénesis temprana, en la cual a medida que se iba formando las concreciones, las capas adyacentes empezaban a deformarse. La laminación por la intercalación de las arcillas y los foraminíferos dejan ver esta deformación (Figura 29).

**Figura 29.** Deformación de las láminas debido a las concreciones formada en la diagénesis temprana.

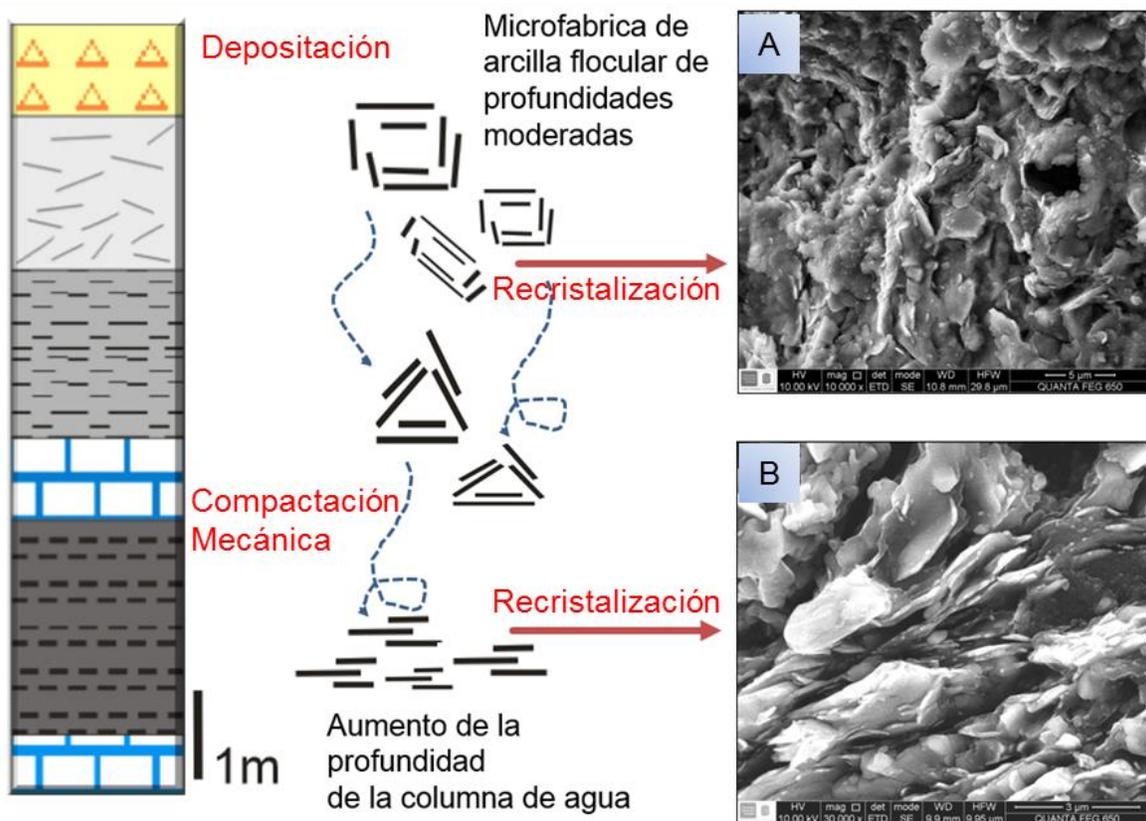


Por medio del microscopio electrónico de barrido (SEM) se estudió la microfabrica y microestructuras de las arcillas, además de la presencia de la materia orgánica. Las imágenes obtenidas por SEM permitieron reconocer micro y nanoporosidades, igualmente observar los fósiles y conocer la composición de las arcillas cubiertas por la materia orgánica, y difíciles de observar a escala petrográfica.

Según Bennett, 2012 se define la microfabrica como el arreglo de las partículas con una orientación o imbricación. La asociación observada entre las partículas de arcilla fue principalmente cara-cara configuradas como multi-embricadas y borde-cara (según Bennett, 2012). Las arcillolitas de color gris oscuro se caracterizan por ser pobres en bioturbación lo cual ayuda a preservar bien la fábrica de la roca. La microestructuras que se observa en las imágenes de SEM muestra la forma como se depositaron las arcillas (principalmente illita). La orientación de las partículas

ayudo a definir que los minerales arcillosos de la base de la sección se depositaron en forma dispersa (Figura 30B), posiblemente en una columna de agua profunda compacto las láminas, mientras en la parte superior de la sección presenta arcillas floculares en estructura domino (Figura 30A) donde se asocian varias partículas que se agrupan con otras por los bordes, estos floculos probablemente tenían una columna de agua menos densa que la arcillas que las infrayacen que les permitió conservar la orientación inicial en la que se depositaron (O'Brien and Slatt, 1990; Bennett, 2012).

**Figura 30.** Microfabrica de las arcillas de la Formación La Luna en la Sección Aguablanca.

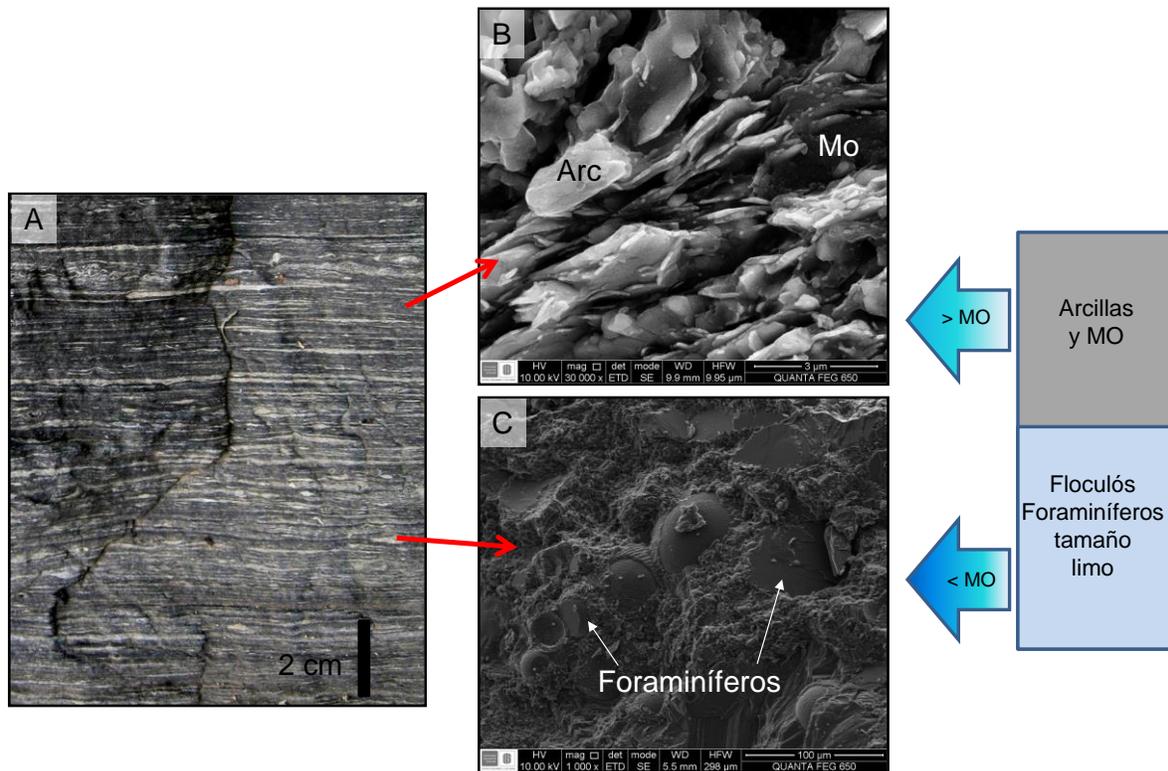


El contenido de materia orgánica en las muestras depende de la composición de la roca que alterna con cambios de la microestructuras y tamaño de los granos (principalmente foraminíferos y minerales tamaño arcilla) que generan laminaciones (O'Brien and Slatt, 1990). Estas laminaciones son repeticiones

rítmicas debido a la variación de la energía de las corrientes del fondo marino que influye en el transporte o producción de material que fluctúa (Figura 31A). Según la energía generada hay una selección del tamaño de los foraminíferos y además de una orientación de los mismos (Figura 31C) y las arcillas (figura 31B). En algunos casos se observan láminas de arcillas mezcladas con particular como cuarzos autigenicos que se infiere se agruparon durante el transporte y posteriormente recrystalizaron.

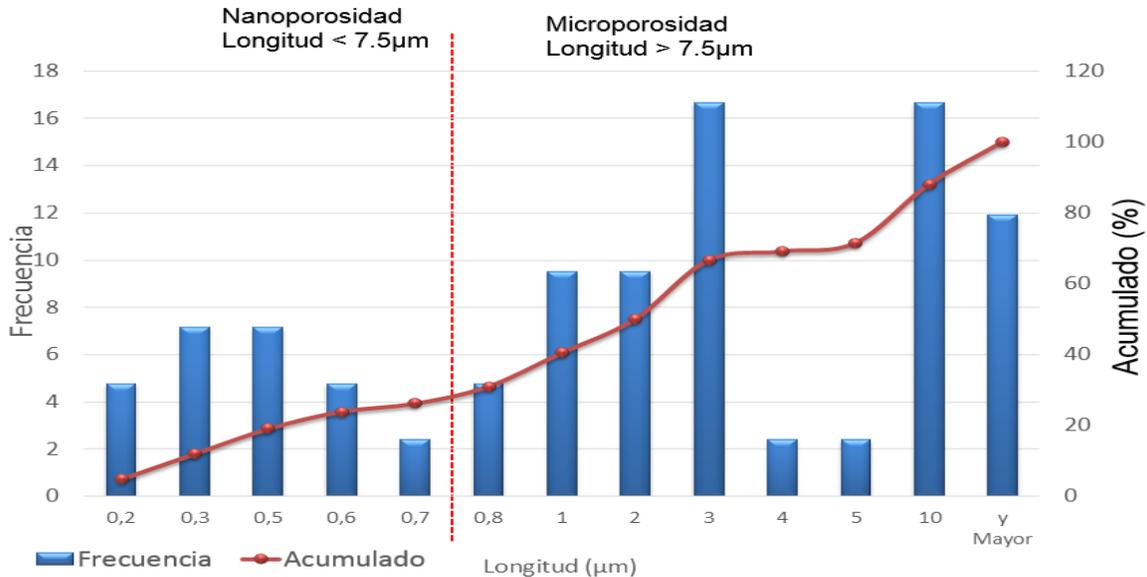
Según los análisis hechos de TOC, DRX y SEM las muestras con mayor contenido de minerales arcillosos, presentan mayor contenido y mejor conservación de materia orgánica que puede ser interrumpida con la depositación de granos tamaño limo y abundante contenidos de mineralogía calcárea.

**Figura 31.** Variación de la materia orgánica con la laminación. Arc: Arcillas; Mo: Materia orgánica



## 6.2. POROSIDAD

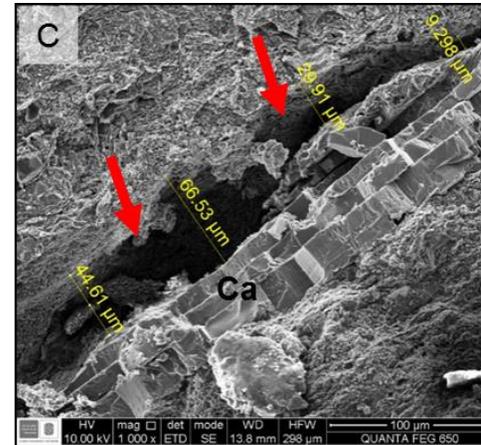
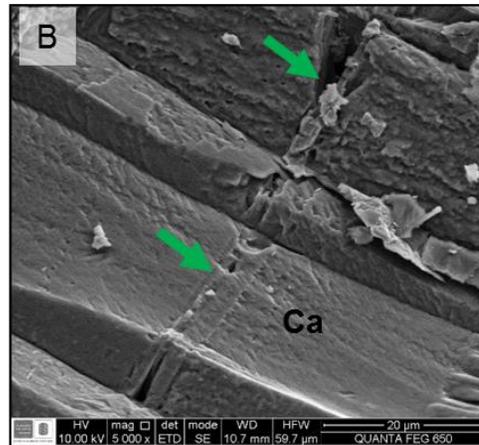
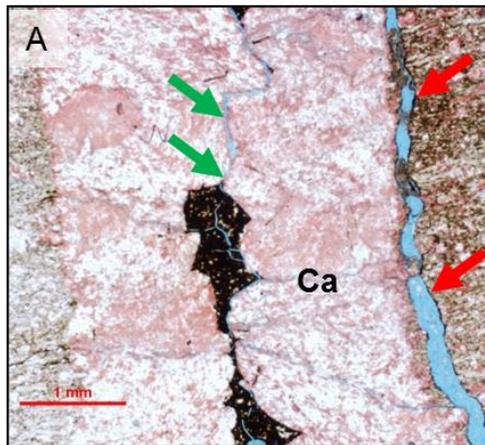
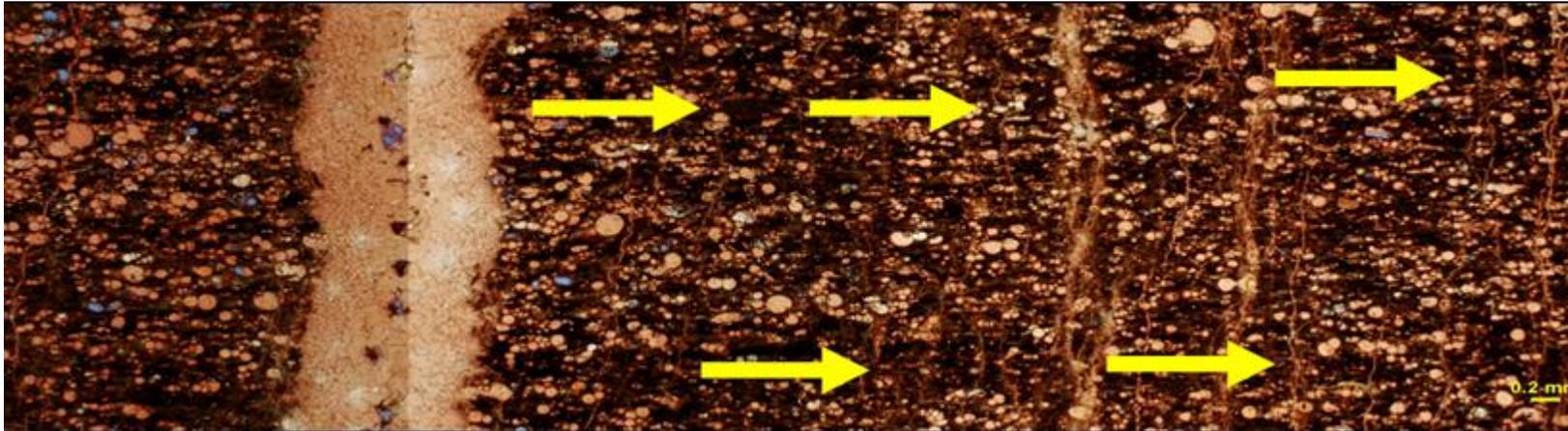
**Figura 32.** Variación de porosidad encontrada en la sección Aguablanca de muestras analizadas por SEM. Línea discontinua roja es el límite propuesto por (Slatt, et al., 2012) para diferenciar Nanoporosidad y microporosidad.



En el estudio hecho por análisis petrográfico de las secciones delgadas se observó que la Facies A presenta microfracturas rellenas de calcita ( $<1\%$ ), posiblemente debido a su alto contenido calcáreo (80%-96%), la porosidad que se observó es principalmente disolución de los foraminíferos; la Facies B presenta porosidad (Tr-3%) representada en microfracturas rellenas de materia orgánica que posteriormente fueron rellenas de carbonato tipo pseudoesparita y esparita (ver Figura 25 y 33) y disolución de algunos foraminíferos parcial o totalmente (ver Figura 27). La mayoría de estas microfracturas se observan perpendicular a la laminación y su apertura varía de un milímetro a micrones (Slatt, 2011; Eltom, et al., 2013).

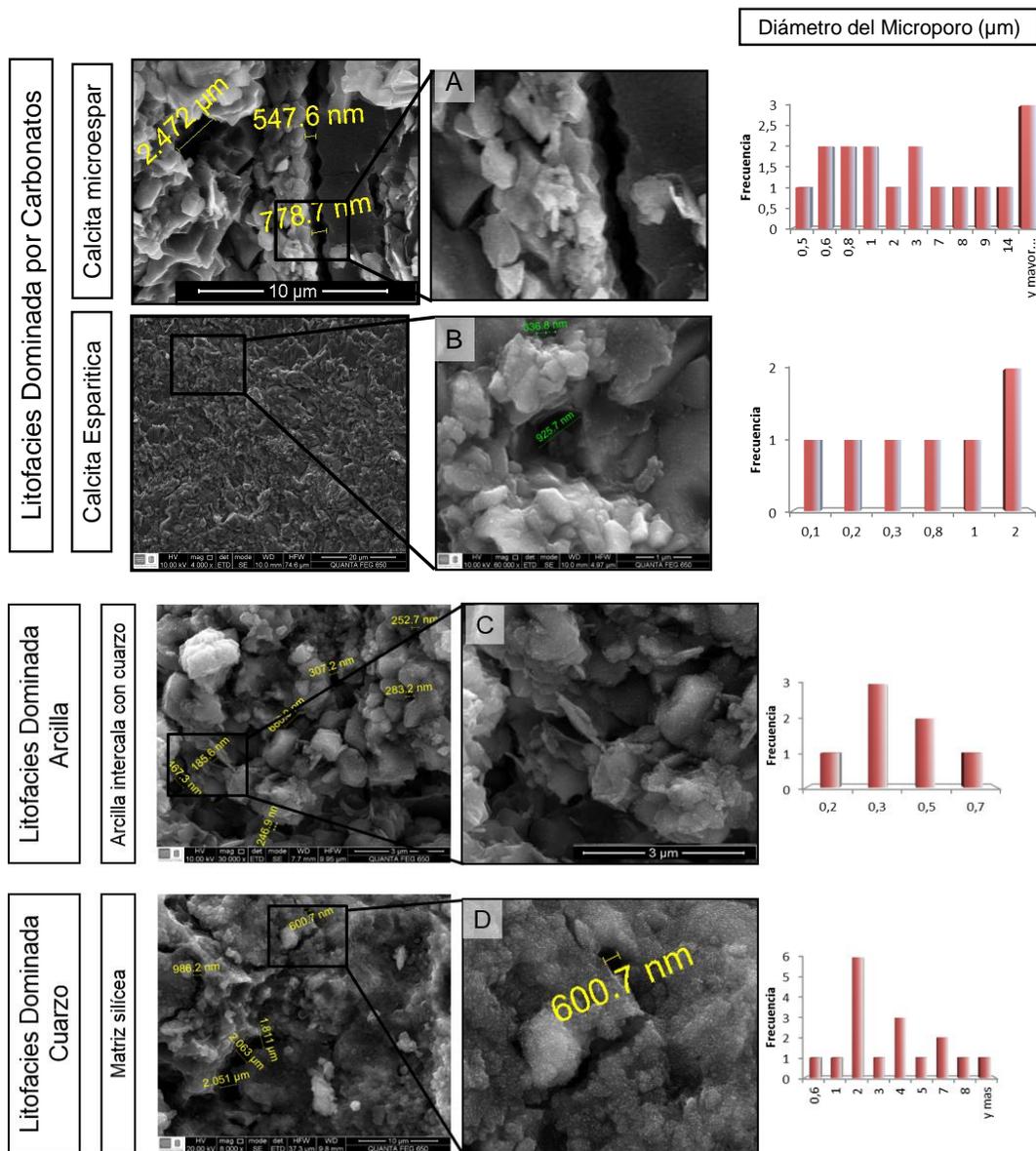
En el contacto de los cristales rígidos de las venas rellenas de esparita y la mineralogía arcillosa se crean planos de debilidad que inducen a nuevas fracturas (Ver Figura 33A y 33C) que se pueden formar en el momento de la toma de la muestra o al cambiar las condiciones de presión de la roca (Gale, 2007).

**Figura 33.** Microfracturas perpendiculares a la laminación resaltadas con las flechas amarillas (Superior). A) Se observan microfracturas generadas dentro de la fractura principal y en el contacto de la fractura con los minerales arcillosos; B) Fractura dentro de vena (flecha verde); C) Fractura entre vena y matriz (flecha roja).

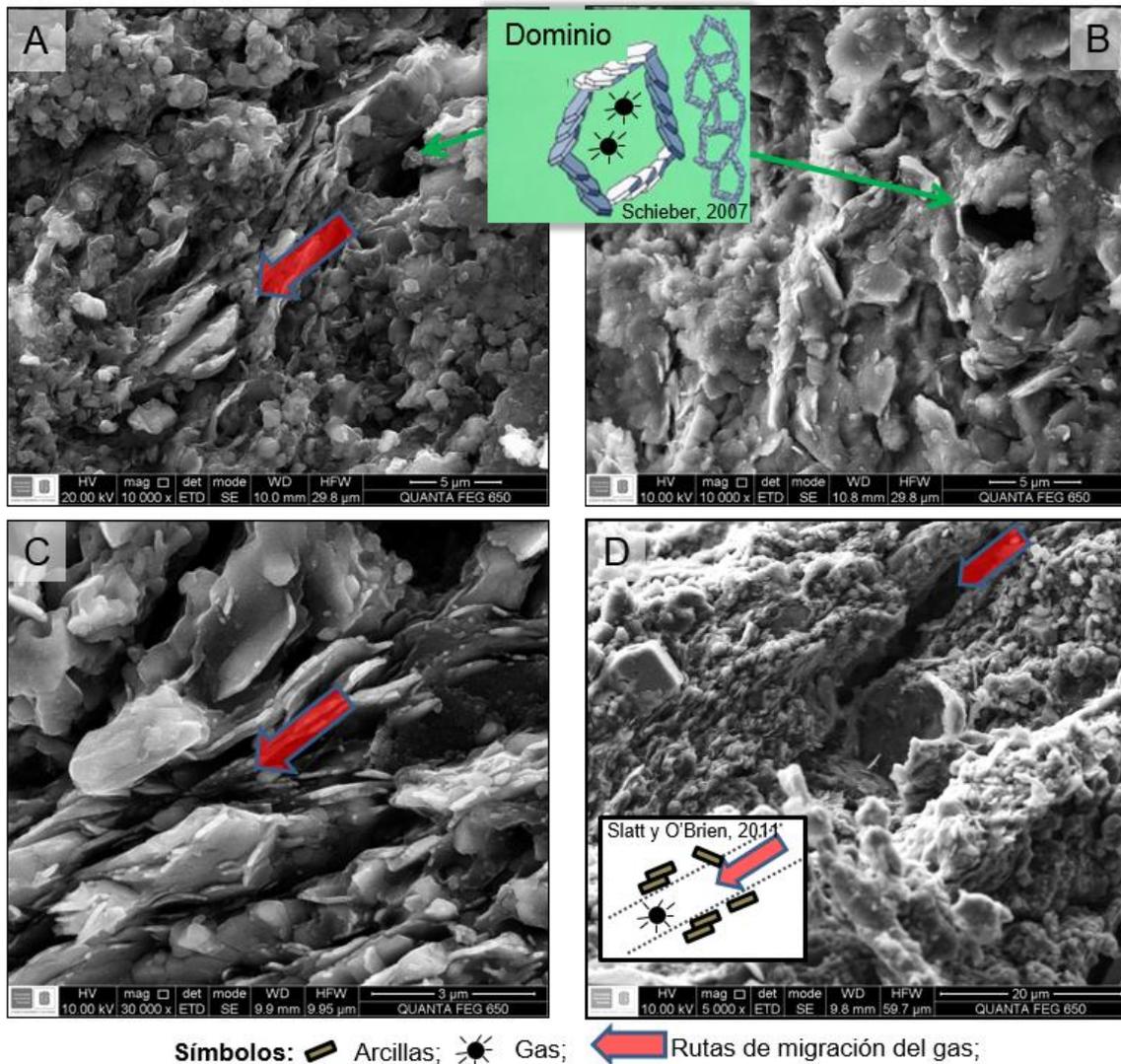


El estudio con el Microscopio Electrónico de Barrido (SEM) muestra una importante microporosidad en las muestras seleccionadas, en las que se observan diferencias en las tres facies (A, B y D). La microporosidad presente puede ser de cuatro tipos (Figura 34): (I) entre cristales de micrita (figura 34A); (II) entre cristales de esparita (Figura 34B); entre arcillas y cristales de cuarzo (Figura 34C); y entre la matriz silíceosa (Figura 34D).

**Figura 34.** Clasificación de los microporos usando imágenes de SEM.



**Figura 35.** Porosidad en floculos de poro y microcanales formado en facies dominadas por arcillas.



### Microporosidad en mineralogías arcillosas

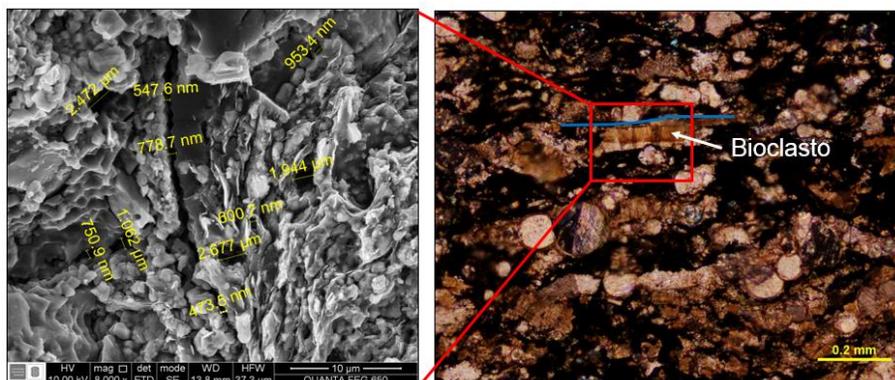
Las arcillas fueron clasificadas por Folk (1974) como agregados de silicatos de aluminio hidratados que son menores de 0.002 mm. En las muestras estudiadas por SEM los agregados de arcilla pueden medir de 1µm a 4µm (figura 35). Los minerales arcillosos están presentes principalmente en las Facies de Arcillolita Calcárea rica en Materia Orgánica, que tiene mayor ocurrencia en la parte superior de la sección Aguablanca en la base del Miembro Pujamna.

El lineamiento de las arcillas (ver figura 35 A, C y D) forma planos de capas abiertas tamaño nano-micrometro que pueden ser paso de fluido de gas (Slatt, et al., 2012). Los floculos de arcilla (ver Figura 35 A y B) pueden estar formando estructuras de naipes unidos cara-borde o borde-borde y contener en su interior gas, además estos poros pueden estar interconectados (Slatt, et al., 2012). La orientación preferencial de los minerales arcillosos pueden estar formando nano-microporos de 0.2  $\mu\text{m}$  a 0.7  $\mu\text{m}$ . La conectividad entre este tipo de microporo es alta y aumenta hacia la parte superior de la sección Aguablanca. Algunas arcillas presenta disolución en los bordes probablemente sean posterior a la depositación en una diagénesis temprana, si esta disolución continua la microporosidad puede aumentar.

### Microporosidad en Micrita

La micrita es definida como lodo calcáreo microcristalino precipitado, que puede presentar algo de evidencia de transporte. Según Folk (1962) los cristales pueden tener un diámetro de 1-4  $\mu\text{m}$ , los cristales de micrita pueden sufrir diagénesis y pasar a microesparita con diámetro de los cristales de 4 a 10  $\mu\text{m}$ . Con las imágenes estudiadas de SEM se encontraron cristales de calcita de 0.8  $\mu\text{m}$  a 3  $\mu\text{m}$  (ver Figura 34 A), de forma subredondeados a subangulares de alta esfericidad y rombohedrales. Está microporosidad intragranular se presenta principalmente en la facies dominada por Arcillas Calcáreas (Figura 36).

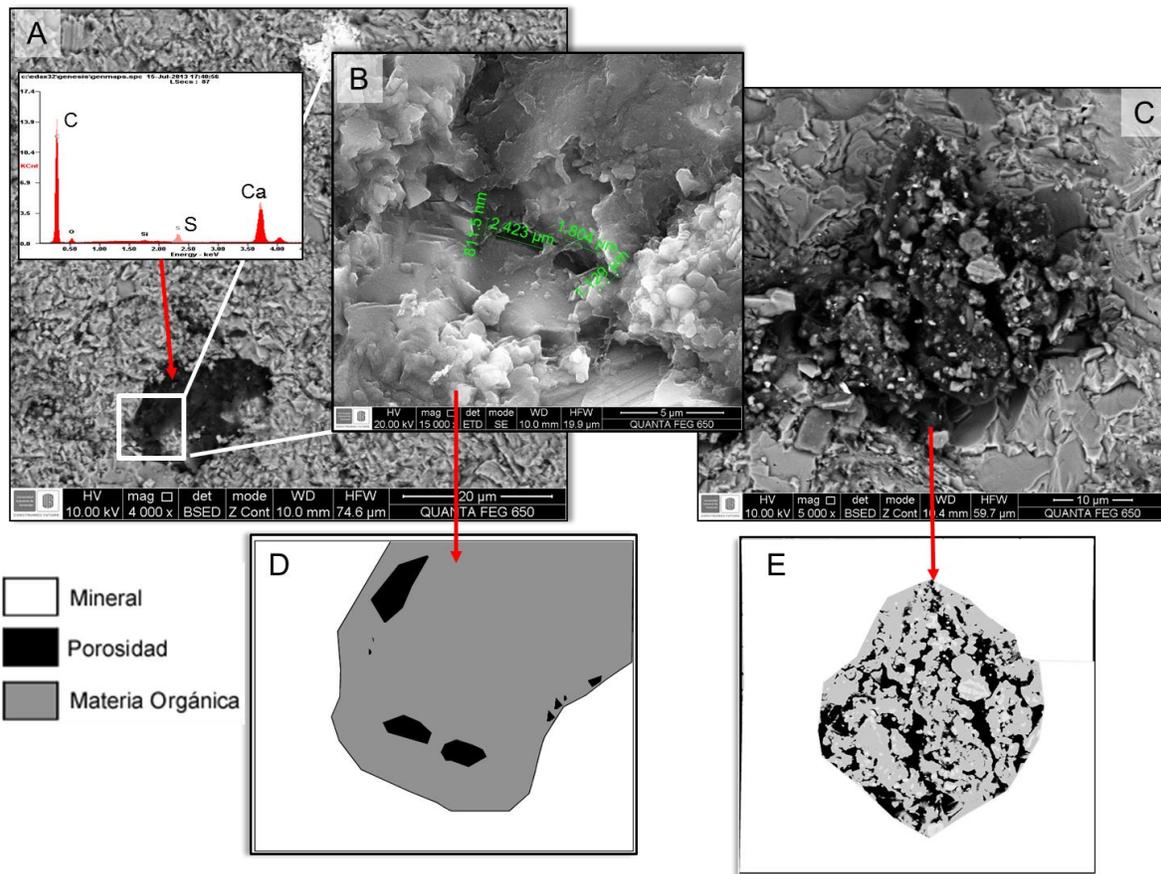
**Figura 36.** Microporosidad entre lodo calcáreo con minerales arcillosos y bioclastos rígidos.



En la Figura 36A se observa que se forman microfracturas en donde se encuentra el contacto entre los bioclastos rígidos (principalmente foraminíferos rellenos de calcita, gasterópodos y bivalvos) y micrita con minerales arcillosos, estas microfracturas pueden ser rellenos de materia orgánica ó ser microcanales que podrían facilitar el paso de gas.

### Microporosidad en Esparita

**Figura 37.** Porosidad tipo órgano-poro en facies Wackestone.



Según Folk (1962) los cristales de calcita mayores a 4  $\mu\text{m}$  son esparita. La petrofacies Wackeston presenta principalmente pseudoparita como cemento. El rango de los cristales que cementan es de 1  $\mu\text{m}$  a 3  $\mu\text{m}$ , preservan poco la forma, con una moderada disolución después de la cristalización en una etapa tardía de la diagenesis (Bathurst, 1994; Eltom, 2013). Los poros en este tipo de calcita es del rango de 0.1  $\mu\text{m}$  a 2  $\mu\text{m}$  (ver figura 34 B).

La conectividad entre los microporos es baja y aumenta con la preservación de los cristales de mayor tamaño que no han sufrido diagénesis.

La porosidad órgano-poro se encuentra comúnmente en la facies Wackestone de dos formas: en la primera la materia orgánica presenta morfología pendular (figura 37 C y E) rellenando espacios porosos entre cristales de calcita, los microporos son de forma alongadas angulares, algunos conectados; la segunda es laminar solida con baja contenido de espacio microporoso interconectado, los poros se encuentran aislados, (figura B y D), asociado según (Loucks, et al., 2011) a materia orgánica inmadura.

### **Microporosidad en matriz silícea**

Esta arcillolita silícea es el resultado de la mezcla en el fondo marino de minerales arcillosos y flujos de cenizas volcánicas, por el alto contenido de hierro y sílice como cemento, además de encontrarse foraminíferos planctónicos rellenos de cuarzo microcristalino.

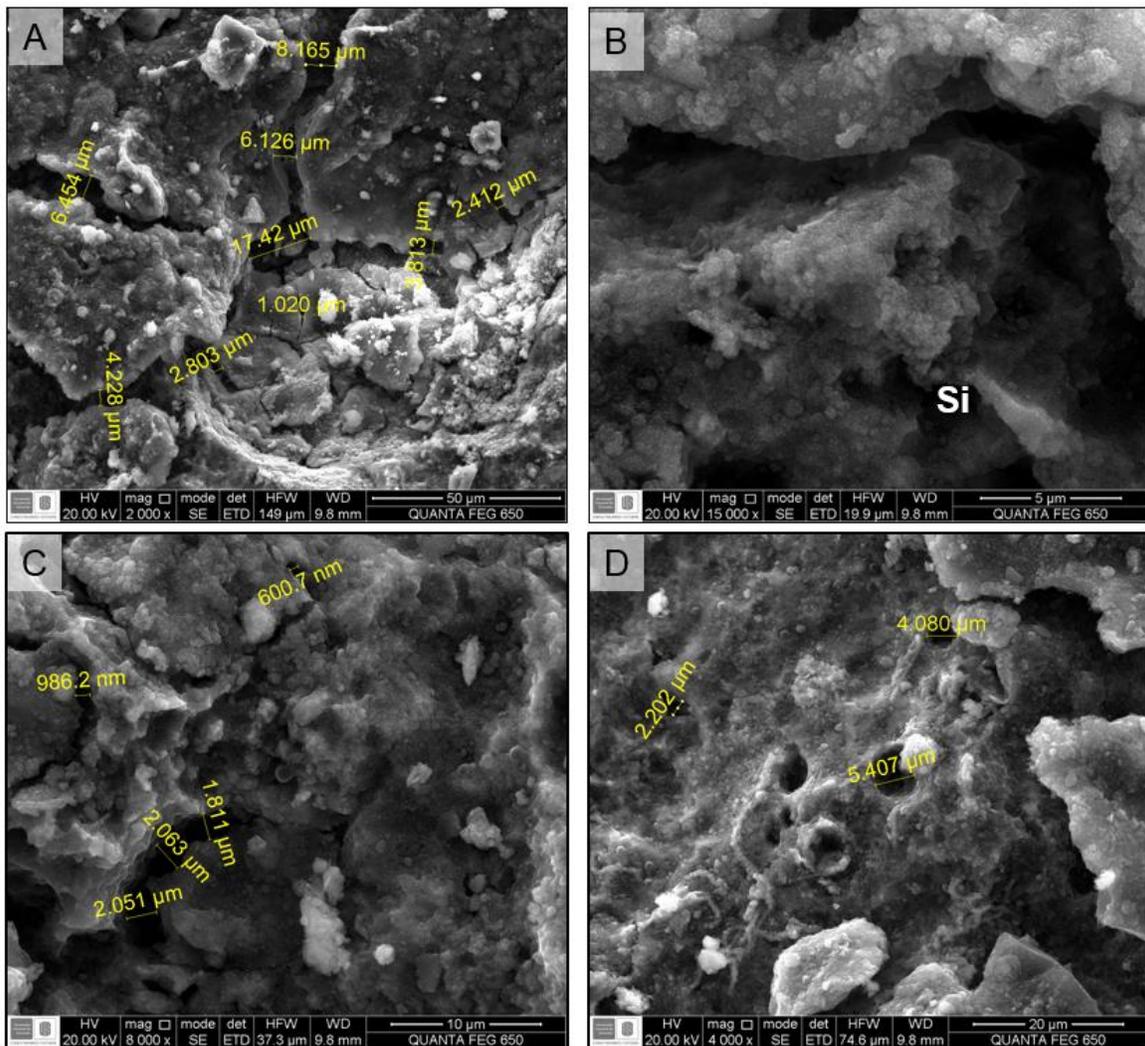
En la Facies de Arcillolita Silícea Fosilífera (Facies D) se encontraron microfracturas de apertura desde 0.6  $\mu\text{m}$  a mayor de 8  $\mu\text{m}$ , algunas de estas microfracturas se aspecto sinuoso, en algunos intervalos rectos de paredes lisas. Las microfracturas se observan interconectadas (ver Figura 38 A). En esta facies no se observa claramente porosidad intergranular, debido a que estos poros se encuentran cementados por sílice, exhibiendo muy mala conectividad. Se observan texturas vesiculares producto del enfriamiento rápido de las cenizas volcánicas (ver Figura 38 D).

### **Otras microporosidades**

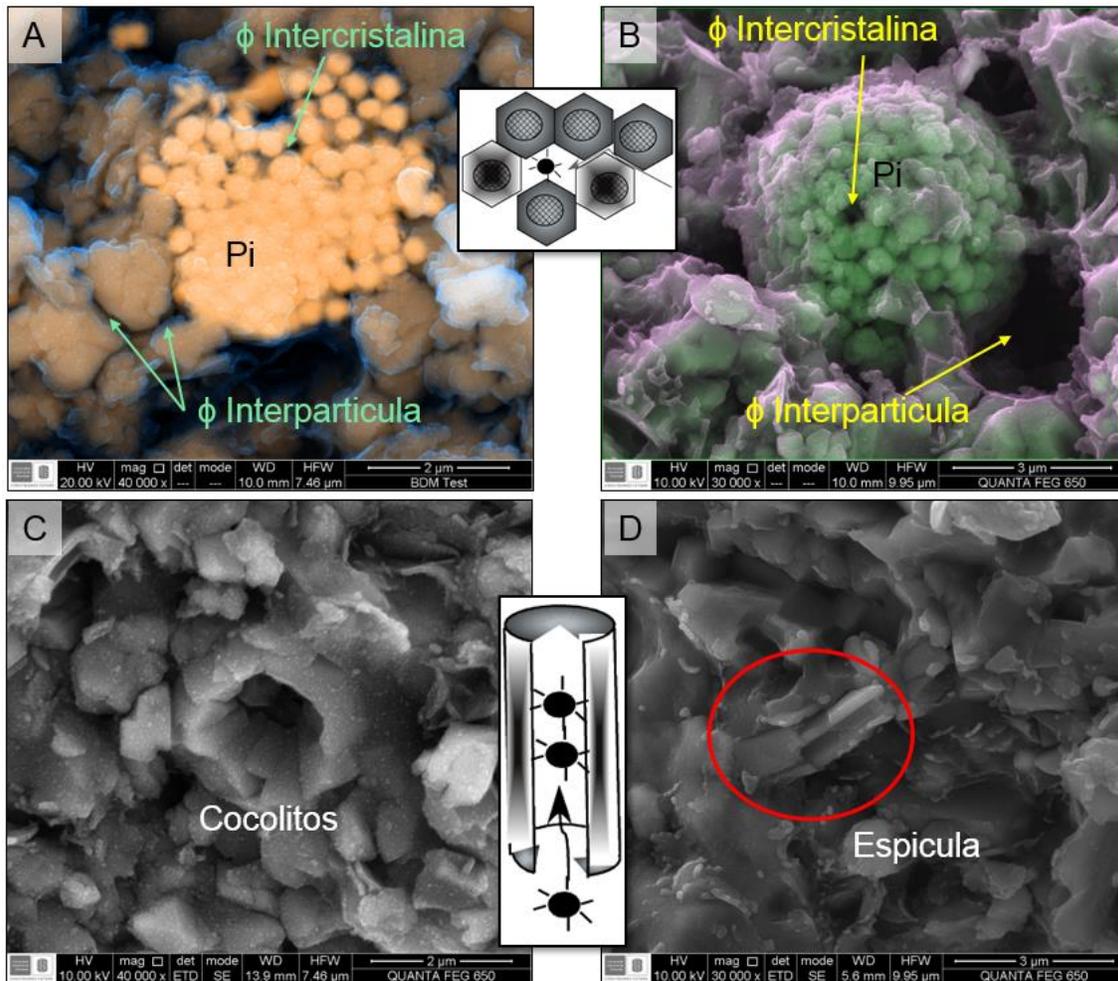
Además de los tipos de microporosidad y nanoporosidad que se revisó antes, se pueden encontrar otros tipos de poros como los observados en los intercristales/intergranos (ver Figura 39 A y B) y en los fragmentos fósiles (ver figura 39 C y D).

Los nanoporos observados en el espacio intercrystalino de las piritas es de  $0.2\ \mu\text{m}$  a  $0.3\ \mu\text{m}$ . Cuando la pirita framboidal se encuentra con materia orgánica, como es en este caso, esto es indicador de diagénesis de sulfuros anaeróbicos (Slatt, et al., 2012). En la figura 39B también se observan los cristales de cuarzo y arcillas orientadas alrededor de la pirita framboidal formando cavidades (microporos de  $2\ \mu\text{m}$  a  $4\ \mu\text{m}$ ).

**Figura 38.** Porosidad en arcillolitas silíceas.



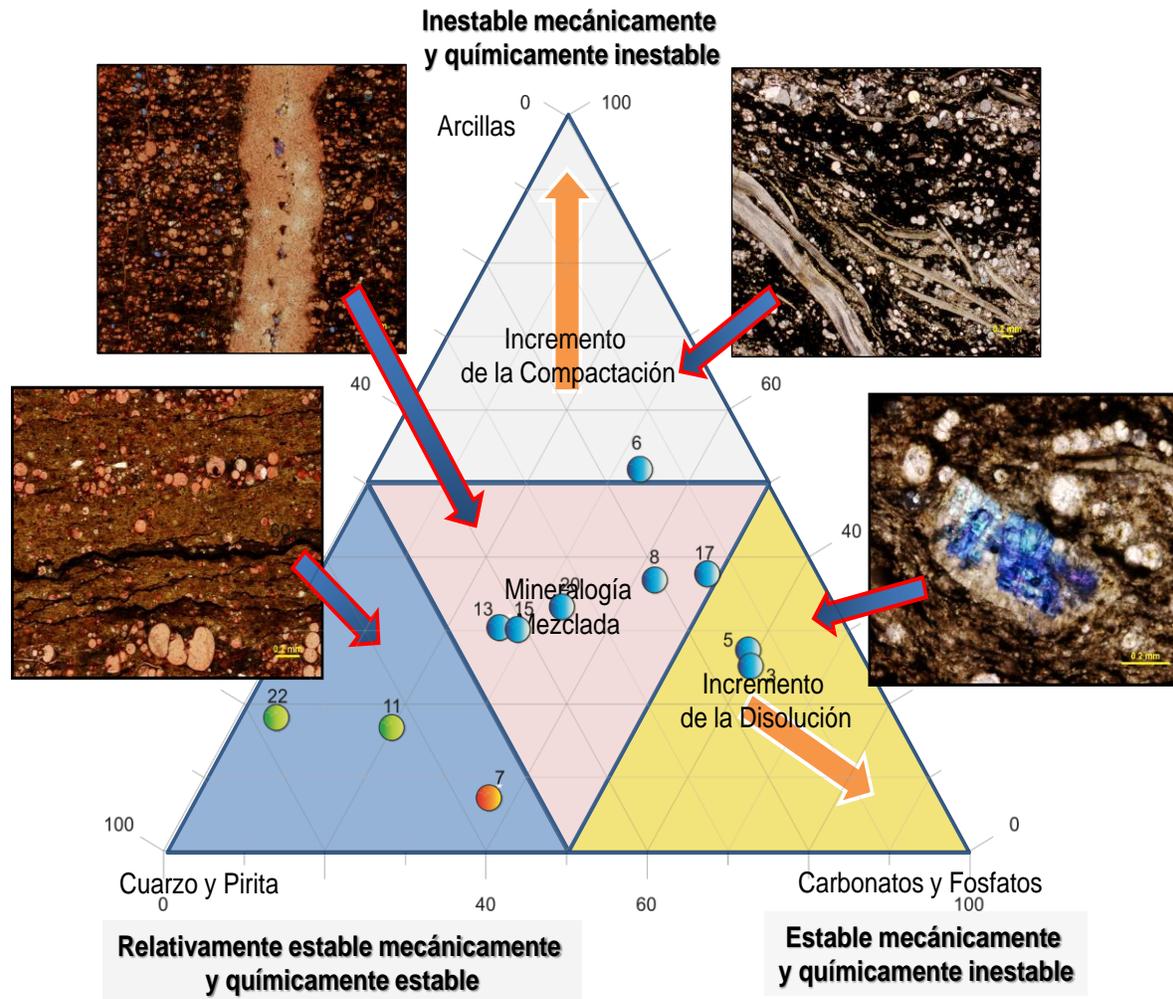
**Figura 39.** Porosidad interpartícula y en los fragmentos fósiles.



La porosidad obtenida por procesos depositacionales y diagenéticos son influenciados por la compactación, cementación y disolución de los minerales. Las muestras compuestas de minerales arcillosos muestran mayor compactación y deformación como lo observado en la muestra 6 donde se puede distinguir la deformación alrededor de los bioclastos, además se observa materia orgánica en láminas discontinuas; Las roca con mayor contenido de carbonatos y fosfatos, presentan poca compactación y porosidad moldica (3%) como en la muestra 1; Las muestras con alto contenido de cuarzo y piritita, no presenta disolución y la compactación observada es muy baja, además las que presentan mayor contenido de cuarzo (>40%) en roca total (muestra 11, 13 y 22), presentan fracturas

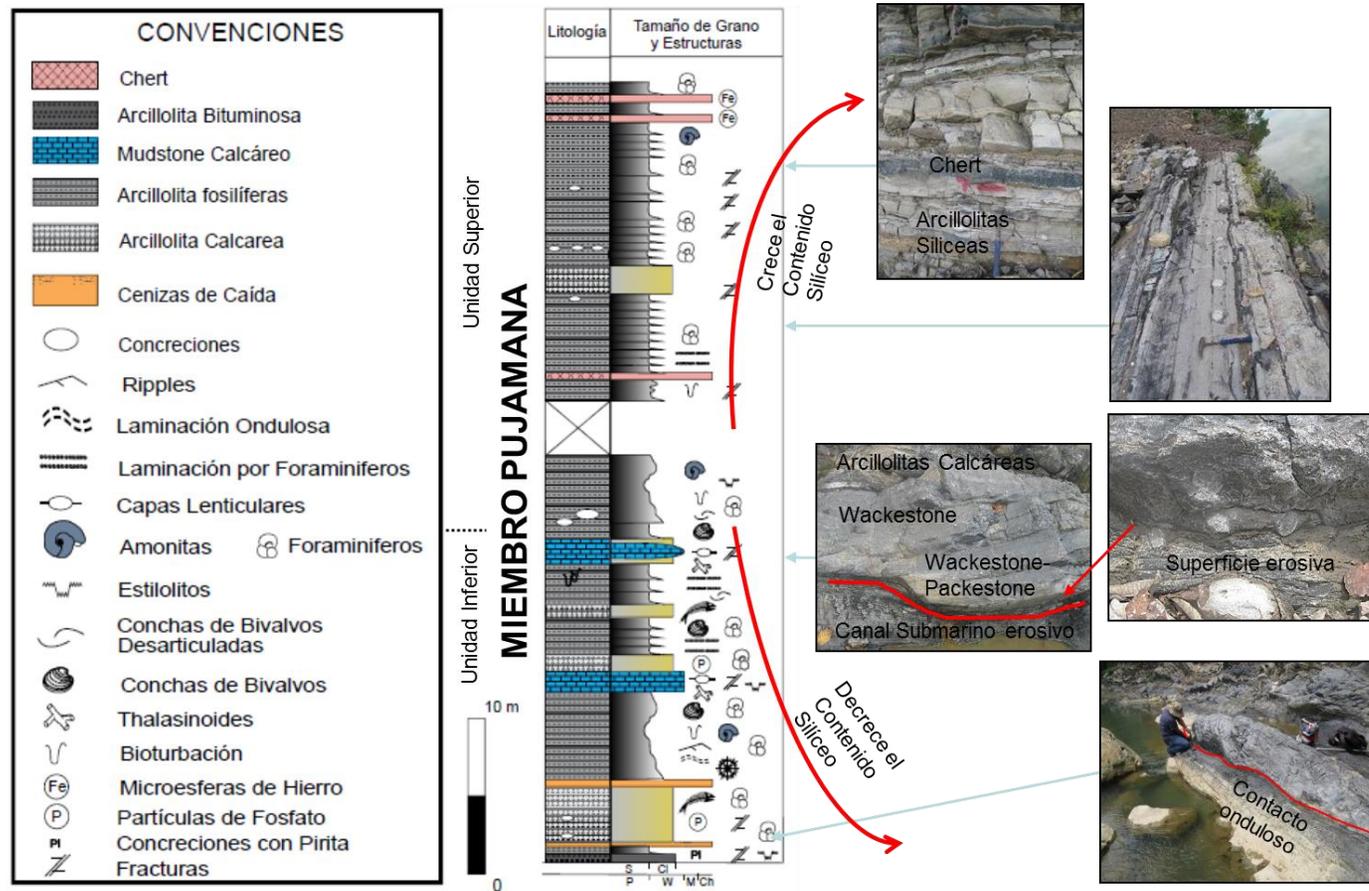
perpendiculares a la laminación, estas fracturas están rellenas de materia orgánica o carbonatos. Ver Figura 40.

**Figura 40.** Diagrama composicional de las arcillitas que muestran la relación de la estabilidad entre la mineralogía (DRX), la fábrica, la textura, la materia orgánica y la porosidad (epóxido azul).



## 7. SECUENCIA ESTRATIGRAFICA

Figura 41. Columna estratigráfica que muestra el cambio de la sucesión de Facies. Sección Aguablanca, Oeste de Bucaramanga



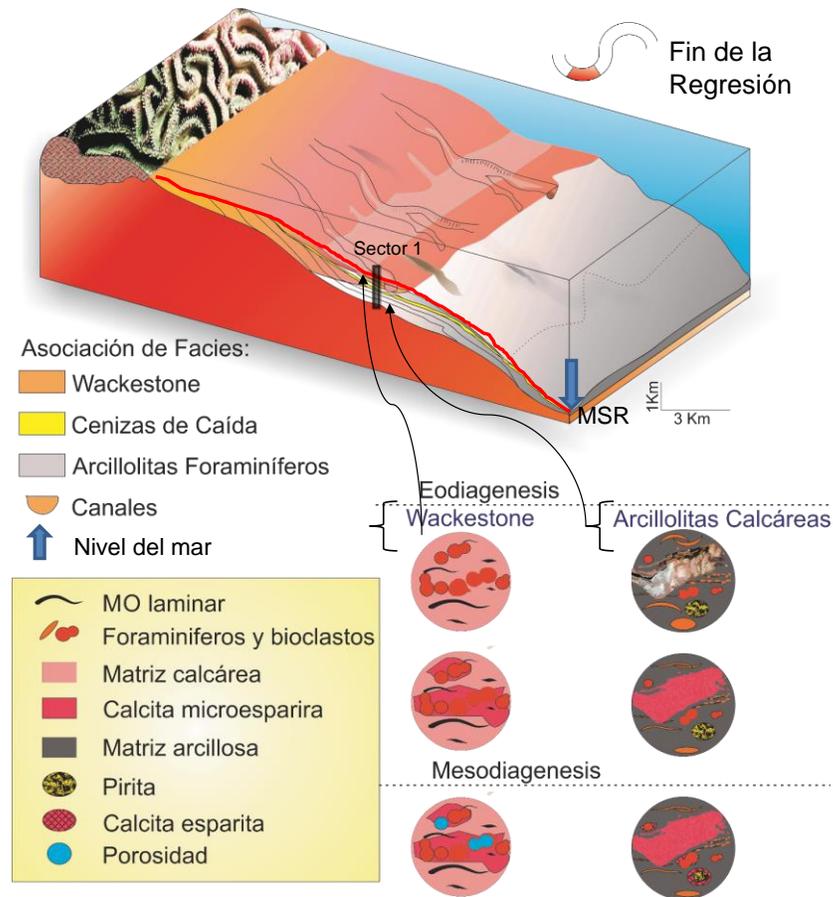
Se identificaron dos unidades a través de la descripción de la columna en la sección Aguablanca, donde se muestran cambios en la depositación derivado de la extensión del rift durante el Coniaciano-Santoniano (Royero, et al., 2001 y Barrero, et al., 2007). Lo inferido por los altos contenidos de materia orgánica es que corresponde a un alto nivel del mar y bajo contenido de materia orgánica corresponde a una caída del nivel del mar (Torres, 2013). La sección Aguablanca muestra una relativa caída del nivel del mar en la unidad inferior y luego una gradual subida en la unidad superior. Se puede inferir que estos cambios del nivel del mar son debido a la combinación de eustacia y tectónico (Royero, et al., 2001). El cambio en el espesor de las capas, la forma como se apilan las facies, las variaciones litológicas, los cambios en los tipos de bioclastos, además del contenido de materia orgánica mencionado anteriormente, conlleva a proponer cambios sistemáticos en el ambiente de depositación y una secuencia estratigráfica.

### **Unidad Inferior**

La unidad inferior de la sección Aguablanca fue depositada en una regresión normal en una aceleración de la subida del nivel base (Catuneanu, 2006; Torres, 2013). El secuencia de las capas en la Unidad Inferior muestran un leve apilamiento agradacional en un sistema regresivo. La variación de facies wackestone a arcillolitas calcáreas en capas delgadas a gruesas representa una progradación en un ambiente de aguas profundas. En la altura 0 a 10 m de la columna estratigráfica de base a tope se observa una pequeña disminución en el nivel del mar donde se observa concentración de bioclastos y gasterópodos rotos, además de presentar los mayores contenidos de foraminíferos en toda la sección y escasa presencia de fosfatos. El suministro de sedimento por corrientes submarinas reflejado en los canales de bases erosivas podría ser causa de una relativa caída del nivel de mar y una máxima superficie de regresión (MSR).

La continua agradación y moderada frecuencia de las capas son respuesta a las corrientes de turbidez generados por la Eustacia en un cambio relativo del nivel del mar con la presencia de canales de arrastre con aglutinaciones de Gasteropodos, bivalvos y bioclastos no diferenciados, ver Figura 41. En la parte superior de este intervalo entre 10 a 15 m de base a tope se observa el aumento del tamaño de las capas de arcillolitas calcáreas y la disminución progresiva de las capas medias de wackestone-packestone lo que infiere la aceleración de la subida del nivel base (ver Figura 42). Los fósiles observados se encuentran rotos y desarticulados, sin orientación preferencial, con mala selección. Se infiere que fueron transportados por flujos de escombros, por la continua agradación acompañado de eventos tectónicos que acompañaron el Cretáceo Superior.

**Figura 42.** Modelo esquemático que muestra la distribución espacial de la secuencia de depósitos y las variaciones diagenéticas en la Unidad Inferior. MSR: Máxima Superficie de Regresión (línea roja).



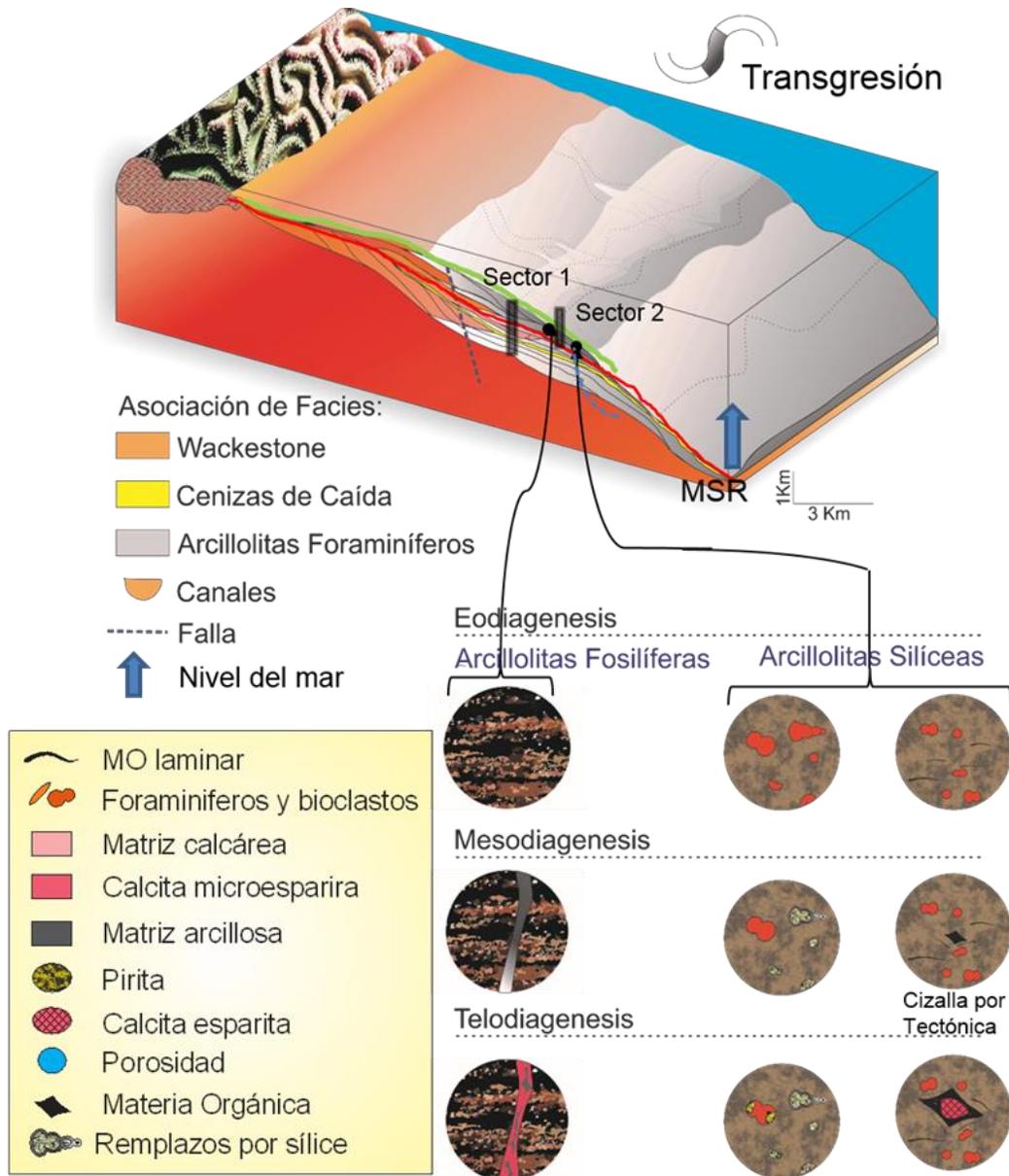
### Unidad Superior

La unidad superior es representada por una arquitectura depositacional transgresiva que indica un avance sedimentario transgresivo. En el tope la parasecuencia cambia de arcillolitas calcáreas (Facies B) a Facies de arcillolitas silíceas (Facies D). Lo que puede indicar la deposición de esas facies es un periodo asociado a baja sedimentación asociado con una subida del nivel del mar donde aumenta la concentración de materia orgánica y fosfatos.

La unidad superior se caracteriza por capas en el que aumento su espesor hacia el tope, donde el contacto entre las capas es plano y no se observan canales erosivos (ver Figura 41). Hay aumento del contenido de materia orgánica y

disminución de las mineralogías calcáreas, se infiere que corresponde al aumento del nivel del mar. La subida del nivel del mar puede deberse a la combinación de eustacia y subsidencia asociado con la extensión de rift durante el Coniaciano-Santoniano (ver Figura 43). El ambiente de depositación de la Unidad Superior fue afectado por cambios en el aumento del nivel del mar donde se evidencia cambios en la circulación e intensidades de los nutrientes, además de disminuir la oxigenación, estos cambios se observan en la disminución de la cantidad de foraminíferos planctónicos y de bioclastos.

**Figura 43.** Modelo esquemático que muestra la distribución espacial de la secuencia de depósitos y las variaciones diagenéticas en la Unidad Superior. MSR: Máxima Superficie de Regresión (línea roja).



## 8. DEFINICIÓN DE LAS MEJORES FACIES PROSPECTIVAS

### 8.1. Madurez termal de la materia orgánica

Los datos geoquímicos obtenidos de 18 muestras ayudaron a definir el nivel de la maduración termal que se puede estimar el Índice de Producción (PI),  $S1/(S1+S2)$ , que se obtiene a partir de la relación existente entre los hidrocarburos libres (S1),

los hidrocarburos obtenidos por cracking primario (S2) y el valor  $T_{max}$  alcanzado durante la segunda etapa de pirolisis, cuando los hidrocarburos pesados producen el pico S2 (McCarthy, et al., 2011). Según Peters, 1986, los valores menores de 435°C y 0.1 de  $T_{max}$  y PI, respectivamente, son indicadores de materia orgánica inmadura. Los valores de  $T_{max}$  y PI mayores de 470°C y 0.4 respectivamente, indican que se encuentran dentro de la zona de gas.

A continuación se muestra el crossplot del Índice de Producción (PI) versus  $T_{max}$  (Figura 44) muestra que la mayoría de las muestras del Miembro Pujamana en La sección Aguablanca tienen valores de  $T_{max}$  que varían del rango de 439°C a 448°C, y valores de índice de producción del rango entre 0.02 y 0.1, indicando que el miembro Pujamana se encuentra en la ventana de generación de aceite pero tienen un bajo índice de producción.

Los valores S1 y S2 son parámetros obtenidos de la pirolisis de Rock-Eval (Chilingar, et al., 2005). El pico (S1) corresponde a el hidrocarburo libre y adsorbido, evaporado en una temperatura entre 200°C-250°C. El hidrocarburo en estas condiciones se generó en subsuelo pero fue expulsado recién durante el proceso de pirolisis. El pico S2 representa el potencial medido de hidrocarburo que la roca puede generar a altas temperaturas si el proceso de madurez de la roca continúa. Por último el pico S3 refleja el CO<sub>2</sub> y el agua que se libera desde el craqueo térmico del kerégeno, durante la pirolisis (McCarthy, et al., 2011). La relación  $[S1/(S1+S2)]$  (Índice de Producción) y la temperatura ( $T_{max}$ ) ayudan a determinar la madurez de la materia orgánica. Es importante resaltar que la relación anterior no tiene en cuenta el tipo de materia orgánica, la cual autores como (Chilingar, et al., 2005) sugieren es importante para conocer la madurez de la materia orgánica. Por otro lado, el resultado del Índice de Producción con respecto al ( $T_{max}$ ) no fue lo que se esperaba, ya que como se observa en la Figura 44, aunque la  $T_{max}$  se encuentra en la ventana de aceite, este se mantiene en un intervalo de temperatura relativamente corto (439°C a 448°C) y permite ver

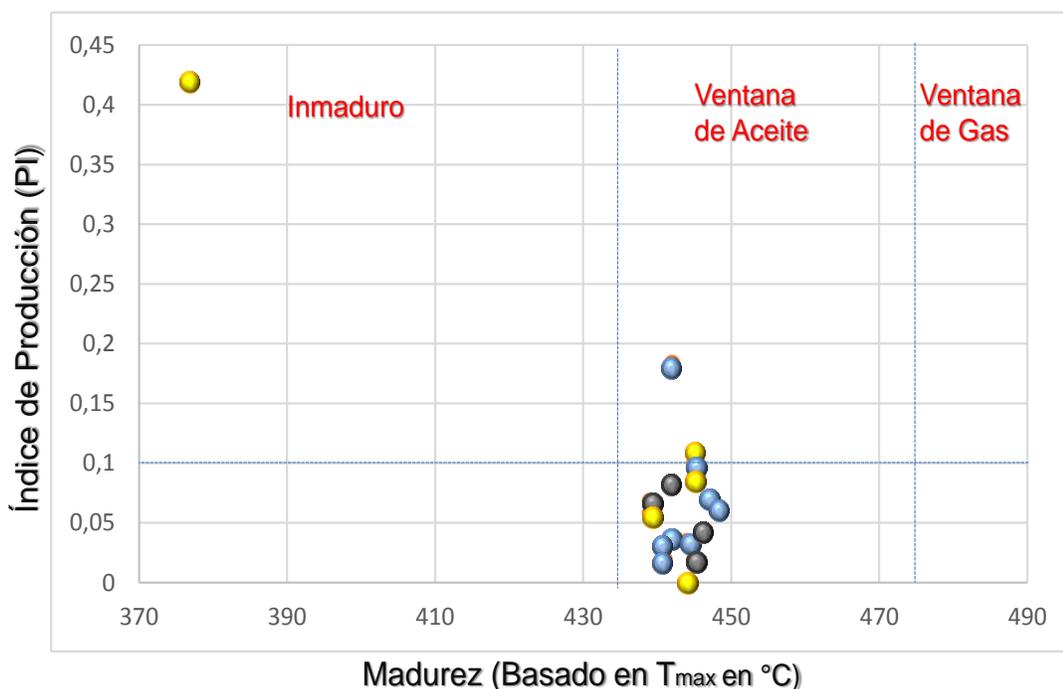
la variación del Índice de Producción relativamente constante con respecto a la profundidad. Los valores altos de S1 y de PI sugieren que la principal migración de aceite ocurrió en la parte superior del miembro Galembo (resaltado en gris en la Tabla 2), y coincide con un  $T_{max}$  que indica baja madurez termal en la unidad superior del miembro Galembo en la sección Aguablanca.

De los datos de pirolisis de Rock Eval obtenidos se infiere que posiblemente fueron alterados por la meteorización de la roca expuesta en el afloramiento y por eso dan valores más bajo de HI (Figura 44 y 45) de los registrados en trabajos anteriores (Rangel, 200)

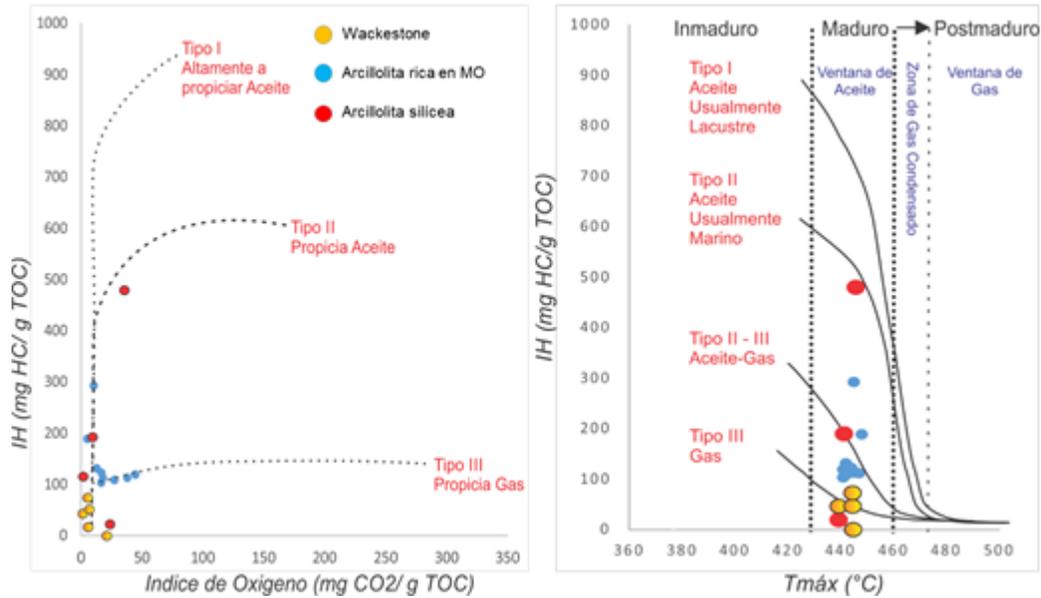
**Tabla 3.** Composición geoquímica de 18 muestras de la sección Aguablanca

Muestra	S1 mg/g	S2 mg/g	S3 mg/g	T max °C	PI	S1+S2	S1+S2+S3	TOC	HI	OI	TOC
M-1	0,4	3,22	0,22	445	0,110	3,620	3,840	4,3874	73,3919861	5,0143593	4,3874
M-2	0,3	8,46	1,16	444	0,034	8,760	9,920	6,9062	122,498624	16,7965017	6,9062
M-3	0,48	7,47	0,2	448	0,060	7,950	8,150	3,9565	188,803235	5,05497283	3,9565
M-6	1	8,95	0,32	445	0,101	9,950	10,270	3,0592	292,560146	10,460251	3,0592
M-7	0,24	2,52	0,31	445	0,087	2,760	3,070	5,0253	50,1462599	6,16878594	5,0253
M-9	0	0	0,74	444	0,000	0,000	0,740	3,5367	0	20,9234597	3,5367
M-10	0,19	2,51	0,4	447	0,070	2,700	3,100	2,2366	112,223911	17,8842887	2,2366
M-11	0,07	0,96	1,04	439	0,068	1,030	2,070	4,3436	22,1014826	23,9432729	4,3436
M-12	0,75	8,26	0,38	442	0,083	9,010	9,390	4,3105	191,625101	8,81568264	4,3105
M-14	0,11	3,72	1,39	441	0,029	3,830	5,220	3,1192	119,261349	44,5627084	3,1192
M-15	0,05	2,5	0,84	445	0,020	2,550	3,390	2,2152	112,856627	37,9198267	2,2152
M-16	0,16	2,6	0,09	439	0,058	2,760	2,850	6,0316	43,1063068	1,49214139	6,0316
M-17	0,8	1,11	0,42	377	0,419	1,910	2,330	7,4760	14,847512	5,61797753	7,4760
M-18	0,9	4,01	1,01	442	0,183	4,910	5,920	3,6964	108,48393	27,3238827	3,6964
M-19	0,34	8,71	0,85	442	0,038	9,050	9,900	6,6306	131,360661	12,8193527	6,6306
M-20	0,15	7,65	1,22	441	0,019	7,800	9,020	7,3941	103,460867	16,4996416	7,3941
M-21	0,11	5,92	0,09	445	0,018	6,030	6,120	5,1565	114,806555	1,74536992	5,1565
M-22	0,14	3,1	0,23	446	0,043	3,240	3,470	0,64774	478,587087	35,5080742	0,64774

**Figura 44.** Crossplot del Índice de Producción versus  $T_{max}$  para el miembro Galembó en la Sección Aguablanca



**Figura 45.** Diagrama de Van Krevelen del miembro Pujamana en la sección Aguablanca



## 8.2. Índice de Fragilidad

Según (Slatt, et al., 2011) las características comunes de los shale influyen en sus propiedades geomecánicas, tales propiedades las podemos clasificar en dúctil y frágil dependiendo del estado de deformación de la roca, que se pueden percibir a nivel macro en el afloramiento y micro en las secciones delgadas o imágenes de SEM. La roca se considera dúctil cuando absorbe mucha energía y se deforma antes del rompimiento, estas características se observan en las rocas con alto contenido de arcilla y materia orgánica. La fragilidad se le considera a las rocas que son altamente elásticas pero poco dúctiles y que pueden llegar a un fácil fracturamiento (Jarvie, et al., 2007; Wang and Gale, 2009; Slatt, et al., 2011), las rocas con mayor contenido de calcita y cuarzo presentan mayor fracturamiento. El índice de fragilidad está en función de la composición mineral, la diagénesis y el contenido de materia orgánica (Jarvie, et al., 2007).

El índice de fragilidad propuesto en una ecuación por (Wang and Gale, 2009) es asumido por la relación de los minerales que tienden a incrementar la fragilidad (cuarzo, calcita y dolomita) sobre los minerales que tienden a aumentar la

ductilidad (arcillas y contenido de materia orgánica) y el resto de minerales encontrados en la difracción de rayos-X.

$$BI = \frac{Qtz+Ca+Dol}{Qtz+Ca+Dol+Arcillas+Materia\ Orgánica^*} \quad (1)$$

Donde BI: es el índice de fragilidad, Qtz: cuarzo, Ca: Calcita: Dol: Dolomita y para el contenido de materia orgánica nosotros usaremos el dato de S2, el cual en trabajos anteriores (Torres, 2013; Gomez, 2014) sugieren que los datos de S2 tienen la misma tendencia del TOC.

El índice de fragilidad fue calculado para el miembro Pujamana usando la ecuación (1). Este índice de fragilidad varía de 0.3 a 0.9 y el valor promedio de mayor a menor fragilidad de las facies varia de la siguiente manera: *Wackestone de foraminíferos masiva a levemente laminar* (promedio: 0.69); *Arcillolitas silíceas fosilíferas macizas* (promedio: 0.68); y *Arcillolitas muy fosilíferas, ricas en materia orgánica* (promedio: 0.56), ver Figura 46.



## 9. CONCLUSIONES

La integración de las diferentes técnicas estratigráficas y mineralógicas concluyen que hay cinco distintas facies presentes en la Sección Aguablanca: A-Wackeston de foraminíferos maciza a levemente laminar; B- Arcillolitas muy fosilíferas, ricas en materia orgánica, moderadamente a bien laminada; C- Concreciones ricas en calcita; D- Concreciones ricas en calcita; y E- Cenizas de caída. La Facies A se presenta principalmente a la base de la sección en capas onduladas, en contacto planar y erosivo, además ocupa un 35% del total de la sección Aguablanca. Las capas delgadas a muy gruesas de la Facies B son las que se presentan con más abundancia en la sección Aguablanca con un 64%. Se observaron un total de 30 concreciones en capas arcillosas laminadas de la Facies C. La Facies D se encuentra presente en capas delgadas a muy delgadas principalmente en el tope de la sección con solo el 1%. La Facies E representado por capas muy delgadas que ocupan menos del 1%.

Se pudo concluir que los granos que conforman las facies de la sección Aguablanca son intracuenca (los foraminíferos, bioclastos indiferenciados, matriz calcárea, etc.) y extracuenca (las cenizas de caída, cuarzos detríticos, etc.). La composición de esos granos varía de base a tope de la sección y se estudió con varias técnicas que se integraron para dar una información consolidada que puede marcar cambios litológicos. Los datos tomados y analizados ayudaron a diferenciar dos Unidades en la sección Aguablanca. Los cambios en la mineralogía calcárea y arcillosa tienen una variación lateral y vertical.

La mayoría de contenido de mineralogía arcillosa y cuarzosa se encuentra en la Unidad Superior de la sección. Esa unidad presenta una disminución de los minerales calcáreos y algunos casos del contenido de foraminíferos.

La energía en el tiempo de depositación del miembro Pujamana es variable. La Unidad Inferior evidencia una alta energía, con superficies de reactivación por la aparición de canales erosivos y las estructuras rip-up. La Unidad Superior infiere

una menor energía por la ausencia de canales submarinos, disminuye la laminación y el contacto planar de las capas.

La eustacia y el cambio en las condiciones marinas son el factor dominante de la depositación de la sección Aguablanca. La Unidad Inferior infiere haber sido deposita al final de una regresión marina típico de una MSR. Mientras la Unidad Superior tiene un apilamiento típico de TST. Diagenéticamente se puede relacionar la secuencia estratigráfica con la depositación y el posterior cambio diagénético de la roca.

Se sugiere usar los minerales pesados en las tobas encontradas a lo largo de la Sección Aguablanca, además de los amonites y foraminíferos para datar la roca y afianzar la edad de la roca expuesta en la sección.

De acuerdo a los datos de Pirolisis de Rock Eval en las 18 muestras analizadas, en el miembro Pujamana domina el herogeno tipo II y III, indicando materia orgánica de procedencia marina anoxica, se infiere que los S2 bajos son obtenidos la alteración de la roca expuesta en afloramiento. El miembro Pujamana en el sector Central-Este se encuentra madura, en ventana de generación de aceite.

El análisis petrográfico permitió identificar eventos diagenéticos que influencia en la disminución o aumento de la porosidad. El neomorfismo observado en las facies de wackestone cementa la roca por formación de esparita que puede rellenar los poros y las fracturas, posteriormente disolución de los bioclastos puede generar porosidad secundaria.

Las zonas frágiles y dúctiles obtenidas con el índice de fragilidad muestran que las litofacies con mayor contenido de cuarzo y calcita, con buen contenido de materia orgánica pueden ser intervalos de interés para el fracturamiento en etapa de producción de un reservorio. Estas zonas frágiles se observaron principalmente hacia el tope de la sección Aguablanca.

## **BIBLIOGRAFIA**

BARRERO, D., PARDO, A., VARGAS, C. and MARTINEZ, J. Colombian Sedimentary Basins: nomenclature, boundaries and petroleum geology: ANH y B&M Exploration Ltda. 2007. p. 26-45.

BATHURS, R. Carbonate sediments and their diagénesis. Gran Bretaña: Elsevier, 1994. 679 p.

BERNAL, L. A. Caracterización Estratigráfica y Petrográfica de la Formación La Luna en el Sector de El Tablazo, Valle Medio del Magdalena. ACGGP. 2009. 6 p.

BENNETT, R. H., LAMBERT, M. W., HULBERT, M. H., CURRY, C. W., OLSEN, H. W. and LOWRIE, A. Microfabric and Organic Matter Impact on Burial Diagenesis from Mud to Shale, Society for Sedimentary Geology, 2012.

BOGGS, Jr., S. Petrology of Sedimentary Rocks. University of Oregon, 2009. 612 p.  
CATUNEANU, O. Principles of Sequence Stratigraphy. Elsevier, 2006, 369 p.

CHILINGAR, G.V., BURYAKOVSKY, L.A., EREMENKO, N.A. and GORFUNKEL, M.V. Geology and geochemistry of oil and gas, Elsevier, 2005, p.129-133.

INGERSOLL, R. V., BULLARD, T. F., FORD, R. L., GRIMM, J. P., PICKLE, J. D and SARES, S. W. The Effect of Grain Size on Detrital Modes: A Test of the Gazzi-Dickinson Point-Counting Method, Journal of Sedimentary Petrology, 1984. Vol. 54, n. 1, p. 103-116.

DUNHAM, R.J. Classification of Carbonate Rocks According to Depositional Textures. In: W.E. Ham (Ed.). Classification of Carbonate Rocks. American Association of Petroleum Geologists Mem. 1, 1962, 108-121. Tulsa, Oklahoma.

ELTOM, H., ABDULLATIF, O., MAKKAWI, M. y ABDULLRAZIQ, A. Microporosity in the Upper Jurassic Arab-D carbonate reservoir, central Saudi Arabia: an outcrop analogue study.: Journal of Petroleum Geology, 2013. Vol 36, N. 3, p. 281-297.

FLÜGEL, E. Microfacies of Carbonate Rocks, 2nd ed., 2010. XXIII, 984 p.

FOLK, R. L., Spectral Subdivision of Limestones Types. In: W.E. Ham (Ed.). Classification of Carbonate Rocks. American Association of Petroleum Geologists, Mem. 1, 1962, 62-84, Tulsa, Oklahoma.

FOLK, R. L., Petrology of Sedimentary Rocks. Austin Texas, 1974, 184 pp.

GALE, J., REED, R.M. and HOLDER, J. Natural fractures in the Barnett Shale and their importance for hydraulic fracture treatments: American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 2007. Vol. 91, N. 4, p.603–622.

GARCÍA, D. F. y PARRA, P. Áreas con Mayor Potencial de Carga de Petróleo: Cuenca Valle Medio del Magdalena (VMM) y Occidente de la Cordillera Oriental, Colombia, VIII Simposio Bolivariano - Exploración Petrolera en las Cuencas Subandinas, 2003.

GOMEZ, A. Integrated geological characterization and distribution of the Salada member, La Luna Formation, in the central area of The Middle Magdalena Basin, Colombia. Master's thesis at The University of Oklahoma, 2014.

JARVIE, D., H. R. J., RUBLE, T. E. and POLLASTRO, R. M. Unconventional shale-gas systems: The Mississippian Barnett Shale of north-central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment: American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 2007. Vol. 91, N. 4, p. 475-499.

LAW, B. E. and CURTIS, J. B. Introduction to unconventional petroleum systems, Introduction to unconventional petroleum systems: American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 2002. Vol. 86, N. 11, p. 1851-1852.

LOUCKS, R. G., REED, R. M., RUPPEL, S. C., and URSULA HAMMES. Spectrum of pore types and networks in mudrocks and a descriptive classification for matrix-related mudrock pores. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 2011. Vol. 96, n. 6, p. 1071-1098.

NARANJO, V., DUQUE, N. y MORENO, N. Definición de eventos diagenéticos y carga de hidrocarburos mediante estudios de petrología en La Formación Rosablanca, Cuenca del Valle Medio, ACGGP, 2009.

MCCARTHY, K., NIEMANN, M., PALMOWSKI, D., PETERS, K. y STANKIEWICZ, C. La geoquímica básica del petróleo para la evaluación de las rocas generadoras: Oilfield Review, 2011. Vol. 23, N. 2, p. 35-47.

MONROE, R. M. Petrographic and Stratigraphic Analysis of the Barnett Shale (Mississippian) in Hill County, Texas: Evidence for Eustasy and Tectonism, Texas Christian University: University of Texas at Dallas, 2009. 155 p.

MORALES, L. General Geology and oil occurrences of Middle Magdalena Valley, Colombia. In: Habitat of Oil Symposium: American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 1958, p 641- 695.

O'BRIEN, N. R and SLATT, R. M. Argillaceous Rock Atlas. Springer, 1990.

PETERS, K. E. Guidelines for evaluating petroleum source rock using programmed pyrolysis: American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 1986. Vol. 70, p. 318-329.

POTTER, P. E., MAYNARD, J. B. Y DEPETRIS, P. J. Mud and Mudstones: Introduction and Overview, Springer, 2005. 297 p.

RANGEL, A., PARRA, P. y NIÑO, C., The La Luna formation: chemostratigraphy and organic facies in the Middle Magdalena Basin. *Organic Geochemistry*, 2000. Vol. 31, p.1267-1284.

RANGEL, A., MOLDOWAN, J. M. NIÑO, C., PARRA, P. and GIRALDO, B. N. Umir Formation: Organic geochemical and stratigraphic assessment as cosource for Middle Magdalena basin oil, Colombia, *Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 2002. Vol 86, n. 12, p. 2069-2087.

RAMÓN, J.C., DZOU, L.I., HUGHES, W.B. and HOLBA, A.G. Evolution of the Cretaceous organic facies in Colombia: implications for oil composition: *Journal of South American Earth Sciences*, 2001.14: 31-50.

REYES, J. P., FAJARDO, A, MANTILLA, M y BARRAGAN, M. Secuencia Calcárea del Cretáceo del Valle Medio Del Magdalena, Colombia, una Nueva Frontera Exploratoria: *ACGGP*, 2000. 17 p.

ROSS, D. J. K. and BUSTIN, R. M. Characterizing the shale gas resource potential of Devonian–Mississippian strata in the Western Canada sedimentary basin: Application of an integrated formation evaluation: *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 2008. Vol. 92, N. 1, p. 87–125.

ROSS, D. J.K. and BUSTIN, R. M. The importance of shale composition and pore structure upon gas storage potential of shale gas reservoirs, *Marine and Petroleum Geology*, 2009. Vol 26, p. 916–927.

ROYERO, J.M., y CLAVIJO, J. Mapa geológico generalizado departamento de Santander. Memoria Explicativa, Ingeominas, 2001.

SLATT, R. M., y ABOUSLEIMAN, Y. Merging sequence stratigraphy and geomechanics for unconventional gas shales: *The Leading Edge*, March, 2011. P. 274-282.

SLATT, R. M. Important Geological Properties of Unconventional Resource Shales: *OCGS*, 2011. p. 224-253.

SLATT, R. M., O'BRIEN, N. R., ROMERO, A. M. and RODRIGUEZ, H. H. Eagle Ford Condensed Section and Its Oil and Gas Storage and Flow Potential: *AAPG Annual Convention and Exhibition*, Long Beach, California, 2012, 19 p.

SCHIEBER, J., SOUTHARD, J. and THAISEN, K. Accretion of mudstone beds from migrating floccule ripples: *Science*, 2007. Vol. 318, 1760-1763 p.

SCHIEBER, J., KRINSLEY, D., and RICIPUTI, L. Diagenetic origin of quartz silt in mudstones and implications for silica cycling. *Nature*, 2000. Vol. 406, p. 981-985

SCHLÖMER, S., and KROOSS, B. M. Experimental characterization of the hydrocarbon sealing efficiency of cap rocks: *Marine and Petroleum Geology*, 1997. Vol. 14, p. 565–580.

TORRES-PARADA, E. J., RODRIGUEZ, H. L. and GARCIA-GONZALEZ, M. Hydrocarbon Potential of La Luna Formation in the Cesar Valley Basin, Colombia. AAPG Search and Discovery Article, AAPG Annual Convention and Exhibition, 2012, April 22-25.

TORRES-PARADA, E. J. Unconventional Gas Shale Assessment of La Luna Formation, in the Central and South Areas of the Middle Magdalena Valley Basin, Colombia. Master's thesis at The University of Oklahoma, 2013.

TOSELLI, A. J. Elementos básicos de petrología ígnea, Instituto Superior De Correlación Geológica, Tucumán, Argentina, 2010. 344 p.

WANG, F. P. y. GALE, J. F. W. Screening criteria for shale-gas systems: Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions, 2009. Vol. 59, p. 779-793.

WALKER, G.P.L. The Taupo Pumice: product of the most powerful known (ultraplinian) eruption?: Journal of Volcanology and Geothermal Research, 1982. Vol. 8, p 69-94.

WALLS, F. A new method to help identify unconventional targets for exploration and development through integrative analysis of clastic rock properties: Houston Geological Society Bulletin, Texas, 2004. P. 34-49.

## **CD ANEXO**

Anexo A. Sección Aguablanca Segmento 1

Anexo B. Sección Aguablanca Segmento 2