

## **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

# **CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA Y GEOQUÍMICA DE LA FORMACIÓN SAN LUÍS EN LAS LOCALIDADES UBICADAS AL SUR DE CAUJARAO Y LA TABLA, ESTADO FALCÓN**

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Por las Brs. Fernández D. Andreina D.,  
Martins P. Laura E.  
Para optar al Título de  
Ingeniero Geólogo

Caracas, Noviembre de 2012

## **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

# **CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA Y GEOQUÍMICA DE LA FORMACIÓN SAN LUÍS EN LAS LOCALIDADES UBICADAS AL SUR DE CAUJARAO Y LA TABLA, ESTADO FALCÓN**

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Lenin González

CO-TUTOR ACADÉMICO: Prof. Ander de Abrisqueta

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Por las Brs. Fernández D. Andreina D.,  
Martins P. Laura E.  
Para optar al Título de  
Ingeniero Geólogo

Caracas, Noviembre de 2012

Caracas, Noviembre de 2012

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Geológica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por los Bachilleres Andreina D. Fernández D. y Laura E. Martins P., titulado:

**“Caracterización geológica y geoquímica de la Formación San Luis  
en las localidades ubicadas al sur de Caujarao y La Tabla  
Estado Falcón”**

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Geólogo, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por los autores, lo declaran APROBADO.

Prof. José Méndez  
Jurado

Prof. Patricia González  
Jurado

Prof. Lenin González  
Tutor Académico

## AGRADECIMIENTOS

### *Andreina Fernández*

Primeramente agradezco a Dios por darme la vida y guiarme por este camino que me hace realmente feliz.

A la Universidad Central de Venezuela en general y a la Escuela de Geología, Minas y Geofísica, lugar que ha sido mi segundo hogar durante los últimos años, el cual me ha dado la oportunidad de cumplir mis metas y el sueño de ser Ingeniero Geólogo.

A mi familia, comenzando por mis padres por siempre apoyarme, velar por mi y guiarme siempre por el mejor camino, a mis hermanos que día a día salen adelante, ellos también son parte de mis logros al igual que mis bellos sobrinos Gaby, Diego y Andrés que los amo con locura. A Fátima Andreina, Ana Karina y Liz Katherine las mejores primas y hermanas que puedo tener en la vida. De igual manera agradezco a mi Tía Alicia por ser mi segunda madre. A mi abuelita aquí conmigo y mi abuelo que esta en el cielo el cual estoy segura me cuida todos los días.

A Fiorella (lela), Stefania (nia), Katherine, Andreina (pollo) y Fanny (fa) mis mejores amigas, están conmigo en las buenas y malas y sé que seguirá siendo así, amigas con las cuales he pasado los mejores momentos de descontrol de mi vida jajajaj, las quiero!. A Jesus (Yisus) y Zapata (Chanclis) han sido mis amigos desde hace años y lo serán durante mi vida, son los que mas me hacen reir siempre.

A Laura mi compañera de Tesis y amigas, la cual veo los últimos meses mas que a mi mama jajaja, le agradezco por la constancia y porque es parte de este proyecto donde ambas estamos cumpliendo nuestra meta.

A Eduardo que durante los dos últimos años ha sido parte importante de mi vida y ha estado incondicionalmente a mi lado, en las buenas y malas, que le agradezco por comprenderme y entenderme en mis momentos de mayor estrés y colaborar conmigo en lo que puede. Espero tenerte mucho tiempo a mi lado.



A mis amigos de la escuela Ache, Fercho, Ali, Raul por los buenos momentos compartidos y el apoyo. Y a mis amigos de Ingeniería de los cuales tengo muchos recuerdos.

A mi tutor Lenin por hacerme parte de este proyecto y por no abandonarnos durante este tiempo, por el apoyo jajaja y por aguantarnos todos los días, GRACIAS.

A Ricardo Alezones que siempre tiene una respuesta para todo y sabe guiar a uno cuando no sabes que hacer, por sus jalones de cabello y oreja los cuales extrañare. A Enzo que nos guio bastante con ArcGis y David por facilitarnos el equipo de Fluorescencia de Rayos X.

Al Profesor Ramón Montero y al Instituto de Ciencias de la tierra en la Facultad de Ciencias que nos facilitaron los estudios de Absorción Atómica.

A INGEOMIN e INTEVEP, al Sr. Ellys Laguado por el estudio de Microscopia Electrónica de Barrido.

### *Laura Martins*

Primero que todo a Dios, por poner en mi camino a dos personas tan maravillosas como son mis padres, ejemplos a seguir, dignos de admiración y por darme la oportunidad de vivir.

A mis padres, Lineu y Ermelinda, por ser un apoyo incondicional y una fuente de inspiración, por aguantarme en estos últimos meses donde han tenido que soportar mis ataques de estrés. Gracias por concederme la vida y hacerme quien soy, no hay palabras que describan lo que siento por ustedes son mi mayor orgullo. Los amo ooooo infinito. A mi hermano Lineu, por ser tan especial y aguantarme en los momentos difíciles y porque de una u otra manera ha hecho de mi una mejor persona. Te amo oooooo.

A mi familia en especial a mis abuelos Augusto († 2007) y Ermelinda, por abrirme las puertas de su casa, por cuidarme siempre y ser seres especiales. Abuelo te extraño mucho. A mis tías Dety y Margarita, mis primos Miguel, Carlos y Alexandra por estar siempre conmigo.

A mi amiga Ana Karina, por su amistad, por estar en las buenas y las no tan buenas, nunca olvidaré que pasaba más tiempo de las vacaciones en mi casa por ti, por los momentos vividos desde el comienzo de esta maravillosa experiencia llamada vida universitaria. Muchas gracias. TQM.

A mis amigos: Lailyn (por tu amistad, juntas desde bachillerato y ahora terminando esta bella etapa), Jesús Mariano (quien siempre me saca una sonrisa, TQM bro), Manu (por hacerme reír tanto negro jajajaja tqm). Se les quiere

A mi compañera de tesis Nina (la mejor que pude tener) por haber compartido los momentos de alegría y de dificultad, por acompañarme y superar los obstáculos para alcanzar la meta en común, por su amistad. Somos un buen equipo. TQM.

A mis amigos y/o compañeros de la escuela: Aché (gracias por siempre estar TQM), Ali, Fercho, Giannina, Raul, Victoria, Shira, Yessy, Marco, por los buenos y no tan

buenos momentos, con quienes compartí una de las mejores etapas de mi vida. Se les quiere.

A la Ilustre Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Geología, Minas y Geofísica, por abrirme sus puertas, por permitirme estudiar lo que me gustaba y así cumplir esta meta tan anhelada.

A mi tutor Lenin González, por estar siempre, por su trabajo y dedicación; así como por sus sugerencias y observaciones siempre inteligentes y oportunas. Por nunca poner una mala cara a pesar de haberlo fastidiado bastante jajajajaja. Muchas gracias por la oportunidad y confianza dada, es el mejor tutor que pude tener.

Al profesor Ricardo Alezones, por siempre tener una respuesta a mis preguntas, por ser una fuente de información inagotable, una excelente persona y por sacarme una sonrisa, así fuera despeinándome (extrañare eso).

A los profesores: Alfredo Mederos, por su cariño, Rafael Falcón (ya no estaré afuera de la oficina de Lenin para que usted sepa si el profesor está o no), Enzo Caraballo (por enseñarme a usar Arcgis y siempre estar dispuesto a resolver mis dudas), David Mendi (por permitirme ser su prepadora y lo aprendido), Carolina Machillanda, Ruthman Hurtado, Maria Antonia Lorente (por siempre estar pendiente y su valiosa ayuda).

A la señora Morella, Arturo (por ayudarme en la elaboración de las secciones finas), a INTEVEP en especial al Señor Ellis Laguado, por su valiosa colaboración y disposición. Al Prof. Ramón Montero del Instituto de Ciencias de la Tierra, por el apoyo prestado.

En fin, a todos aquellos que de una u otra manera formaron parte de este gran proyecto.

Muchas gracias, se despide la niña de San Luis.

**Fernández D., Andreina D.**

**Martins P., Laura E.**

**CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA Y GEOQUÍMICA DE LA FORMACIÓN SAN LUÍS EN LAS LOCALIDADES UBICADAS AL SUR DE CAUJARAO Y LA TABLA, ESTADO FALCÓN**

**Tutor Académico: Prof. Lenin González. Co-tutor Académico: Prof. Ander de Abrisqueta. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. 2012, p .186**

**Palabras Claves:** Facies, Carbonatos, Geoquímica, Formación San Luis.

**Resumen**

Se realizó una caracterización geológica y geoquímica de la Formación San Luis, a partir de un levantamiento geológico de campo en una sección ubicada en la zona norcentral del estado Falcón, específicamente al sur de Caujarao y La Tabla.

Por medio del levantamiento de campo se definieron 10 facies litológicas para la Formación San Luis en una sección de la carretera Coro- Churuguara, siendo completadas con un análisis petrográfico de 22 muestras recolectadas en campo; y, en base a su descripción detallada se definieron 8 facies, se ubicaron en una ambiente detrás del arrecife, el cual engloba el talud exterior de la plataforma, el arrecife orgánico, plano arrecifal y la laguna interna, correspondientes a las facies de Wilson (1975) 4, 5, 6, y 7. En el cinturón 4 se ubicó la facies textural Brecha; en el cinturón 5 las facies clasificadas como “Pillows” o Framestone y Arrecife o Bindstone; en el cinturón 6 las facies texturales de Rudstone, Grainstone, Floatstone y Packstone y en el cinturón 7 las facies de Wackestone y Calcarenita.

Se determinaron las concentraciones los elementos mayoritarios ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ , expresados en p/p) y ( $\text{Ni}$  y  $\text{Zn}$ , expresados en ppm) a través de la técnica de Absorción Atómica; ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{SiO}_2$ , expresados en p/p) y ( $\text{V}$ , expresados en ppm) a través de la técnica de Fluorescencia de Rayos X. Además se obtuvo el porcentaje de acierto mediante el análisis de funciones discriminantes dando un valor de 90,91 lo cual indica una buena clasificación de las facies.

Se realizó una actualización cartográfica basada en los datos tomados en campo y lo extraído de SANDIA (1981), y, se construyó una columna estratigráfica donde se ilustró las formaciones Guarabal, San Luis y Patiecitos encontradas en campo, y la clasificación de facies por las técnicas realizadas en este trabajo.

## ÍNDICE

1.1. Introducción .....	1
1.3. Objetivos .....	2
1.3.1. Objetivo general .....	2
1.3.2. Objetivos específicos .....	2
1.5. Ubicación del área de estudio .....	3
1.6. Trabajos previos.....	3
<b>GEOLOGÍA REGIONAL.....</b>	<b>6</b>
2.1. Generalidades .....	6
2.2. Modelos del origen de la Cuenca de Falcón.....	7
2.2.1. Modelos "Pull apart" .....	7
2.2.2. Modelo de "rifting" .....	12
2.2.3. Modelo de colapsos extensionales en una cuenca retroarco .....	12
2.3. Estratigrafía regional.....	14
2.4. Estratigrafía y paleoambiente de unidades aflorantes en la zona de estudio .....	20
2.4.1. Formación San Luis .....	22
2.4.2. Formación Patiecitos.....	23
2.4.3. Formación Guarabal.....	24
2.5. Geología local .....	25
2.5.1. Estratigrafía local.....	26
3.1. Fase Pre-campo .....	31
3.2. Fase de Campo .....	31
3.3. Fase de Laboratorio.....	32
3.3.1. Estudio Petrográfico .....	32
3.3.2. Pulverizado de las muestras .....	32
3.3.3. Microscopía Electrónica de Barrido.....	38
3.4. Fase de Oficina .....	39
3.4.1. Actualización Cartográfica .....	39
3.4.2. Clasificación de Facies .....	40
3.4.3. Procesamiento de datos estadísticos .....	41

<b>4.2. DESCRIPCIÓN DE FACIES</b> .....	42
<b>4.2.1. FACIES DE WACKESTONE</b> .....	42
<b>4.2.2 FACIES DE GRAINSTONE</b> .....	47
<b>4.2.3. FACIES DE FLOATSTONE:</b> .....	49
<b>4.2.3.1. Sub-facies 1: Floatstone de Coral en posición de crecimiento</b> .....	49
<b>4.2.3.2. Sub-facies 2: Floatstone de Fragmentos de coral</b> .....	49
<b>4.2.4. FACIES DE RUDSTONE</b> .....	52
<b>4.2.4.1. Sub-facies 1: Rudstone de <i>Diploria</i> sp.</b> .....	52
<b>4.2.4.2. Sub-facies 2: Rudstone de Coral en posición de crecimiento</b> .....	52
<b>4.2.4.3. Sub-facies 3: Rudstone de Coral aplastado</b> .....	53
<b>4.2.5. FACIES DE ARRECIFE O BINDSTONE</b> .....	59
<b>4.2.5.1. Sub-facies 1: Arrecife de <i>Diploria</i> sp.</b> .....	59
<b>4.2.5.2. Sub-facies 2: Arrecife de Coral aplastado</b> .....	60
<b>4.2.5.3. Sub-facies 3: Arrecife con Algas rojas</b> .....	61
<b>4.2.5.4. Sub-facies 4: Arrecife de Coral en posición de crecimiento</b> .....	61
<b>4.2.6. FACIES DE “PILLOWS” O FRAMESTONE</b> .....	71
<b>4.2.7. FACIES BRECHA:</b> .....	74
<b>4.2.8. FACIES CALCARENITA:</b> .....	75
<b>4.3. DISCUSIÓN PETROGRÁFICA</b> .....	77
<b>4.3.1. Cambios mineralógicos y texturales</b> .....	77
<b>4.3.1.1. Matriz</b> .....	77
<b>4.4. CONCLUSIONES</b> .....	94
<b>6.1. Conclusiones</b> .....	128
<b>6.2. Recomendaciones</b> .....	131
<b>1.1. Espectrometría Absorción atómica</b> .....	136
<b>1.2. Fluorescencia de rayos X</b> .....	149
<b>1.3. Microscopio Electrónico de Barrido</b> .....	154
<b>1.4. Clasificación de Dunham, Embry y Clovan</b> .....	161
<b>1.5. Facies estándar de Wilson</b> .....	162
<b>1.6. Métodos estadísticos</b> .....	166

<b>APÉNDICE 2</b> .....	169
<b>APÉNDICE 3</b> .....	170
<b>APÉNDICE 4</b> .....	170
<b>ANEXO 1</b>	
<b>ANEXO2</b>	
<b>ANEXO3</b>	



## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Mapa de Venezuela. Tomado de: <a href="http://maps.google.co.ve/maps?hl=es&amp;tab=wl">http://maps.google.co.ve/maps?hl=es&amp;tab=wl</a> .....	3
<b>Figura 2:</b> Mapa 6249, escala 1:100000, tomado de Instituto geográfico de Venezuela Simón Bolívar.....	3
<b>Figura 3.</b> Ubicación de la Cuenca de Falcón y sus límites. Tomado de SILVA, M (2005).....	6
<b>Figura 4.</b> Evolución de las cuencas "pull-apart" Falcón y Bonaire Tomado de SILVA, M (2005).....	8
<b>Figura 5.</b> Modelo de generación de cuencas pull-apart episuturales. Tomado y modificado de MACELLARI (1995).....	9
<b>Figura 6.</b> Modelo de generación de cuencas pull-apart episuturales. Tomado y modificado de MACELLARI (1995).....	10
<b>Figura 7.</b> Modelo de generación de cuencas pull-apart episuturales. Tomado y modificado de MACELLARI (1995).....	10
<b>Figura 8.</b> Modelo conceptual de la cuenca de Falcón, Tomado y modificado de BOESI & GODDARD (1991).....	11
<b>Figura 9.</b> Modelo de orogeno de flotación para la cuenca de Falcón Bonaire. Tomado PORRAS (2000, cit. en LEAL Y RIVERO, 2004).....	14
<b>Figura 10.</b> Configuración de la cuenca de Falcón durante el Oligoceno (tomado de GONZÁLEZ, P, 2009).....	16
<b>Figura 11.</b> Configuración de la cuenca de Falcón durante el Mioceno Temprano (tomado de GONZÁLEZ, P, 2009).....	18
<b>Figura 12.</b> Configuración de la cuenca de Falcón durante el Mioceno Medio-Tardío (tomado de González, P, 2009).....	20
<b>Figura 13.</b> Fotografía de la zona de estudio carretera vieja Coro-Churuguara. Tomada por Andreina Fernández.....	26

<b>Figura 14.</b> Fotografía panorámica de un afloramiento de calizas arrecifales de la Formación San Luis en la Carretera vieja Coro-Churuguara. Tomada por Laura Martins.....	27
<b>Figura 15.</b> Fotografía de un Grainstone. Tomada por Laura Martins.....	27
<b>Figura 16.</b> Distribución de las 22 muestras estudiadas según análisis petrográfico.....	28
<b>Figura 17.</b> Fotografía de los “Pillows” observados en campo. Tomada por Andreina Fernández.....	28
<b>Figura 18.</b> Fotografía de un derrumbe de la Formación Patiecitos. Tomada por Andreina Fernández.....	29
<b>Figura 19.</b> Foto de los niveles conglomeraticos de la Formación Guarabal. Tomada por Andreina Fernández.....	30
<b>Figura 20.</b> Molienda Shatterbox. Tomada por Andreina Fernández .....	32
<b>Figura 21.</b> Capsula Shatterbox con muestra pulverizada. Tomada por Andreina Fernández.....	33
<b>Figura 22.</b> Equipo de Absorción atómica. Tomado por Andreina Fernández.....	34
<b>Figura 23.</b> Metodología para Absorción Atómica.....	35
<b>Figura 24.</b> Equipo de Fluorescencia de Rayos X. Tomada por Andreina Fernández.....	36
<b>Figura 25.</b> Muestras en los dispositivos. Tomada por Laura Martins.....	37
<b>Figura 26:</b> Portamuestras. Tomada por Laura Martins.....	37
<b>Figura 27.</b> Metodología para Microscopia Electrónica de Barrido.....	39
<b>Figura 28.</b> Petrografía SL-102.....	44
<b>Figura 29.</b> Petrografía SL-102.....	45
<b>Figura 30.</b> Petrografía SL-127. ....	46
<b>Figura 31.</b> Petrografía SL-128.....	48
<b>Figura 32.</b> Petrografía SL-126.....	50
<b>Figura 33.</b> Petrografía SL-85.....	51
<b>Figura 34.</b> Petrografía SL-131.....	54

<b>Figura 35.</b> Petrografía SL-108.....	55
<b>Figura 36.</b> Petrografía SL-132.....	56
<b>Figura 37.</b> Petrografía SL-110.....	57
<b>Figura 38.</b> Petrografía SL-122.....	58
<b>Figura 39.</b> Petrografía SL-96.....	62
<b>Figura 40.</b> Petrografía SL-96.....	63
<b>Figura 41.</b> Petrografía SL-133.....	63
<b>Figura 42.</b> Petrografía SL-133.....	64
<b>Figura 43.</b> Petrografía SL-105.....	65
<b>Figura 44.</b> Petrografía SL-113.....	66
<b>Figura 45.</b> Petrografía SL-113.....	67
<b>Figura 46.</b> Petrografía SL-121.....	67
<b>Figura 47.</b> Petrografía SL-119.....	68
<b>Figura 48.</b> Petrografía SL-119.....	69
<b>Figura 49.</b> Petrografía SL-112.....	70
<b>Figura 50.</b> Petrografía SL-114.....	70
<b>Figura 51.</b> Petrografía SL-123.....	72
<b>Figura 52.</b> Petrografía SL-124.....	73
<b>Figura 53.</b> Petrografía SL-101.....	75
<b>Figura 54.</b> Petrografía SL-125.....	76
<b>Figura 55.</b> Cemento.....	79
<b>Figura 56.</b> Cristales de Pirita, SEM, petrografía SL-108 (3,300x).....	81
<b>Figura 57.</b> Ankerita.....	81
<b>Figura 58.</b> Pellets .....	83
<b>Figura 59.</b> Micritización.....	84
<b>Figura 60.</b> Disolución.....	85
<b>Figura 61.</b> Inversión Heteroaxial.....	86
<b>Figura 62.</b> Piritización 1 petrografía SL-108.....	88
<b>Figura 63.</b> Piritización, SEM, muestra SL-108.....	88
<b>Figura 64.</b> Silicificación.....	89

<b>Figura 65.</b> Compactación por fracturamiento.....	90
<b>Figura 66.</b> Porosidad por disolución.....	91
<b>Figura 67.</b> Estilolita.....	92
<b>Figura 68.</b> Materia Orgánica.....	93
<b>Figura 69.</b> Modelo de distribución de Facies de la Formación San Luis.....	95
<b>Figura 70.</b> Relación CaO vs MgO.....	100
<b>Figura 71.</b> Relación CaO vs Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	100
<b>Figura 72.</b> Relación SiO <sub>2</sub> vs K <sub>2</sub> O.....	100
<b>Figura 73.</b> Relación Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> vs CaO.....	100
<b>Figura 74.</b> Relación Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> vs SiO <sub>2</sub> .....	101
<b>Figura 75.</b> Relación Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> vs TiO <sub>2</sub> .....	101
<b>Figura 76.</b> Relación CaO vs MnO.....	101
<b>Figura 77.</b> Relación Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> vs V.....	101
<b>Figura 78.</b> Relación Na <sub>2</sub> O vs K <sub>2</sub> O.....	101
<b>Figura 79.</b> Relación MgO vs K <sub>2</sub> O.....	101
<b>Figura 80.</b> Relación SiO <sub>2</sub> vs CaO.....	102
<b>Figura 81.</b> Caja gráfica de SiO <sub>2</sub> .....	103
<b>Figura 82.</b> Caja gráfica de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	104
<b>Figura 83.</b> Caja gráfica de K <sub>2</sub> O.....	104
<b>Figura 84.</b> Caja gráfica de Na <sub>2</sub> O.....	105
<b>Figura 85.</b> Caja gráfica de CaO.....	105
<b>Figura 86.</b> Caja gráfica de Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	106
<b>Figura 87.</b> Caja gráfica de MgO.....	106
<b>Figura 88.</b> Caja gráfica de MnO.....	107
<b>Figura 89.</b> Caja gráfica de V.....	107
<b>Figura 90.</b> Caja gráfica de Ni.....	118
<b>Figura 91.</b> Caja gráfica de Zn.....	118
<b>Figura 92.</b> Gráfico de análisis discriminante.....	111
<b>Figura 93.</b> Gráfico de análisis discriminante interpretado.....	112
<b>Figura 94.</b> Micrografía de barrido electrónico de la muestra SL-85.....	116

<b>Figura 95.</b> Análisis composicional de la muestra SL-85, mediante la técnica Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDS).....	117
<b>Figura 96.</b> Micrografía de barrido electrónico de la muestra SL-108 (A1).....	118
<b>Figura 97.</b> Análisis composicional de la muestra SL-108 (A1), mediante la técnica <i>Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy</i> (EDS).....	119
<b>Figura 98.</b> Micrografía de barrido electrónico de la muestra SL-108 (A2).....	120
<b>Figura 99.</b> Análisis composicional de la muestra SL-108 (A2) mediante la técnica <i>Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy</i> (EDS).....	121
<b>Figura 100.</b> Micrografía de barrido electrónico de la muestra SL-128 (A1).....	122
<b>Figura 101.</b> Análisis composicional de la muestra SL-128 (A1), mediante la técnica <i>Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy</i> (EDS).....	123
<b>Figura 102.</b> Micrografía de barrido electrónico de la muestra SL-128 (A3).....	124
<b>Figura 103.</b> Análisis composicional de la muestra SL-128 (A3), mediante la técnica <i>Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy</i> (EDS).....	125
<b>Figura 104.</b> Esquema básico de un espectrofotómetro de absorción atómica. Tomado de W.F. Pickering (1980).....	136
<b>Figura 105.</b> Esquema del trayecto por el haz óptico en la espectrometría de absorción atómica.....	137
<b>Figura 106.</b> Lámpara de cátodo hueco. Tomado de Walton y Reyes (2005).....	138
<b>Figura 107.</b> Componentes para obtener los átomos en estado fundamental. Tomado de (Universidad de Salamanca, 2005).....	142
<b>Figura 108.</b> Zonas de llama. Tomado de Universidad de Salamanca.....	143
<b>Figura 109.</b> Longitudes de onda de líneas de absorción. Tomado de Universidad de Salamanca.....	144
<b>Figura 110.</b> Sensibilidad y límites de detección. Tomado de (Universidad de Salamanca, 2005).....	146
<b>Figura 111.</b> Método de adición. Tomado de (Universidad de Alicante, 2008).....	147
<b>Figura 112.</b> Método de adición. Tomado de (Universidad de Alicante, 2008).....	148
<b>Figura 113.</b> Equipo de Fluorescencia de Rayos X. Fotografía tomada por Andreina Fernández.....	149

<b>Figura 114.</b> Geometría de excitación de la muestra y detección de la radiación característica. (MARTINEZ ET AL, 2006).....	150
<b>Figura 115.</b> Portamuestras giratorio. (MARTINEZ ET AL, 2006).....	151
<b>Figura 116.</b> Esquema de un Microscopio Electrónico de Barrido Tomada de <a href="http://www.ecured.cu/index.php/Archivo:Microscopio-barrido.jpg">http://www.ecured.cu/index.php/Archivo:Microscopio-barrido.jpg</a> .....	156
<b>Figura 117.</b> Imagen obtenida a partir de un detector de electrones secundarios, tomada de <a href="http://www.uned.es/cristamine/mineral/metodos/sem.htm">http://www.uned.es/cristamine/mineral/metodos/sem.htm</a> .....	157
<b>Figura 118.</b> Imagen obtenida a partir de un detector de electrones retrodispersados Tomada de <a href="http://www.uned.es/cristamine/mineral/metodos/sem.htm">http://www.uned.es/cristamine/mineral/metodos/sem.htm</a> .....	158
<b>Figura 119.</b> Clasificación de Embry y Clovan (1972) .....	162
<b>Figura 120.</b> Distribución de las nueve facies principales en una plataforma carbonatada. Modificada de Wilson (1975).....	163
<b>Figura 121.</b> Ejemplo de diagrama de caja.....	167
<b>Figura 122.</b> Relación $Al_2O_3$ vs $K_2O$ .....	172
<b>Figura 123.</b> Relación $Al_2O_3$ vs $Na_2O$ .....	172
<b>Figura 124.</b> Relación $Al_2O_3$ vs $MgO$ .....	172
<b>Figura 125.</b> Relación $Al_2O_3$ vs $Fe_2O_3$ .....	172
<b>Figura 126.</b> Relación $CaO$ vs $Fe_2O_3$ .....	173
<b>Figura 127.</b> Relación $CaO$ vs $MnO$ .....	173
<b>Figura 128.</b> Relación $CaO$ vs $Na_2O$ .....	173
<b>Figura 129.</b> Relación $CaO$ vs $K_2O$ .....	173
<b>Figura 130.</b> Relación $CaO$ vs $TiO_2$ .....	173
<b>Figura 131.</b> Relación $Fe_2O_3$ vs $MnO$ .....	173
<b>Figura 132.</b> Relación $Fe_2O_3$ vs $MgO$ .....	174
<b>Figura 133.</b> Relación $Fe_2O_3$ vs $TiO_2$ .....	174
<b>Figura 134.</b> Relación $Fe_2O_3$ vs $Na_2O$ .....	174
<b>Figura 135.</b> Relación $Fe_2O_3$ vs $K_2O$ .....	174

<b>Figura 136.</b> Relación MnO vs MgO.....	174
<b>Figura 137.</b> Relación MnO vs Na <sub>2</sub> O.....	174
<b>Figura 138.</b> Relación MnO vs TiO <sub>2</sub> .....	175
<b>Figura 139.</b> Relación MnO vs K <sub>2</sub> O.....	175
<b>Figura 140.</b> Relación MgO vs TiO <sub>2</sub> .....	175
<b>Figura 141.</b> Relación MgO vs Na <sub>2</sub> O.....	175
<b>Figura 142.</b> Relación Na <sub>2</sub> O vs TiO <sub>2</sub> .....	175
<b>Figura 143.</b> Relación K <sub>2</sub> O vs TiO <sub>2</sub> .....	175
<b>Figura 144.</b> Relación Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> vs Zn.....	176
<b>Figura 145.</b> Relación Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> vs Ni.....	176
<b>Figura 146.</b> Relación CaO vs V.....	176
<b>Figura 147.</b> Relación CaO vs Zn.....	176
<b>Figura 148.</b> Relación CaO vs Ni.....	176
<b>Figura 149.</b> Relación Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> vs V.....	176
<b>Figura 150.</b> Relación Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> vs Zn.....	177
<b>Figura 151.</b> Relación Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> vs Ni.....	177
<b>Figura 152.</b> Relación MnO vs V.....	177
<b>Figura 153.</b> Relación MnO vs Zn.....	177
<b>Figura 154.</b> Relación MnO vs Ni.....	177
<b>Figura 155.</b> Relación MgO vs V.....	177
<b>Figura 156.</b> Relación MgO vs Zn.....	178
<b>Figura 157.</b> Relación MgO vs Ni.....	178
<b>Figura 158.</b> Relación MgO vs Zn.....	178
<b>Figura 159.</b> Relación Na <sub>2</sub> O vs Zn.....	178

<b>Figura 160.</b> Relación $\text{Na}_2\text{O}$ vs Ni.....	178
<b>Figura 161.</b> Relación $\text{K}_2\text{O}$ vs V.....	178
<b>Figura 162.</b> Relación $\text{K}_2\text{O}$ vs Zn.....	179
<b>Figura 163.</b> Relación $\text{K}_2\text{O}$ vs Ni.....	179
<b>Figura 164.</b> Relación $\text{TiO}_2$ vs V.....	179
<b>Figura 165.</b> Relación $\text{TiO}_2$ vs Zn.....	179
<b>Figura 166.</b> Relación $\text{TiO}_2$ vs Ni.....	179
<b>Figura 167.</b> Relación $\text{SiO}_2$ vs Ni.....	179
<b>Figura 168.</b> Relación $\text{SiO}_2$ vs Zn.....	180
<b>Figura 169.</b> Relación $\text{SiO}_2$ vs V.....	180
<b>Figura 170.</b> Relación $\text{SiO}_2$ vs $\text{TiO}_2$ .....	180
<b>Figura 171.</b> Relación $\text{SiO}_2$ vs $\text{Na}_2\text{O}$ .....	180
<b>Figura 172.</b> Relación $\text{SiO}_2$ vs $\text{MgO}$ .....	180
<b>Figura 173.</b> Relación $\text{SiO}_2$ vs $\text{MnO}$ .....	180



## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Tabla de correlación. Tomado de LEV (1999).....	21
<b>Tabla 2.</b> Coeficiente de correlación de las variables evaluadas.....	98
<b>Tabla 3.</b> Coeficientes estandarizados.....	113
<b>Tabla 4.</b> Coeficientes no estandarizados.....	113
<b>Tabla 5.</b> Cuadro de clasificación de las funciones discriminantes por facies.....	114
<b>Tabla 6.</b> Facies actual vs Facies probables.....	115
<b>Tabla 7.</b> Análisis petrográfico.....	169
<b>Tabla 8.</b> Datos obtenidos a través de la técnica de Absorción Atómica.....	170
<b>Tabla 9.</b> Datos obtenidos a través de la técnica de Fluorescencia de rayos X.....	171
<b>Tabla 10.</b> Paradas y puntos GPS.....	181

## CAPÍTULO I

### 1.1. Introducción

La investigación de las rocas carbonáticas experimentó un auge cuando se observó que muchas de ellas eran reservorios de petróleo. Debido a esto, se comenzó a integrar varias disciplinas geológicas para entender su origen. Las rocas carbonáticas son aquellas que están formadas por más del 50% de minerales carbonatados, generadas por procesos físicos, químicos y biológicos.

Existen diferentes tipos de clasificaciones como las químicas, texturales, genéticas, etc., pero la que será utilizada para caracterizar y clasificar las facies carbonáticas texturales de la Formación San Luis ubicadas al sur de Caujarao y la Tabla, será la de tipo textural, Dunham (1962) ampliada por Embry y Klovan (1972), en función de los elementos texturales que la componen y de la fábrica de éstos.

Esta investigación se quiere realizar debido a la poca información sobre las facies carbonáticas texturales ubicadas en la Formación San Luis específicamente al sur de Caujarao y la Tabla. El estudio permitirá determinar las relaciones estratigráficas con otras formaciones y una cartografía actualizada. Para ello se realizará un levantamiento geológico, el cual llevará a un análisis petrográfico y de microfacies; además se determinarán la composición de los elementos mayoritarios ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ , expresados en p/p) y ( $\text{Ni}$  y  $\text{Zn}$ , expresados en ppm) a través de la técnica de Absorción Atómica; ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{SiO}_2$  expresados en p/p) y ( $\text{V}$ , expresados en ppm) a través de la técnica de Fluorescencia de Rayos X. Se utilizará la técnica de Microscopía Electrónica de Barrido (SEM), para determinar morfologías y características texturales de las facies representativas de la Formación San Luis.

### 1.2. Justificación

La poca información sobre las facies carbonáticas texturales ubicadas en la Formación San Luis específicamente al sur de las regiones de Caujarao y la Tabla ha hecho necesario realizar un estudio detallado de las mismas, que permitirá luego

determinar las relaciones estratigráficas con otras formaciones y una cartografía actualizada la cual será punto de partida para estudios posteriores.

### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1. Objetivo general**

Caracterizar y clasificar las facies carbonáticas texturales de la Formación San Luis ubicadas al sur de las regiones de Caujarao y la Tabla.

#### **1.3.2. Objetivos específicos**

- Construir columnas estratigráficas de las secciones estudiadas.
- Realizar análisis petrográficos y análisis de microfacies
- Determinar las concentraciones los elementos mayoritarios ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ , expresados en p/p) y ( $\text{Ni}$  y  $\text{Zn}$ , expresados en ppm) a través de la técnica de Absorción Atómica; ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{SiO}_2$  expresados en p/p) y ( $\text{V}$ , expresados en ppm) a través de la técnica de Fluorescencia de Rayos X.
- Determinar morfologías y características texturales de las facies representativas de la Formación San Luis por medio de Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)
- Actualizar la cartografía geológica a escala 1:12.500 de la Formación San Luis a través de ArcGis® y determinar relaciones estratigráficas con otras formaciones.

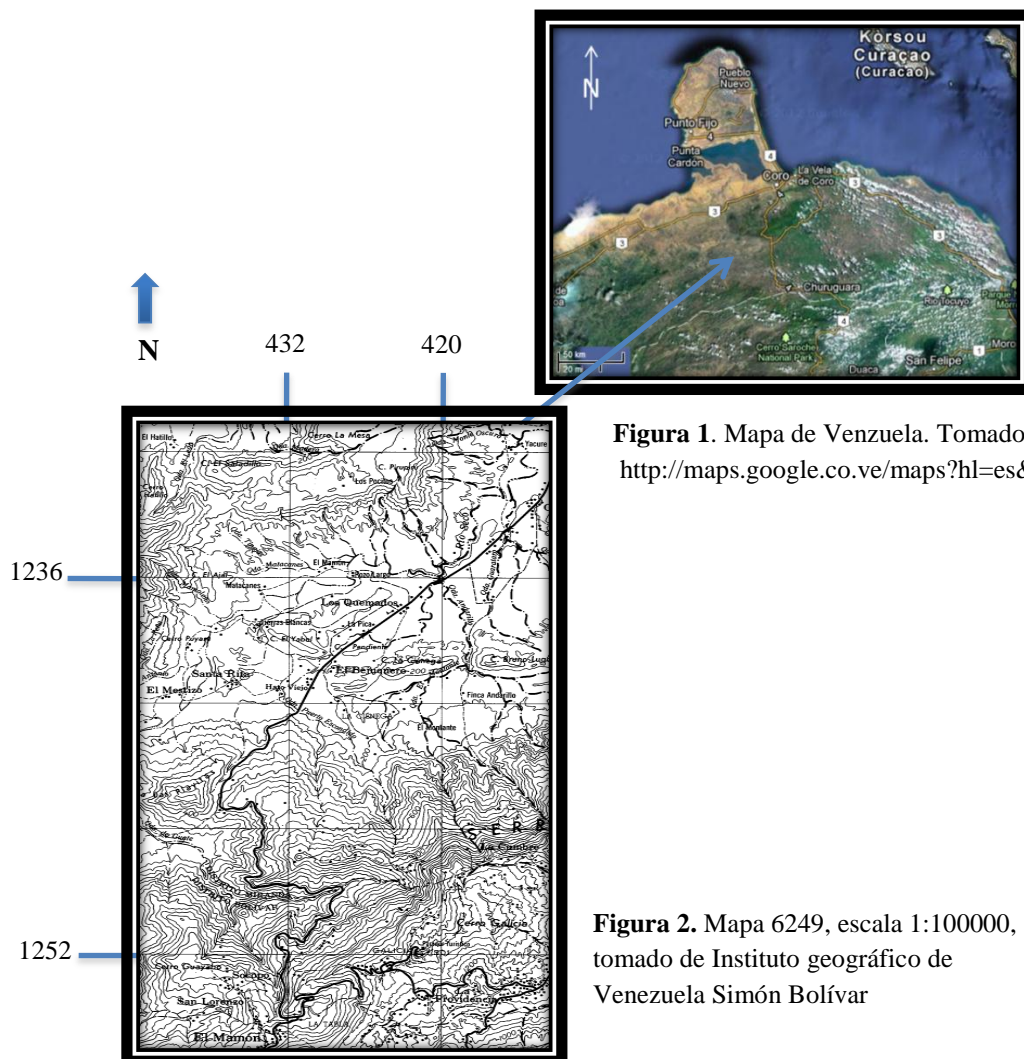
### **1.4. Alcances**

Al culminar este trabajo se obtendrán las columnas estratigráficas de las secciones estudiadas y la cartografía geológica actualizada de la zona ubicada al sur de las regiones de Caujarao y La Tabla, a su vez se clasificarán las rocas carbonáticas y se determinaran las concentraciones de los elementos mayoritarios ( $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ , en p/p) y los elementos traza ( $\text{Zn}$ ,  $\text{Ni}$  y  $\text{V}$  en

ppm), todo esto se recogerá en un informe en el cual quedará plasmado toda la información obtenida.

### 1.5. Ubicación del área de estudio

El área de estudio está enmarcada entre las coordenadas reticulares N:1.244.00 - N:1.232.000 y E:416.00 - E:436.000 (Fig. 2), con un área total aproximada de 60 Km<sup>2</sup>. Se encuentra ubicada al sur de Caujarao y al norte de la Tabla.



**Figura 1.** Mapa de Venezuela. Tomado de: <http://maps.google.co.ve/maps?hl=es&tab=wl>

**Figura 2.** Mapa 6249, escala 1:100000, tomado de Instituto geográfico de Venezuela Simón Bolívar

## 1.6. Trabajos previos

**DÍAZ, MARÍA (1976)**, El objetivo de esta investigación fue el de establecer las relaciones de facies en la parte central de la cuenca de Falcón durante el Oligoceno y Mioceno inferior, en base al estudio de las unidades litológicas y la microfauna que ellas contienen. Para esta investigación se estudiaron las formaciones: El Paraíso, Pecaya, San Juan de La Vega, Pedregoso, San Luis, Churuguara, Castillo y Agua Clara, determinando en cada una de ellas: extensión geográfica, litología, espesor, relaciones estratigráficas, paleontología, edad y correlaciones entre estas. Este estudio dejó como resultado una tabla de correlación de las formaciones pertenecientes en la cuenca de Falcón.

**CASTRO E Y PASTOR M. (1981)**, describen la geología de una zona al sur del embalse El Isiro. Observaron en esta secuencia una serie de regresiones y transgresiones sucesivas. Clasificaron estructuralmente a la zona como un anticlinal y un sinclinal sub-paralelos con orientación N70E, originadas por efectos compresivos en dirección N20W y por un sistema de fallas dextrales transcurrente con rumbo N15W.

**SANDIA, A. (1981)**, estudió la geología sedimentaria de una sección Oligo-Miocena al norte de la Serranía de San Luis, donde afloran las formaciones San Luis, Patiecitos y Guarabal. Dicha secuencia la observó en pliegues anticlinales y sinclinales con dirección N70E, afectados por un sistema de fallas transcurrentes dextrales, en dirección N-S. Para el autor la Formación San Luis fue depositada en un ambiente periarrecifal (detrás del arrecife), de aguas tranquilas someras, evidenciado por la presencia de estratificación y laminación paralela, así como bivalvos de género *Pecten*, gasterópodos, equinodermos, corales, briozoos y foraminíferos (*Archaias* sp. y *Miliolidos*). Además observa que el contacto entre la Formación San Luis y la Formación Patiecitos es concordante y de falla, y un contacto de falla hacia el noreste entre Patiecitos infrayacente con Guarabal.

**NÚÑEZ L. (1982)**, investigó la geología sedimentaria de una zona ubicada al sur de la Serranía de San Luis, identificó secuencias Oligo-Miocenas, representadas por las Formaciones Pecaya, Pedregoso y San Luis. La secuencia general es regresiva, aun cuando hay pequeñas transgresiones y regresiones. La Formación San Luis se encuentra en las partes mas elevadas del área y donde predomina el relieve abrupto, representando un 40% de la misma; esta formación fue depositada en un ambiente de aguas someras en contacto directo con el mar abierto en un nivel de alta energía, evidenciado por falta de estructuras sedimentarias de aguas mas tranquilas, la textura de fósiles, ausencia de pellets, etc.

**SILVA, M (2005)**, el autor tuvo por objetivo compilar la información geológica y cartográfica de la zona estudiada, para así obtener una base topográfica precisa en formato digital mapas geológicos y estandarizar la información de las unidades litoestratigráficas. Entre las unidades presentes en dicho estudio están las formaciones San Luis, Patiecitos en el Oligoceno–Mioceno Temprano y la Formación Guarabal en el Mioceno Temprano. También el autor realizó columnas estratigráficas generalizadas compiladas y secciones geológicas estructurales a partir de mapas compilados e interpretados.

## CAPÍTULO II

## GEOLOGÍA REGIONAL

## 2.1. Generalidades

La cuenca de Falcón debido a su ubicación dentro de la zona de interacción entre las placas del Caribe y Suramérica ha sufrido una dinámica y evolución tectónica bastante compleja (AUDEMARD, 1995). La placa del Caribe comenzó a interactuar con Suramérica a partir del Paleógeno según OSTOS, (1990) Y PINDELL ET AL., (1998) en MONTAÑO (2007), pero no fue hasta el Eoceno Tardío cuando colisiona con la Cuenca de Falcón (AUDEMARD, 1995). En lo denominado por GONZÁLEZ DE JUANA ET AL., (1980), Ciclo terciario superior correspondiente al Oligoceno, Mioceno y Plioceno, se produjeron extensas zonas de subsidencia y una de ellas es la denominada cuenca de Falcón, la cual aflora actualmente sobre unos 36.000 Km<sup>2</sup> en el noroccidente venezolano, particularmente abarca el estado Falcón, se encuentra al este del estado Zulia y la región mas septentrional de los estados Lara y Yaracuy. (AUDEMARD, 1995). De manera general su evolución se puede resumir en una fase de extensión, cierre de la cuenca y por último la inversión tectónica.

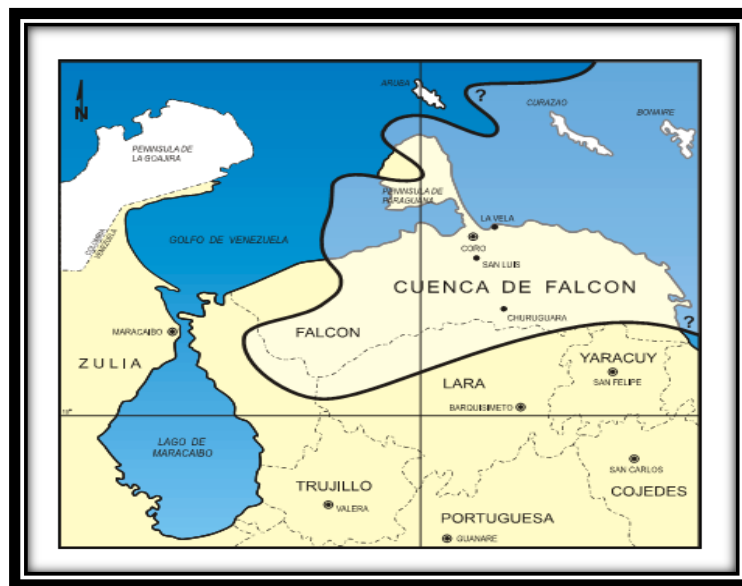


Figura 3. Ubicación de la Cuenca de Falcón y sus límites. Tomado de SILVA, M (2005)

## 2.2. Modelos del origen de la Cuenca de Falcón

No existe un modelo único que explique la evolución tectónica de la cuenca de Falcón, aunque todos concuerdan que está ligada a la interacción existente entre la Placa del Caribe y la Suramericana. Se exponen a continuación las principales teorías:

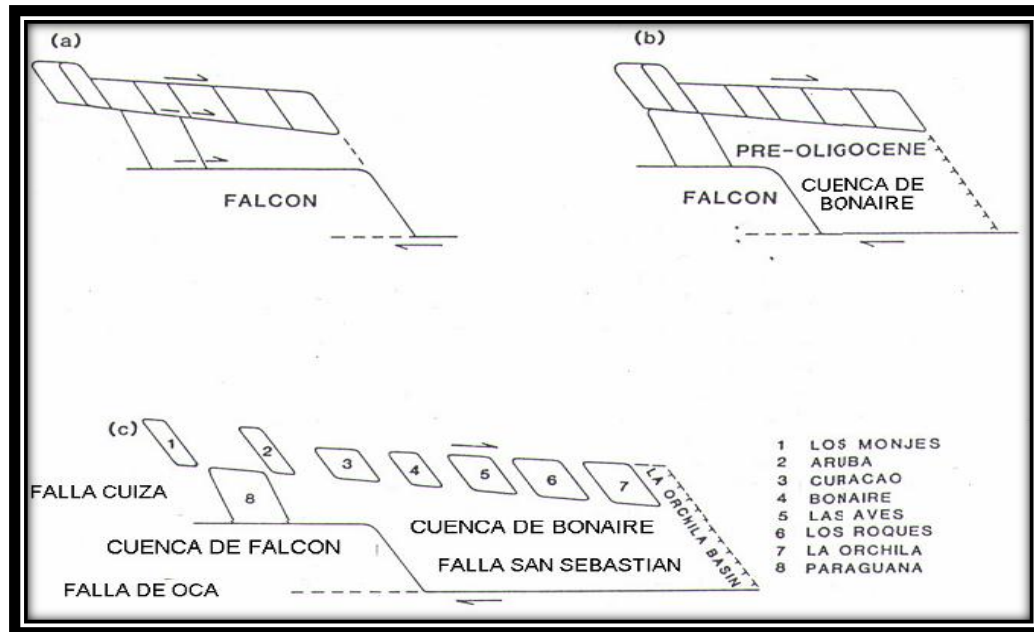
### 2.2.1. Modelos "Pull apart"

**MUESSIG (1984)**, ubicó durante el Oligoceno y Mioceno Temprano en una gran porción de la parte noroccidental de Venezuela, una cuenca marina rodeada por zonas emergidas, excepto al este y al norte. Dicho autor considera que durante el Paleoceno-Eoceno se registró la culminación de la orogénesis compresional en el borde sureste de la cuenca y que es durante el Oligoceno-Mioceno donde bajo condiciones tectónicas extensionales se forma, dentro de una orientación paralela, pero fuera de fallas transformantes dextrales de rumbo este-oeste (Oca y Cuiza). El desarrollo de una estructura pull-apart en la cuenca de Falcón refleja la evolución tectónica del período Terciario donde un largo bloque de corteza reflejó al bloque Bonaire [SILVER ET AL., 1975 en ARELLANO & UMÉREZ (2004)]. La subsidencia de la cuenca durante el Oligoceno, se produce debido a esta fase extensiva con orientación noreste, ocurriendo su máxima extensión en el Mioceno Temprano, de igual manera un adelgazamiento de la corteza e inyección de magmas basálticos (MUESSIG, 1984).

Las evidencias que soportan el modelo de MUESSIG (1984) son:

- La estratificación de un complejo Oligoceno-Mioceno y la rápida subsidencia histórica de la cuenca.
- Fallas transcurrentes sinsedimentarias este-oeste y fallas normales con dirección noroeste.
- Anomalías de gravedad positivas indicativas de una capa de corteza relativamente densa.
- Vulcanismo basáltico alcalino e intrusiones ígneas en dirección noroeste.





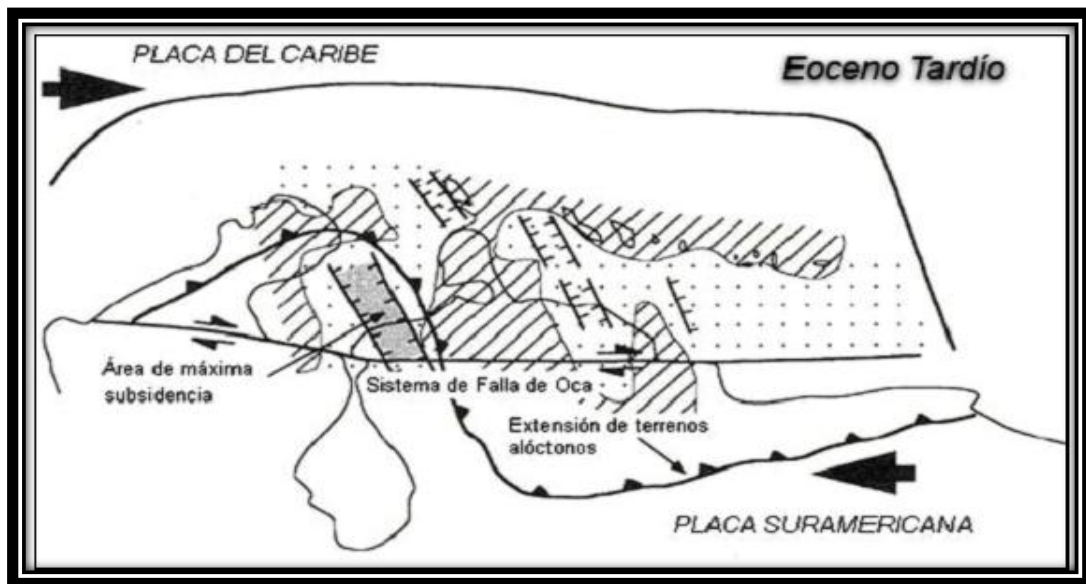
**Figura 4.** Evolución de las cuencas "pull-apart" Falcón y Bonaire. **a** y **b** representan dos configuraciones del área anterior a la extensión Eoceno Tardío. Para llevarlo a la configuración presente **c**, la opción **a** requiere una gran cantidad de extensión y desplazamiento transcurrente dextral de Oligoceno a Mioceno. En la opción **b** la cuenca Bonaire pre-Oligoceno tiene un mayor adelgazamiento, corteza oceánica y requiere menos extensión para llevar a la configuración de la opción **c**. Tomado de SILVA, M (2005)

MUESSIG (1978) adopta la opción **b** y a través de tres esquemas ilustra el desarrollo de la cuenca de Falcón y el Bloque Bonaire desde el Eoceno hasta el presente. La extensión de la cuenca ocurre en dirección este-oeste. Durante el Eoceno Temprano las Antillas Menores formaron una unidad contigua conectada a la Península de Paraguaná y al área de Falcón (Fig. 4a). En el Eoceno Tardío a Oligoceno (por extensión) se generó la cuenca, evidenciado por el fallamiento y la inyección de magma (Fig. 4b). Del Mioceno al presente grandes eventos compresivos generaron un cambio en la evolución tectónica, donde la cuenca evidencia inversión (Fig. 4c).

MACELLARI (1995), sugiere que durante la última etapa de una fase Cretácica Tardía a Eoceno de colisión de terrenos seguida por desplazamientos laterales derechos se formó una serie de cuencas "pull-apart" episuturales. Basado en el estudio de sísmica regional, pozos, trabajo de campo, y análisis de literatura, esta sucesión se divide en cuatro secuencias depositacionales limitadas por discordancias, los cuales

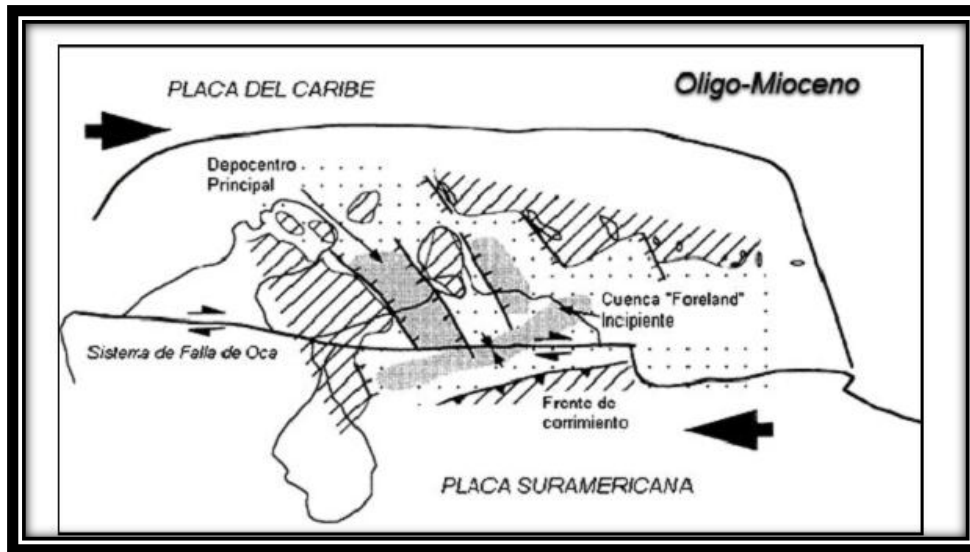
son: Eoceno superior - Oligoceno inferior; Oligoceno superior - Mioceno inferior; Mioceno medio - superior, y Plioceno - Reciente.

MACELLARI (1995) a través de la figura 5 muestra que durante el Eoceno Tardío, hubo un desplazamiento entre las dos placas, dando como resultado una extensa zona pull-apart en el margen de Suramérica, entre el ridge de Curazao y el sistema de falla San Sebastián-Oca.



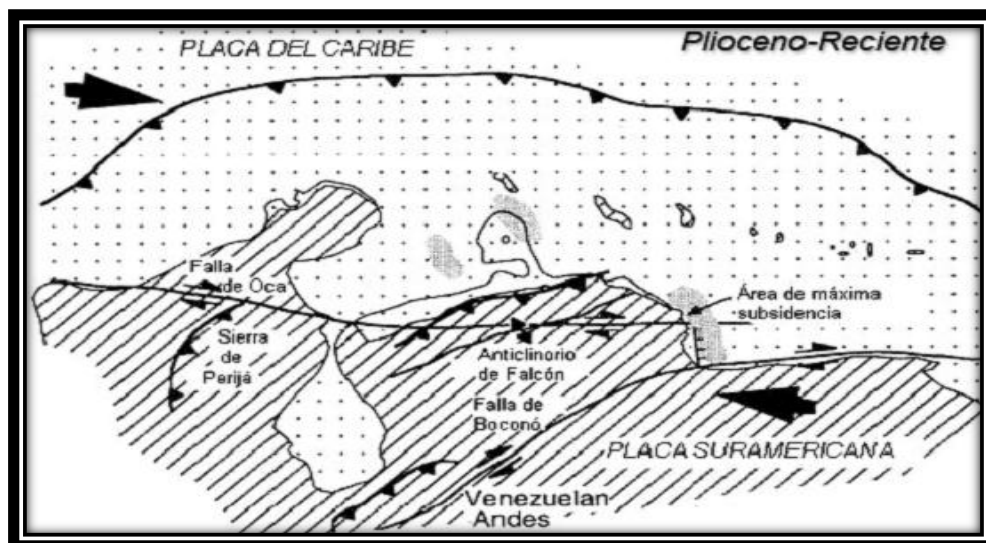
**Figura 5.** Modelo de generación de cuencas pull-apart episuturales. Tomado y modificado de MACELLARI (1995).

Durante el Oligoceno y Mioceno empezó un estrechamiento de la cuenca pull-apart debido al empuje de material alóctono, por lo que los ejes de máxima subsidencia migraron hacia el oeste entre Urumaco y la Bahía de la Vela. Se formó una cuenca “foreland” con orientación ENE-WSW, debido al desplazamiento continuo a través de la falla de Oca se formó un frente de empuje que avanzó progresivamente hacia el norte. (Fig. 6).



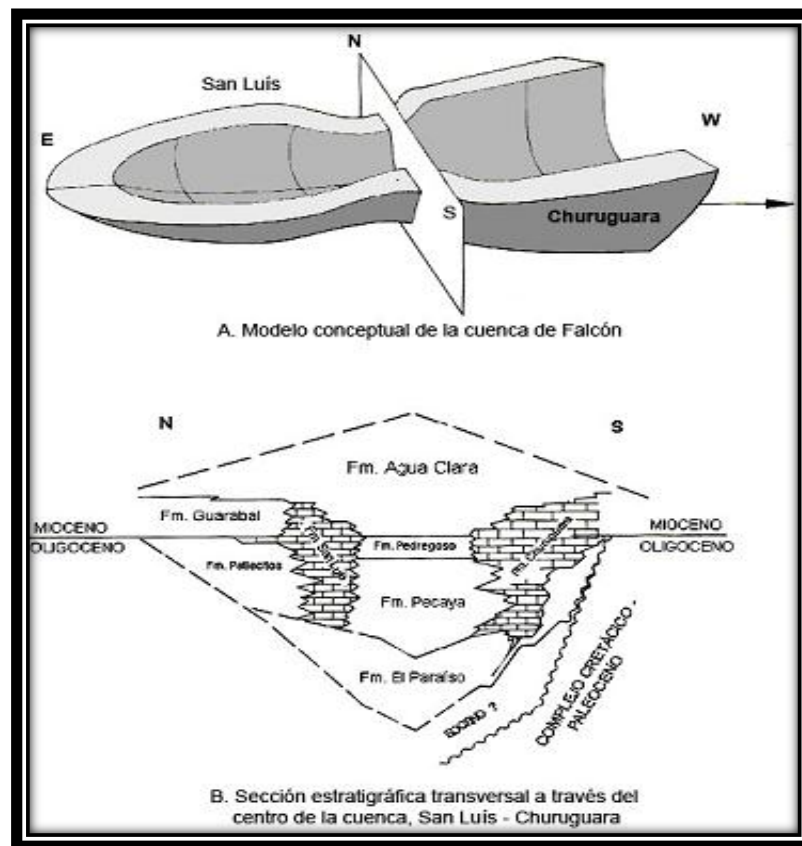
**Figura 6.** Modelo de generación de cuencas “pull-apart” episuturales. Tomado y modificado de MACELLARI (1995).

De igual manera indica, a través de la figura 7, que el movimiento transpresivo a lo largo de la falla del margen de Suramérica (KELLOG Y BONINI, 1982) en MACELLARI (1995), durante el Plioceno, resultó en la subducción de bajo ángulo de la Placa del Caribe por debajo de “ridge” de Curazao.



**Figura 7.** Modelo de generación de cuencas “pull-apart” episuturales. Tomado y modificado de MACELLARI (1995).

**BOESI & GODDARD (1991)**, consideran que es durante el Oligoceno-Mioceno cuando comenzó la inversión de la cuenca, produciendo como consecuencia la formación del anticlinorio de Falcón, lo cual conllevó a la división de la cuenca en dos entidades depositacionales, la primera al sur, constituida por ambientes marginales y costeros, y la segunda al norte por aguas profundas y transicionales. Es así como su teoría está basada en la forma de bote de la cuenca con un eje este-oeste y una sección central angosta localizada entre los pueblos de Churuguara y San Luis; siendo esta la que determinó la distribución sedimentaria de la cuenca durante el Oligoceno-Mioceno, es por ello que su modelo es morfológico.



**Figura 8.** Modelo conceptual de la cuenca de Falcón, Tomado y modificado de BOESI & GODDARD (1991).

### 2.2.2. Modelo de "rifting"

AUDEMARD (1995) señala que la cuenca de Falcón se originó como resultado de un proceso de rifting, como consecuencia de un esfuerzo regional distensivo, cuyo esfuerzo mínimo estuvo orientado N15°O. El autor propone que las cuencas de Falcón, Bonaire y Granada eran una cuenca retro-arco continua durante el Cretácico Tardío asociada al gran arco del Caribe. La evolución tectónica de la cuenca de Falcón se divide en una fase de ruptura y en cierre de la cuenca. La primera se produjo durante el Oligoceno-Mioceno Temprano y fue consecuencia de los esfuerzos distensivos en el que se formó un depocentro estrecho, al cual se le relaciona con las últimas intrusiones y coladas basálticas y la colmatación sedimentaria; y la segunda se subdivide en tres etapas:

- La primera etapa se produjo durante el Mioceno medio a Tardío y consistió en una inversión tectónica.
- La segunda etapa se originó durante el Mioceno-Plioceno debido a una compresión que podría estar vinculada a la inversión en el Surco de Urumaco.
- La tercera etapa también compresiva y que configura la región actual, y podría ser la responsable de las actividades tectónicas actuales.

### 2.2.3. Modelo de colapsos extensionales en una cuenca retroarco

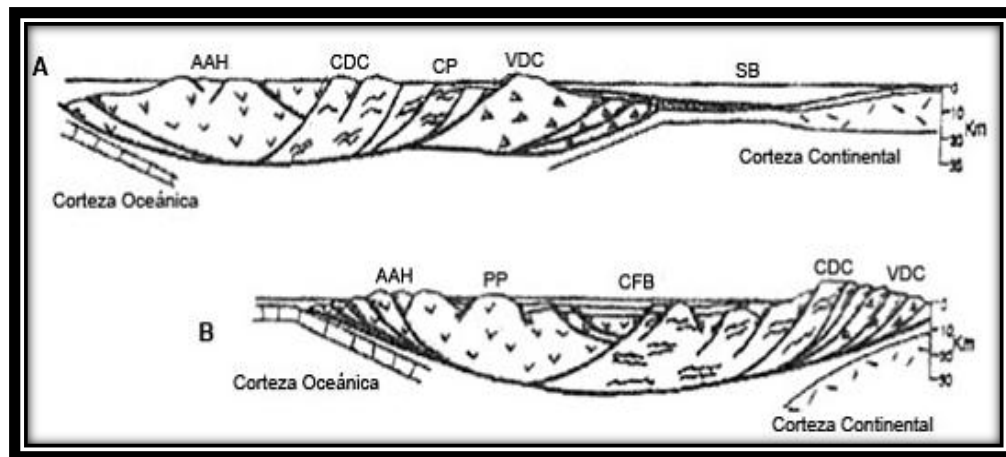
PORRAS (2000, cit. en LEAL & RIVERO, 2004), propuso que la cuenca de Falcón-Bonaire estuvo asociada a colapsos extensionales internos dentro de una cuenca de retroarco, en un orógeno de flotación que colisionó oblicuamente con el extremo noroccidental de la placa Suramericana, suturándose diacrónicamente de oeste a este, desde el Cretácico Tardío hasta comienzos del Mioceno Temprano. Este modelo está basado en el esquema del orógeno de flotación de OLDOW ET AL. (1990), en el cual pueden ocurrir simultáneamente desplazamientos transcurrentes (paralelos a la sutura) y contracciones (perpendiculares a la sutura). Estos autores indican la

existencia de estos sistemas en cuencas de ante-arco (“fore-arc”) y de retro-arco (“back-arc”) que se desarrollan en los márgenes convergentes.

Durante el Eoceno Tardío hasta mediados del Mioceno Temprano comienza a desarrollarse la cuenca de Falcón-Bonaire como resultado de un colapso tectónico detrás de la colisión entre las placas Caribe y Suramericana generándose estructuras extensionales tipo graben. (PORRAS 2000, cit. en LEAL & RIVERO, 2004)

El autor identifica tres periodos principales:

- Un periodo de extensión: que va desde el Eoceno Tardío hasta la parte media del Mioceno Temprano. En este tiempo se comienza a generar la cuenca Falcón-Bonaire, como un colapso tectónico detrás de la colisión entre las placas Caribe y Suramérica, a partir de este proceso se comienzan a generar estructuras extensionales tipo “graben”.
- La fase compresiva: que comenzó hacia el final del Mioceno Temprano inicios del Mioceno medio. No es sino hasta el Mioceno medio que esta fase comienza a afectar a la cuenca, por efectos de la orogénesis andina, causando la inversión tectónica de la porción centro-occidental de la cuenca (Anticlinorio de Falcón). Los efectos de la compresión andina generaron el desarrollo de fallas inversas o corrimientos de convergencia norte-noreste, las cuales cortan la sección terciaria, generando pliegues de dirección noroeste-sureste.
- Desarrollo simultáneo de estructuras compresivas y distensivas: Plioceno Tardío-Reciente durante este periodo el margen entre las placas presenta una componente mayormente transcurrente en dirección este-oeste. Estos movimientos generaron estructuras de grandes dimensiones, donde se observan efectos transpresivos y transtensivos contemporáneos. En la figura 9 se muestra el modelo de orógeno de flotación. (PORRAS 2000, cit. en LEAL & RIVERO, 2004)



**Figura 9.** Modelo de orogéno de flotación para la cuenca de Falcón Bonaire. (a) Configuración tectónica para el Paleoceno- Eoceno medio. (B) configuración tectónica para el Eoceno Tardío. (SB) Surco de Barquisimeto, (CP) Cuenca de retroarco de Paracotos, (VDC) Arco de islas de Villa de Cura, (CDC) Terrenos de la Cordillera de la Costa, (AAH) Alto de las Antillas Holandesas, (PP) Alto de Paraguaná, (CFB) Sedimentación marina en el centro de la cuenca y continental a somera en los márgenes. (Tomado de PORRAS 2000, cit. en LEAL Y RIVERO, 2004)

### 2.3. Estratigrafía regional

A principios del Paleoceno Tardío mucho antes de formarse la cuenca de Falcón, se emplazaron hacia el sur las Napas de Lara, siendo una masa de rocas cretácicas, sobre el margen pasivo andino constituido por rocas autóctonas terciarias y cretácicas (PESTMAN ET AL, 1998). Se erosionaron luego que ocurrió la deformación en frente de las napas de los estratos cretácicos de plataforma, siendo estos los sedimentos marinos profundo de las primeras unidades de la Formación Matatere Paleoceno-Eoceno Temprano, depositándose en la antifosa que se formó al sur de las Napas de Lara. Los depósitos de la cuenca de Falcón abarcan desde el Eoceno hasta el Cuaternario, encontrándose en dirección este-oeste.

Según BOESI Y GODDARD (1991), la historia geológica de la cuenca empieza en el Eoceno Tardío, y la depositación continuó durante el Plioceno hasta el Reciente, debido a que la cuenca se encuentra entre la placa del Caribe y la de Sur América, la sedimentación ha sido controlada principalmente por el tectonismo. Tres sistemas estructurales fueron desarrollados como resultados de movimientos dextrales de la corteza, el primero es un sistema de fallas normales tipo horst y grabens, el segundo es el anticlinorio de Falcón, con sus fallas asociadas y por último un sistema asociado

a la falla de la Oca, siendo ésta la más relevante ya que tiene una extensión regional. Otra conclusión aportada por estos autores, es que la discontinuidad estratigráfica en la cuenca, es producida por dos etapas una de transgresión del mar durante el Eoceno Tardío y el Mioceno Temprano y la otra, una regresión del nivel del mar durante el Mioceno Medio hasta el Reciente. (BOESI & GODDARD, 1991).

Durante el Oligoceno-Mioceno comenzó el proceso de la inversión de la cuenca. Esta inversión trajo como consecuencia la formación del anticlinorio de Falcón lo cual conllevó a la división de la cuenca en dos entidades depositacionales distintas, la primera al sur, constituye ambientes marginales y costeros, la segunda al norte se mantuvieron los ambientes de aguas profundas y transicionales (BOESI & GODDARD, 1991).

El modelo estratigráfico y de sedimentación que proponen varios autores para el relleno de la cuenca es el siguiente:

➤ **Eoceno Medio- Eoceno Superior**

Según BOESI Y GODDARD (1991) en el Eoceno la sedimentación continuó sin interrupción en otras regiones de Venezuela y comenzó la formación de la cuenca de Falcón. También ocurrieron movimientos orogénicos en el sur Caribe, los cuales fueron responsables de la generación de las islas de Aruba, Bonaire y Curazao, que aun están presentes como remanentes en la actualidad.

Los primeros depósitos de la cuenca de Falcón pertenecen a la Formación Cerro Misión de edad Eoceno Tardío, debido a que están confinados al margen sureste de la cuenca, se cree que la invasión marina de la cuenca progresó hacia el oeste, hasta alcanzar la plataforma de Dabajuro. (AUDEMARD, 1995).

Durante el Eoceno Medio tuvo lugar una extensa transgresión hacia el oeste-suroeste que tiene su mejor expresión en la formaciones Jarillal y Santa Rita, mientras que la Formación La Victoria presenta características regresivas como posible antecedente del levantamiento y erosión característicos del Eoceno Tardío, al término





Los esfuerzos complejos comenzaron a incrementarse en este periodo, causando sucesivas modificaciones paleogeográficas que transformaron la distribución de las facies que se encuentran hoy. Durante el Mioceno Temprano la trasgresión marina noreste llega a su fin. En el flanco norte y en la región Caribe, los surcos sinsedimentarios continuaron llenándose, así como continuó la subsidencia. Estos factores están relacionados a la extensión tectónica. La posición ocupada por el eje de la cuenca en el Oligoceno-Mioceno Temprano ahora se convierte en el eje de la fila conocida como anticlinorio de Falcón. Esta fue la iniciación de las subcuencas y la separación del área en dos zonas distintas, hacia el sur facies marinas poco profundas, lagunal y sedimentos fluviales predominantemente y hacia el norte se desarrollaron facies marino profundo a costera de transición.

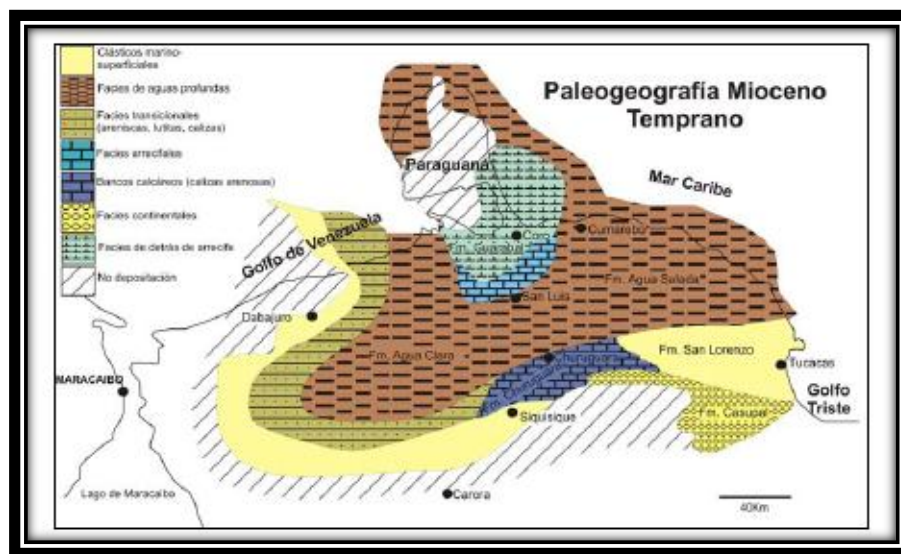
El complejo de edad Oligoceno y Mioceno Temprano ocupa la parte central de la cuenca mientras que, hacia los bordes de la misma, solo se encuentran rocas miocenas y más jóvenes. Se observan cambios notables en sentido oeste-este, pasando de un predominio de clásticos gruesos a un área constituida casi en su totalidad por lutitas (GONZÁLEZ DE JUANA ET AL., 1980).

La forma característica de la cuenca fue definida en el Oligoceno Temprano por la sedimentación de Formación El Paraíso posiblemente discordante sobre el substratum formado por las rocas del Eoceno, que DÍAZ DE GAMERO (1977) considera como un complejo deltaico progradante originado en las tierras recién levantadas hacia el oeste y suroeste. Otros elementos positivos que limitaban la cuenca son la cordillera de Churuguara y su prolongación por el sur, el Alto de Dabajuro al noroeste, formado por rocas aflorantes del Eoceno Medio que constituyó un elemento positivo durante casi toda la historia de la cuenca, y el Alto de Paraguaná-Coro, separado del Alto de Dabajuro por el Surco de Urumaco.

Hacia el norte, el complejo arrecifal de la Sierra de San Luis se desarrolla a lo largo del Alto de Coro durante el Oligoceno-Mioceno y está representado por las

calizas arrecifales de la Formación San Luis y una serie de unidades formacionales que corresponden a la facies de frente y detrás de arrecife (Fig. 11).

La edad del desarrollo arrecifal de San Luis no ha sido determinada con toda precisión. La Formación San Luis carece de fauna planctónica y se asigna tentativamente al Oligoceno terminal e inicios del Mioceno, principalmente en base a los foraminíferos béticos grandes (macroforaminíferos). (WHEELER, 1963, citado en SILVA, 2005).



**Figura 11.** Configuración de la cuenca de Falcón durante el Mioceno Temprano (tomado de GONZÁLEZ, P, 2009)

Las unidades que componen el período que comprende el Oligoceno y Mioceno Temprano (El Paraíso, Pecaya y Pedregoso en Falcón oeste–central) representan facies de aguas profundas; hacia el sureste se mantiene una similitud en cuanto a la litología y recibe el nombre de Formación Guacharaca, equivalente lateral a las formaciones El Paraíso y Pecaya, mientras que la arenisca El Salto se usa para el equivalente de la Formación Pedregoso (LEV, 2005).

Hacia los márgenes de la cuenca, se pasa a facies de aguas someras, que incluyen las formaciones San Luis, Patiecitos y Guarabal, en la parte central del flanco norte, la Formación Castillo al extremo oeste de la cuenca, la Formación Churugara en el flanco sur y la Formación Casupal en el borde sureste de la cuenca. (MACERALLI, 1995).

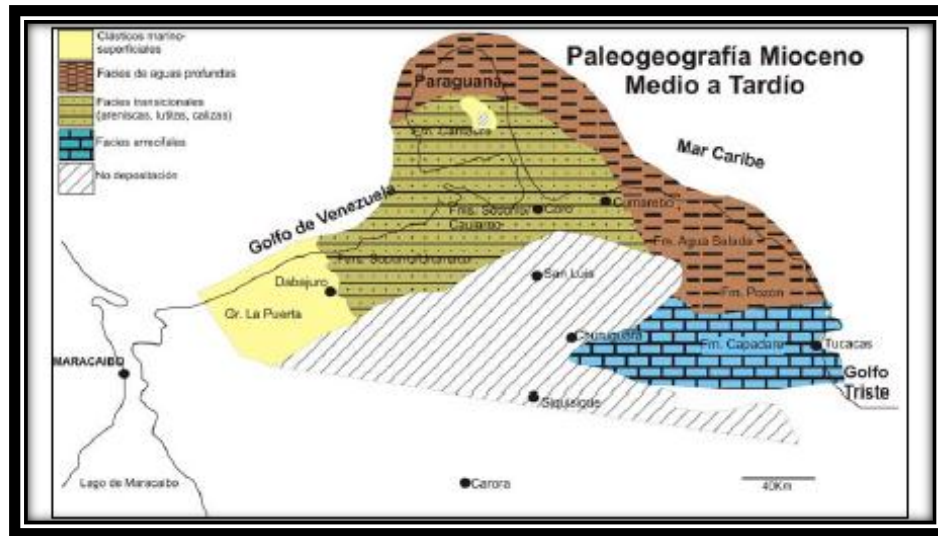
La sedimentación es completada por la Formación Agua Clara, correspondiente a lutitas marinas de plataforma continental, las cuales pasan lateralmente y en forma progresiva a facies más profundas hacia el este, Grupo Agua Salada. (AUDEMARD, 1995).

➤ **Mioceno Medio-Tardío**

En la sedimentación del Mioceno Medio la actividad tectónica estuvo parcialmente controlada. La inversión de la cuenca que comenzó en este tiempo fue responsable por el levantamiento y erosión de los sedimentos que fueron depositados en el canal.

Al final del Mioceno, movimientos tectónicos relacionados a movimientos laterales a lo largo del límite de placas Caribe-Sudamérica fueron evidentes. El área de depositación fue hacia el mar Caribe y la sedimentación fue derivada principalmente del sur como de depósitos de reciclaje. (BOESI Y GODDARD, 1991).

En éste el eje de sedimentación es desplazado hacia el norte del Anticlinorio de Falcón, debido a la inversión tectónica del canal falconiano. Se siguió depositando Agua Salada debido a que se mantuvo la geometría de cuenca profunda marina (Fig. 12). Además hacia el oeste los depósitos son continentales y progresivamente se hacen marinos hacia el este. (AUDEMARD, 1995).



**Figura 12.** Configuración de la cuenca de Falcón durante el Mioceno Medio-Tardío (tomado de González, P, 2009)

#### ➤ Plioceno

Una tardía actividad tectónica tomó lugar en el Plioceno, afectando principalmente el área de Falcón y siendo responsable del levantamiento del sistema montañoso. Los procesos sedimentarios responsables de las terrazas aluviales, costas y dunas a lo largo de la zona de piedemonte, posiblemente han sido afectados por la actividad tectónica. Un período orogénico también ocurrió durante el Pleistoceno, procesos similares fueron repetidos. Esta repetición resultó en un número de terrazas de diferentes edades, pero con el mismo desarrollo de deposición. Estas pueden ser observadas hoy a lo largo del entero llano costero.

#### 2.4. Estratigrafía y paleoambiente de unidades aflorantes en la zona de estudio

Se presentan a continuación las características litológicas más resaltantes de las formaciones estudiadas: San Luis, Patiecitos y Guarabal, en orden de depositación y en base a la información extraída del LEV(1990).

**Tabla 1.** Tabla de correlación de la Cuenca de Falcón. Tomado de LEV (1999)

EPOCA		DABAJURO	URUMACO	CORO - LA VELA	PARAGUANA	CORO - SAN LUIS	ARACUA - CHURUGUARA	CUMAREBO	MIRIMRE	MENE DE ACOCITA	AGUA LINDA	EPOCA
P L I O C E N O	TARDIO		SAN GREGORIO <small>RIO SECO COCLUZA VERGEL</small>					TUCUPIDO				TARDIO
	TEMPRANO	TIGUAJE	CODORE <small>ALGODONES CHIGUAJE</small>	LA VELA <small>CORO</small>	PARAGUANA <small>AMUAY EL HATO</small>	LA VELA <small>CORO</small>		EL VERAL	PUNTA GAVILAN			TEMPRANO
M I O C E N O	TARDIO	BARIRO	URUMACO	CAUJARAO <small>TARATARA MATARUCA EL MUACO</small>		CAUJARAO <small>TARATARA MATARUCA EL MUACO</small>		CUMAREBO		OJO DE AGUA		TARDIO
	MEDIO	QUISIRO	SOCORRO	SOCORRO		SOCORRO		AGUA SALADA	AGUA SALADA <small>CAPADARE</small>	POZON <small>HUO HUITO POLICARRIO</small>	AGUA LINDA <small>CAPADARE</small>	MEDIO
	TEMPRANO	CERRO PELADO	QUERALES CERRO PELADO	QUERALES GUARABAL	CANTAURE	QUERALES GUARABAL		EL SALTO		SAN LORENZO <small>MENEOTO EL SALTO</small>	CASUPAL	TEMPRANO
		AGUA CLARA <small>SANTIAGO CAUDERALITO</small>	AGUA CLARA	SAN LUIS		SAN LUIS	AGUA CLARA					
O L I G O C E N O	TARDIO	CASTILLO	PEDREGOSO PECAYA <small>S. J. VEGA</small>	PATECITOS ?		?	PECAYA CHURUGUARA			GUACHARACA		TARDIO
	MEDIO											MEDIO
	TEMPRANO		EL PARAISO			EL PARAISO						TEMPRANO
E O C E N O	TARDIO	JARILLAL					JARILLAL			CERRO MISION		TARDIO
	MEDIO	SANTA RITA				SANTA RITA						MEDIO

M. L. GAMERO, 1997

### 2.4.1. Formación San Luis

#### Paleogeno-Neogeno (Oligoceno – Mioceno Temprano)

La formación aflora típicamente donde el antiguo camino real de Coro-Cabure cruza la Serranía de San Luis, municipio Petit, estado Falcón, Hoja de Cartografía Nacional No. 6249, escala 1:100.000. La unidad forma la mayor parte de la Serranía de San Luis, donde los picos más elevados son las calizas arrecifales típicas de la formación. Se extiende al oeste hasta el río Mitare y al este hasta el valle del río Ricoa.

Según WHEELER (1960, 1963), la formación consiste predominantemente de caliza arrecifal maciza, densa, gris azulosa, finalmente cristalina, con foraminíferos grandes, algas y corales, intercaladas con areniscas de grano fino, arcillosas y calcáreas, lutitas físis con nódulos ferruginos y, hacia el tope, areniscas conglomeráticas con granos y guijarros de cuarzo blanco y ftanita negra (sal y pimienta).

GONZÁLEZ DE JUANA, ET AL. (1980), indican que es frecuente encontrar granos de cuarzo, fragmentos de rocas ígneas básicas y ocasionalmente glauconita. Según los mismos autores, se observa un incremento en la proporción de clásticos hacia el norte. Puede observarse cierta ciclicidad en las facies arrecifal y periarrecifal, así como el paso gradual de una lutita no calcárea a calcárea y marga con fragmentos de corales ramosos (*Porites* sp.). A niveles más altos aparecen grandes cabezas de coral (*Montastrea* sp.) y colonias de algas que forman capas de caliza nodular; en algunos casos se observan capas de *Ostrea* sp., y finalmente un desarrollo de caliza tramada frecuentemente recristalizada. El ciclo termina casi abruptamente con una arenisca o lutita que recubre el arrecife.

La formación contiene abundantes foraminíferos grandes como la *Heterostegina* sp., *Nummulites* sp. y *Lepidocyclina* sp., corales, bivalvos y pelecípodos.

La formación correlaciona con las formaciones Patiecitos y parte inferior de Guarabal, que son las facies atrás del arrecife en la vertiente norte de la Serranía de

San Luis, y con la Formación Pedregoso como equivalente lateral de aguas más profundas, hacia el centro de la cuenca de Falcón (DÍAZ DE GAMERO, 1977).

Corresponde a una facies arrecifal de borde de cuenca con núcleos arrecifales alineados en sentido este-oeste, con depósitos bioclásticos de origen arrecifal hacia el centro de la cuenca de Falcón y facies atrás del arrecife hacia la antigua línea de costa de Paraguaná.

#### **2.4.2. Formación Patiecitos**

PALEOGENO-NEOGENO (Oligoceno-Mioceno Temprano)

La unidad aflora a lo largo del flanco norte de la Serranía de San Luis y se acuña al este y oeste. Hacia el norte la formación se acuña contra la antigua área positiva de Paraguaná. La unidad tiene su localidad tipo en la quebrada Los Patiecitos, en el flanco norte de la Serranía de San Luis, municipio Miranda, estado Falcón, Hoja 6249, esc. 1:100.000, Cartografía Nacional.

WHEELER (1960, 1963); describe la Formación Patiecitos como una secuencia de lutitas interestratificadas con areniscas y algunas calizas; las lutitas predominan en la parte inferior de la formación, pero la proporción de arenas incrementa gradualmente hacia la parte superior. Las calizas se encuentran más frecuentes hacia el tope. Las lutitas son de color gris oscuro y tienen fractura en bloques. Las areniscas son frecuentemente de tipo "sal y pimienta", de grano fino a grueso y de colores gris, gris blanquecino y marrón. En la parte superior de la formación contienen lentes conglomeráticos. Las calizas generalmente son de colores grises, fosilíferas, arenosas y se encuentran en capas delgadas hasta capas de espesor mediano. Hacia el tope de la formación se encuentran frecuentes capas gruesas de calizas del tipo de las calizas de San Luis.

La Formación Patiecitos hacia el sur pasa gradualmente a la Formación San Luis; hacia el este y oeste se interdigita con las formaciones Pecaya y Pedregoso. Hacia el



norte la formación se acuña contra la antigua tierra de Paraguaná, WHEELER (1960, 1963). Según DÍAZ DE GAMERO (1989) se correlaciona con la Formación Agua Clara.

ESTEVEES & VILLALTA (1989) interpretan un ambiente de laguna pobremente oxigenada para la parte inferior de la formación, que pasa hacia arriba a condiciones de laguna normalmente oxigenada, con acarreos de tormenta desde el arrecife que se desarrollaba al sur (arrecife de San Luis).

### **2.4.3. Formación Guarabal**

NEOGENO (Mioceno Temprano)

La unidad se conoce solamente en el flanco norte de la Serranía de San Luis, desde la quebrada Chuchure cerca del río Mitare al oeste, hasta la región al norte de Acarigua, al este. La Formación se adelgaza y desaparece totalmente en sentido este-oeste. La Formación Guarabal tiene su localidad tipo en cortes de la carretera Coro-Churuguara, a 17 km al sur de Coro, municipio Miranda del estado Falcón, Hoja Cartográfica Nacional N° 6249, escala 1:100.000.

ESTEVEES & VILLALTA (1989), describen la unidad al oeste de la sección tipo, como caracterizada por las areniscas de "sal y pimienta", frecuentemente con bandas conglomeráticas y lutitas gris oscuro. Las areniscas son de color gris claro, de contactos concordantes abruptos, a veces erosivos, de grano fino a grueso, con frecuentes bandas conglomeráticas que marcan la estratificación cruzada festoneada. Los clastos son de cuarzo, ftanita negra, fragmentos de rocas sedimentarias y metamórficas, de bordes subangulares y tamaños que varían entre 0,5 y 6 cm. En los festones se observa gradación normal. Las areniscas varían en espesor de 0,5 a 4 m, ocasionalmente formando gruesos paquetes. En la quebrada Maipana, hacia la parte superior de la formación, se encuentra un conglomerado formado por cantos redondeados de corales, de hasta 30 cm de diámetro, embebidos en una matriz limolítica gris oscura. El tope pasa transicionalmente a una caliza bioturbada, con ostreidos, encima de la cual se encuentra una típica arenisca "sal y pimienta".

La Formación Guarabal se correlaciona con la parte superior de la Formación San Luis en el área de su sección tipo. Hacia el este y oeste probablemente pasa gradualmente a la parte inferior de la Formación Agua Clara (WHEELER (1960, 1963). DÍAZ DE GAMERO (1989) la correlaciona con parte de la Formación Cerro Pelado.

La Formación Guarabal se considera como facies de relleno entre el arrecife de San Luis y la costa de Paraguaná (WHEELER, 1960, 1963; DÍAZ DE GAMERO, 1989). ESTEVES Y VILLALTA (1989) interpretan el ambiente sedimentario de la Formación Guarabal como de río entrelazado progradando hacia una laguna o de un delta entrelazado.

## **2.5. Geología local**

Al sur de Coro, durante el Oligoceno-Mioceno se desarrolló el complejo arrecifal de la Sierra de San Luis., definido por la Formación San Luis, donde su flanco sur según GONZÁLEZ DE JUANA, ET AL. (1980), enfrentaba el mar abierto. Al sur de Caujarao se encuentra en el área de estudio, donde se formaron condiciones periarrecifales, con una combinación de facies deltaicas y litorales, característico de las formaciones Patiecitos y Guarabal.

La Formación San Luis tiene un contacto concordante con la Formación Guarabal y concordante-falla con la Formación Patiecitos. Además el aporte calcáreo disminuye hacia el tope de la sección evidenciado según SANDIA (1981) por la presencia de calizas en la Formación Patiecitos y la ausencia de ellas en la Formación Guarabal.

La zona de estudio se encuentra demarcada a lo largo de la carretera Coro-Churuguara, constituida por una topografía montañosa (Fig.13). Esta sección tiene un espesor total de 1271 metros, donde la Formación San Luis abarca aproximadamente un área de 65%, la Formación Patiecitos un 15% y la Formación Guarabal un 20% respecto al espesor vertical total levantado.



**Figura 13.** Fotografía de la zona de estudio carretera vieja Coro-Churuguara. Tomada por Andreina Fernández

### 2.5.1. Estratigrafía local

La zona de estudio forma parte de una secuencia donde afloran las unidades litoestratigráficas: Formación San Luis, Patiecitos y Guarabal, donde la primera es un desarrollo arrecifal correspondiente al Oligoceno-Mioceno Medio y las otras dos representan aportes terrígenos en la zona detrás del arrecife de la Formación San Luis.

Las formaciones San Luis, Guarabal y Patiecitos se encuentran en un anticlinal asimétrico, definido así por los datos recolectados en campo. Su flanco norte tiene buzamientos fuertes que alcanzan valores cercanos a  $70^\circ$ , mientras que el flanco sur tiene buzamientos más suaves de hasta  $4^\circ$  mientras nos acercamos a la base de la sección.

#### ➤ La Formación San Luis

Está ubicada en la base de la sección estudiada (Anexo 1), aflora en gran parte de la carretera vieja Coro-Churuguara, donde el relieve es muy abrupto formado por una serie de anticlinales y sinclinales fallados, cuyas alturas van desde los 600 a 1400 metros de altura y representa el 65% del área estudiada.

Está compuesta por calizas arrecifales de color gris azulado, masivas, algunas diaclasadas y que en la base de la sección las muestras presentan gran cantidad de foraminíferos béticos, de corales y algas rojas mientras que acercándonos al tope se encuentran mayor cantidad de bivalvos, gasterópodos, pelecípodos y en menor cantidad algas y corales.

Su litología está constituida por calizas, pero además contiene considerables cantidades de lutitas y rocas clásticas terrígenas. Las calizas presentan mayor frecuencia, cuyos espesores van de 20 cm a 8 m, siempre intercaladas hacia la base con material terrígeno.



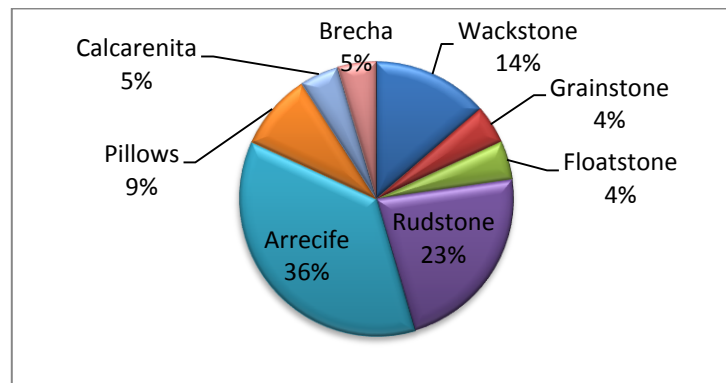
**Figura 14.** Fotografía panorámica de un afloramiento de calizas arrecifales de la Formación San Luis en la Carretera vieja Coro-Churuguara. Tomada por Laura Martins

Las calizas presentan gran cantidad de restos fósiles medianamente preservados como bivalvos, foraminíferos, algas, corales entre otros, como se puede observar en la muestra de Grainstone donde se reconocen *Heterostegina* sp. y bivalvos (Fig.15).



**Figura 15.** Fotografía de un Grainstone. Tomada por Laura Martins

Las calizas analizadas en sección fina bajo el microscopio óptico, se describen en orden de abundancia de mayor a menor (Fig. 16) como: Arrecife o Bindstone, Rudstone, Wackestone, “Pillows” o Framestone, Calcarenita, Brecha, Grainstone y Floatstone, según la clasificación de clasificación de Embry y Klovan (1972). Se observaron muestra con corales en posición de crecimiento, aplastados, *Diploria* sp, rodolitos, foraminíferos, equinidos, bivalvos, “pillows” (Fig.17) entre otros.



**Figura 16.** Distribución de las 22 muestras estudiadas según análisis petrográfico



**Figura 17.** Fotografía de los “Pillows” observados en campo. Tomada por Andreina Fernández

Hacia el norte abundan las capas de areniscas conglomeráticas típicas de la Formación Guarabal, indicando que se nos presenta la zona de interdigitación entre la Formación San Luis y Guarabal.

➤ **La Formación Patiecitos**

La sección estudiada de la Formación Patiecitos corresponde a la parte media (Anexo 1) de la sección estudiada, ubicada en la carretera vieja Coro-Churuguara. Esta formación ocupa aproximadamente el 15 % del área total y está representada por una secuencia terrígena, predominantemente arenosa, formada por paquetes de areniscas y arcillitas. En la parte superior se empiezan a observar cuerpos de calizas menores a 1 m, y en la parte inferior de hasta 6 m; siendo estas capas indicativas de la Formación San Luis. Lo observado en campo fue derrumbes del material terrígeno (Fig. 18).



**Figura 18.** Fotografía de un derrumbe de la Formación Patiecitos. Tomada por Andreina Fernández

➤ **La Formación Guarabal**

Se observa en el tope de la sección (Anexo 1), constituida por una secuencia muy terrígena hacia el tope y la base constituida por areniscas, limolitas, lutitas, areniscas conglomeráticas pero en el medio contiene unas capas de calizas.



Las areniscas se encuentran intercaladas con limolitas y lutitas y en algunos casos con horizontes conglomeráticos (Fig. 19) con espesores que oscilan entre 0,4 m y 4 m. Se observan contactos erosivos



**Figura 19.** Foto de los niveles conglomeráticos de la Formación Guarabal. Tomada por Andreina Fernández

## CAPITULO III

### METODOLOGÍA

Para la realización de este trabajo la metodología a usar se divide en cuatro fases, las cuales están relacionadas y ayudarán a alcanzar, de forma más efectiva, el objetivo de este trabajo. Estas fases son:

#### **3.1. Fase Pre-campo**

- Recopilación del material bibliográfico, correspondiente a la zona de estudio y a los métodos a utilizar, entre los que destacan: mapas geológicos y topográficos, revistas, tesis, publicaciones y libros.
- Obtención y revisión de los mapas topográficos 6249-I-SO y 6249-II-NO, a escala 1:25000, pertenecientes a la zona de estudio los cuales fueron adquiridos en el Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar.

#### **3.2. Fase de Campo**

- Caracterización de los tipos litológicos presentes en las secciones a estudiar pertenecientes a las Formación San Luis para la realización de las columnas estratigráficas, especificando las características de la roca (color fresco y meteorizado, espesor, granulometría fósiles, etc.).
- Toma de muestras durante el levantamiento específicamente de las facies carbonáticas; se tomaron en total 52 muestras en campo las cuales pesaban aproximadamente 2 kg cada una, cantidad suficiente para realizar estudio petrográfico, análisis químico y dejar un testigo de cada una de estas. La nomenclatura usada para denotar cada muestra fue la siguiente: SL-xxx, SL se colocó por el nombre de la formación a estudiar y seguidamente el número de la muestra.



- Levantamiento de una poligonal en forma simultánea con la recolección de las muestras; para ello se utilizó el GPS Magellan Explorist 510; para finalmente ser ubicados en el mapa de la zona de estudio.

### 3.3. Fase de Laboratorio

#### 3.3.1. Estudio Petrográfico

Para el estudio petrográfico se analizaron 22 muestras en el Microscopio óptico con cámara marca Olympus DP20, plasmando los datos en una tabla la cual nos ayudo a contabilizar estos. De cada petrografía se tomaron los porcentajes de cada uno de sus componentes principales (aloquímicos, micrita, esparita y porosidad), se identificaron cada uno de los organismos fósil que se encontraban y se observaron de manera detallada los procesos diagenéticos implicados en cada una de las muestras (disolución, neomorfismo, micritización y otros) para finalmente clasificarlas y agruparlas.

Como material de apoyo y didáctico se tomaron diversas fotografías en cada una de las secciones las cuales sirven de guía para futuros trabajos.

#### 3.3.2. Pulverizado de las muestras

El proceso de pulverizado de las muestras fue realizado usando un equipo de molienda marca Shatterbox . La molienda consta de los siguientes materiales a saber:

- ✓ Cápsula de Carburo de Tungsteno
- ✓ Alcohol
- ✓ Papel absorbente
- ✓ Pala de metal o cuchara
- ✓ Bolsas clic pequeñas
- ✓ Marcador para acetatos
- ✓ Cuarzo de veta (limpio)



**Figura 20.** Molienda Shatterbox. Tomada por Andreina Fernández.

El proceso comienza con el limpiado de la cápsula con el alcohol y el papel absorbente, luego dejar que la misma se seque para evitar que la muestra se adhiera.

Posteriormente, se vierte una pequeña cantidad de muestra 1 a pulverizar (1-2 g) para eliminar restos de otros materiales. Se introduce la cápsula en el equipo y se pulveriza unos 20 s.

Seguido se limpia la cápsula con alcohol hasta eliminar restos de la muestra. Se procede a pulverizar en sentido estricto.

Para pulverizar la muestra 1 es necesario tomar unos 10-15 g y luego introducirla en la cápsula de Carburo de Tungsteno. Se introduce de forma homogénea y luego se tapa.

Se monta la cápsula en el equipo Shatterbox (Fig. 20), para luego encender y esperar unos 40 s. En este trabajo se dejó cada muestra unos 40-50 s, sin embargo para rocas es recomendable un tiempo de 1-2 min.



**Figura 21.** Capsula Shatterbox con muestra pulverizada. Tomada por Andreina Fernández.

Luego de culminado el proceso de pulverizado en el equipo (Fig. 21), se procede a tomar la muestra 1 con la pala de la muestra ya pulverizada y se procede a verterla en una bolsa clic con su correspondiente identificación.

Se limpia la cápsula con alcohol para eliminar restos de la muestra 1 y subsecuentemente se introducen pequeños fragmentos de cuarzo para pulverizar siguiendo el procedimiento anterior.

La molienda de cuarzo previo a una muestra 2 y posterior a una muestra 1 garantiza que restos de muestra 1 no queden en la cápsula y contaminen el resultado. Luego de pulverizado el cuarzo se limpia nuevamente con alcohol.

Seguidamente se procede a introducir una pequeña cantidad de muestra 2, se pulveriza por unos 20 segundos. Se limpia con alcohol para eliminar residuos.

Por último se vierten unos 10-15 g de muestra 2 y se introducen en el equipo por unos 40 segundos. Este proceso se sigue cada vez que se requiere pulverizar una muestra.

### 3.3.2.1. Análisis químico por la técnica de Absorción atómica

La absorción atómica es el proceso que ocurre cuando átomos de un elemento en estado fundamental absorben energía radiante a una longitud de onda específica. La cantidad de radiación absorbida aumenta al hacerlo el número de átomos del elemento presentes en el camino óptico, utilizándose esto con fines analíticos cuantitativos.

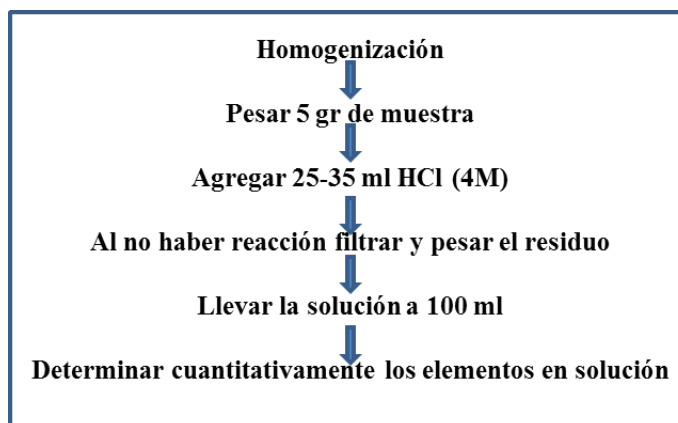


**Figura 22.** Equipo de Absorción atómica. Tomada por Andreina Fernández.

La aplicación de esta técnica se realizó a 22 muestras ya pulverizadas previamente, fueron procesadas en el equipo de absorción atómica (Fig. 22) ubicado en el Instituto de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias de la Universidad Central de Venezuela, se determinaron los compuestos  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ , expresados en % y los elementos Ni y Zn, expresados en ppm.

Para la descomposición y disolución de muestras sólidas se siguieron los procedimientos habituales, que incluyen tratamiento con ácidos minerales en caliente, oxidación con reactivos líquidos ( $\text{HNO}_3$ ,  $\text{HClO}_4$ , etc.), combustión en bomba de oxígeno, disgregaciones a alta temperatura ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ) etc.

Como resumen de la metodología utilizada para este estudio se puede ver la figura 23 que nos sintetiza el proceso, y la técnica es explicada a mayor detalle en el Apéndice 1.



**Figura 23.** Metodología para Absorción Atómica

### 3.3.2.2. Análisis químico por la técnica Fluorescencia de rayos X

La Fluorescencia de Rayos X está basada en la excitación de una muestra. La intensidad producida por los rayos X secundarios es usada para determinar las concentraciones de los elementos presentes en la muestra ya que estos presentan longitudes de onda características de cada elemento químico. Sin embargo, para

cuantificar estas concentraciones es necesario tener una calibración estándar del equipo que sirva como patrón de referencia, para lo cual previamente son efectuadas correcciones que permiten eliminar los errores instrumentales y los efectos de la matriz. Alternativamente, los rayos X pueden ser detectados sin ser separados en diferentes frecuencias, usando un detector el cual mide la energía así como la intensidad de los rayos X. Este método es conocido como fluorescencia de rayos X por energía dispersiva (ROLLINSON, 1993). Esta técnica será explicada a detalle en el Apéndice 1.



**Figura 24.** Equipo de Fluorescencia de Rayos X. Tomada por Andreina Fernández.

Para este análisis se utilizaron 22 muestras las cuales fueron las más representativas de toda la sección estudiada y se procesaron en un equipo de Fluorescencia de rayos X (Fig. 24), se determinaron los compuestos  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y como elementos el V, las cuales después de tenerlas pulverizadas, se procedió a prepararlas o “montarlas” en unos portamuestras con los cuales se introducen en el equipo de análisis y el material empleado es el siguiente:

- ✓ Portamuestras
- ✓ Alcohol
- ✓ Paleta metálica
- ✓ Filtro Mylar

Las muestras en forma de polvo sin prensar, fueron montadas en los distintos portamuestras de plástico. Primeramente fue colocado el polvo en el porta muestras, el mismo se compactó dando pequeños golpes al depósito sobre una mesa durante un tiempo aproximado de 1min, utilizando el mismo número de golpes para todas las muestras y procurando no contaminar la base del depósito, seguidamente se procedió a colocar la película de Mylar de 0.02  $\mu$  de espesor, la cual impide el contacto de la sustancia con el detector del equipo a la vez que protege la muestra de una posible contaminación y finalmente se coloca un aro que sujeta la muestra con la película de Mylar (Fig. 25).



**Figura 25.** Muestras en los dispositivos. Tomada por Laura Martins

Se preparó un portamuestra por cada muestra analizada, desechando el Mylar utilizado después de cada análisis y limpiando con alcohol isopropílico y papel absorbente los cilindros usados.



**Figura 26:** Portamuestras. Tomada por Laura Martins

Finalmente montadas las muestras en un portamuestras (Fig. 26), se procede a introducirlas en el equipo de Fluorescencia de rayos X o de espectrometría gamma.

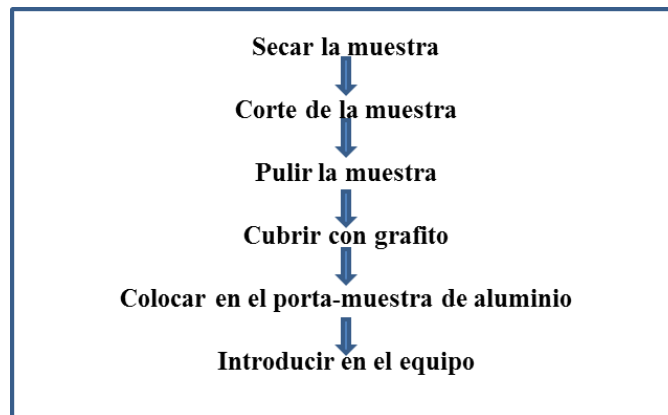
### **3.3.3. Microscopia Electrónica de Barrido**

El microscopio electrónico de barrido se utiliza para el estudio de la morfología y la topografía de los elementos. Las lentes magnéticas utilizan un haz muy fino de electrones para penetrar repetidamente la muestra, y se produce una imagen ampliada de la superficie observada en la pantalla de un Monitor (PAREDES, 2004).

Este tipo de análisis permite identificar además de las características texturales de los granos que constituyen el esqueleto de la roca, confirmar el origen de las arcillas presentes ya sean detríticas y/o autigénicas, así como también la relación diagenética y carácter del sistema de poros presentes.

Es fundamental que las muestras que vayan a ser observadas en Microscopio Electrónico de Barrido (SEM) estén exentas de líquidos y además que sean conductoras.

Este estudio se llevo a cabo por INGEOMIN en colaboración con INTEVEP, para este análisis se seleccionaron 5 muestras las cuales fueron las mas representativas de la sección estudiadas y cada una perteneciente a una facies diferente. La metodología utilizada en este estudio fue la siguiente (Fig. 27):



**Figura 27.** Metodología para Microscopia Electrónica de Barrido

Esta técnica y sus especificaciones para la preparación de muestras se explica a detalle en el Apéndice 1.

### **3.4. Fase de Oficina**

#### **3.4.1. Actualización Cartográfica**

Con los mapas pertenecientes a la zona de estudio, 6249-I-SO y 6249-II-NO, a escala 1:25000, se procedió a vectorizar la información necesaria para crear una base topográfica del área utilizando el software ArcGis®, los mismos fueron georeferenciados en proyección Universal Transverse Mercator (UTM) en su zona 19, Datum La Canoa. Los principales datos a vectorizar fueron: curvas de nivel, hidrografía, vías de comunicación y toponimia; dándole a cada uno de estos sus respectivos atributos como; cota, nombre, etc.

Una vez finalizada la vectorización de todos los datos topográficos del mapa se procedió a trabajar con la información recopilada en campo, es decir, ubicar cada una de las paradas realizadas durante el levantamiento con ayuda del dato tomado con el GPS, ubicación de las muestras tomadas en cada uno de estos puntos



Se recopiló la información geológica del trabajo de SANDIA, A. (1981), utilizando los mapas geológicos como base en ArcGIS®, los datos tomados de éste fueron estructurales, corroborando así la información recolectada por nosotros en campo.

### 3.4.2. Clasificación de Facies

Finalizado el estudio petrográfico se procedió a clasificar por facies de la siguiente manera:

La primera división se realizó netamente litológico (litofacies), dando como resultados 8 facies principales siendo estas: Wackestone, Grainstone, Floatstone, Rudstone, Arrecife o Bindstone, “Pillows” o Framestone, Brecha y Calcarenita.

La segunda división fue mayor a detalle, es decir, en cada una de las facies se subdividió de acuerdo a los individuos u organismos que predominaban en cada una de las muestras, por ejemplo se tomaron en cuenta la posición de los corales y sus tamaños, por lo cual se llamaron sub-facies y fueron denotadas de la siguiente manera: primero colocando el tipo de roca y seguidamente en nombre del individuo u organismo predominante como por ejemplo: “Wackestone de Rodolitos”.

En resumen las facies establecidas para la Formación San Luis en la zona de estudio fueron las siguientes:

1. Wackestone
  - 1.1. Wackestone de Rodolitos
  - 1.2. Wackestone de Algas rojas
2. Grainstone
3. Floatstone
  - 3.1. Floatstone de Coral en posición de crecimiento
  - 3.2. Floatstone de Fragmentos de Coral
4. Rudstone
  - 4.1. Rudstone de *Diploria* sp.

- 4.2. Rudstone de Coral en posición de crecimiento
- 4.3. Rudstone de Coral aplastado
5. Arrecife o Bindstone
  - 5.1. Arrecife de *Diploria* sp.
  - 5.2. Arrecife de Coral aplastado
  - 5.3. Arrecife con Algas rojas
  - 5.4. Arrecife de Coral en posición de crecimiento
6. “Pillows” o Framestone
7. Brecha
8. Calcarenita

### **3.4.3. Procesamiento de datos estadísticos**

El manejo e interpretación de los datos obtenidos por las técnicas de Absorción Atómica y Fluorescencia de Rayos X, hace necesario el uso de herramientas estadísticas para el análisis, como lo son los métodos estadísticos univariados y multivariados.

Los métodos univariados utilizados en el análisis de los datos incluyeron medidas de tendencia central tales como: mediana, se usaron también diagramas de caja (box plots) y diagramas de dispersión. El análisis multivariado aplicado para este trabajo incluye únicamente funciones discriminantes. Todos estos datos fueron procesados con el software STATGRAPHICS Plus 5.1 y Excel 2010. Estas herramientas son explicadas a detalle en el Apéndice 1.

## CAPITULO IV

### FACIES TEXTURALES

#### 4.1. GENERALIDADES

Según MÉNDEZ (2009), facies es una unidad de roca o sedimento, o grupo de unidades de rocas asociadas o sedimentos los cuales tienen características particulares litológicas, sedimentológicas y faunales que reflejan condiciones específicas de origen, formación y deposición.

Para la Formación San Luis se identificaron 8 facies texturales representativas de la zona de estudio que se describen a continuación:

#### 4.2. DESCRIPCIÓN DE FACIES

##### 4.2.1. FACIES DE WACKESTONE

El wackestone es una roca carbonática la cual contiene un 50% de lodo o micrita y más de un 10% de granos o aloquímicos, siendo esta soportada por lodo. Es una roca que se forma con un nivel de energía bajo evidenciado por el gran porcentaje de micrita o lodo carbonático que la compone.

##### 4.2.1.1. Sub-facies 1: Wackestone de Rodolitos

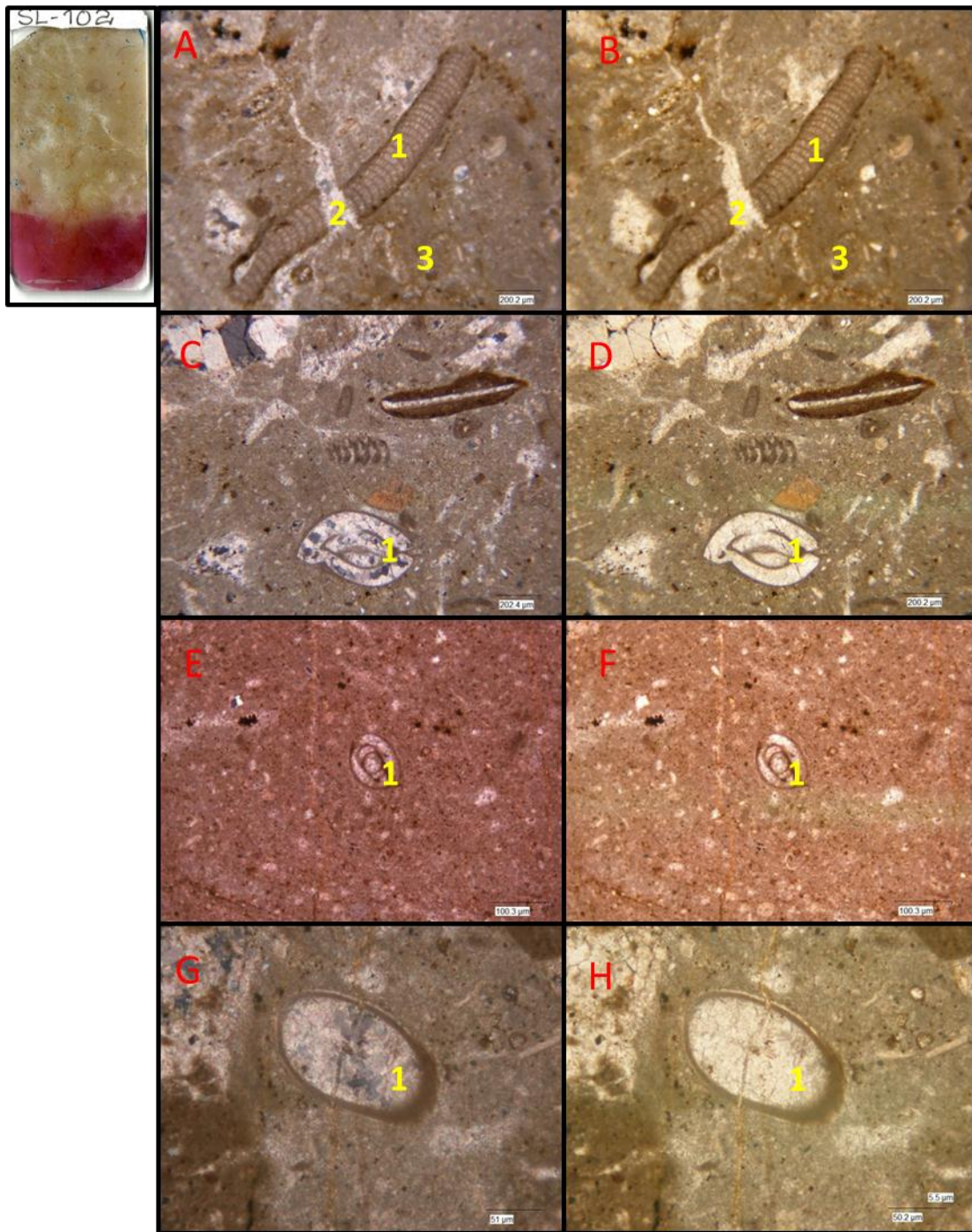
Conformado por la muestra SL-102 (Figs. 28 y 29) la cual se caracteriza por la presencia de Rodolitos.

La muestra SL-102 está constituida en un 29% por aloquímicos los cuales en orden de abundancia se identifican rodolitos, fragmentos algas coralinas, foraminíferos, bivalvos y ostrácodos; así como también se encuentra un 5% de componentes extraclásticos siendo en su mayoría cuarzo detrítico, ígneo y metamórfico. Se observa óxido de hierro del tipo limonita dispersos en la matriz y bordeando algunos fragmentos de algas y fracturas.

#### 4.2.1.2. Sub-facies 2: Wackestone de Algas rojas

Representada por la muestra SL-127 (Fig. 30) donde el aloquímico que más abunda son las algas coralinas.

Esta muestra está conformada por un 20% de aloquímicos identificando en orden de abundancia algas rojas del tipo *Lithophorella* sp., foraminíferos tipo *Nummulites* sp., y uniseriales principalmente, equinidos, sorítidos, bivalvos, ostrácodos, los componentes siliciclásticos en la muestra son escasos abarcando un 1% de esta. Se observa óxido de hierro tipo limonita disperso en la matriz y las partículas esqueléticas.



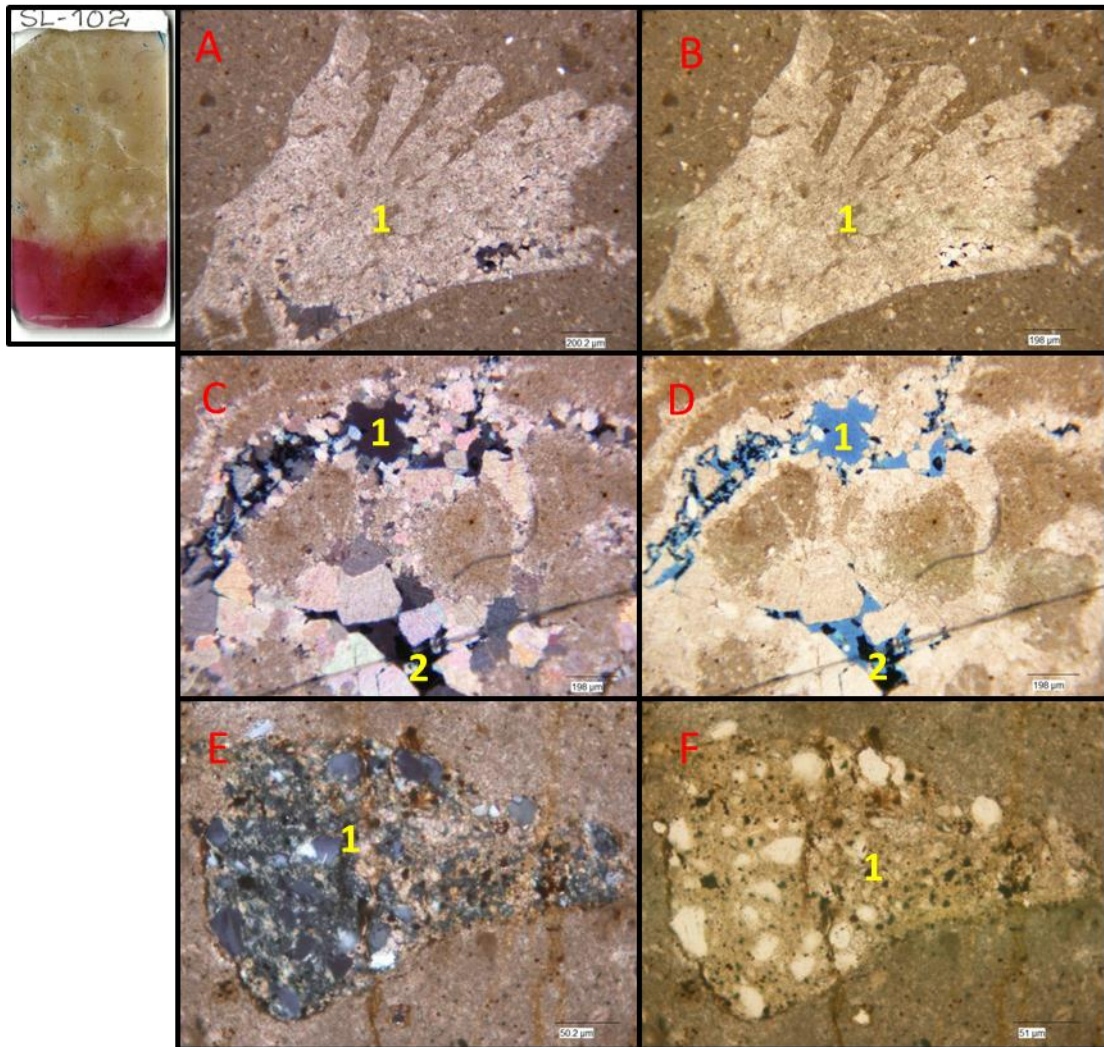
**Figura 28.** Petrografía SL-102.

**A** (nc) y **B** (np) **1** *Lithophyllum* sp. **2** Fractura rellena de Esparita, **3** Micrita con Limonita (4x).

**C** (nc) y **D** (np) **1** *Spiroloculina* sp. Con Inversión Heteroaxial (4x).

**E** (nc) y **F** (np) **1** *Miliolide* (10x). **G** (nc) y **H** (np) **1** Ostrácodo (20x).



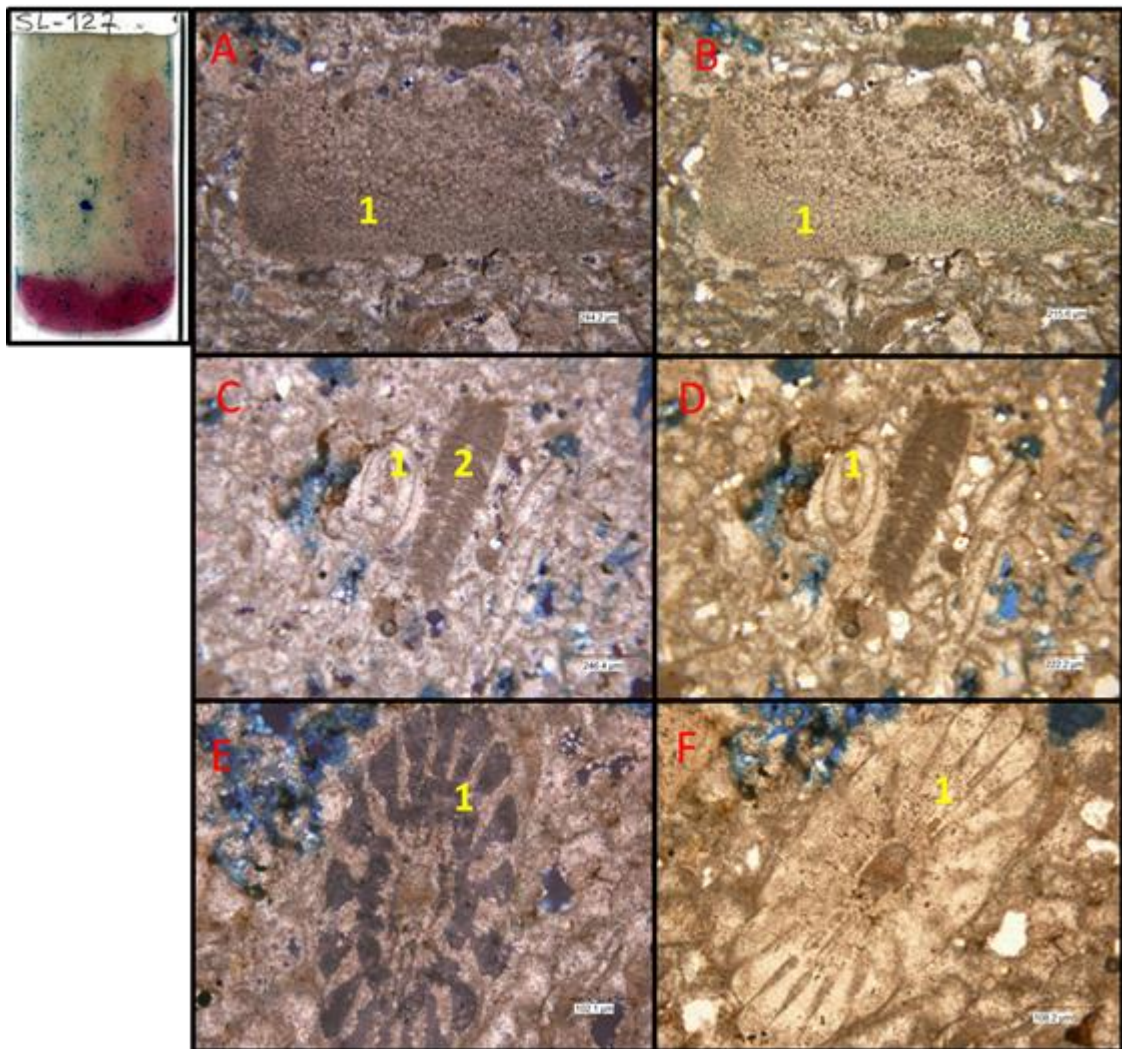


**Figura 29.** Petrografía SL-102.

A (nc) y B (np) **1** Fragmento de Briozoa (4x).

C (nc) y D (np) **1** Porosidad por disolución, **2** Materia Orgánica (4x).

E (nc) y F (np) **1** Fragmento de roca sedimentario (20x).



**Figura 30.** Petrografía SL-127.

A (nc) y B (np) **1** Fragmento de Coral (4x).

C (nc) y D (np) **1** *Spiroloculina* sp., **2** Sorfido (4x).

E (nc) y F (np) **1** Equinido (10x).

#### 4.2.2 FACIES DE GRAINSTONE

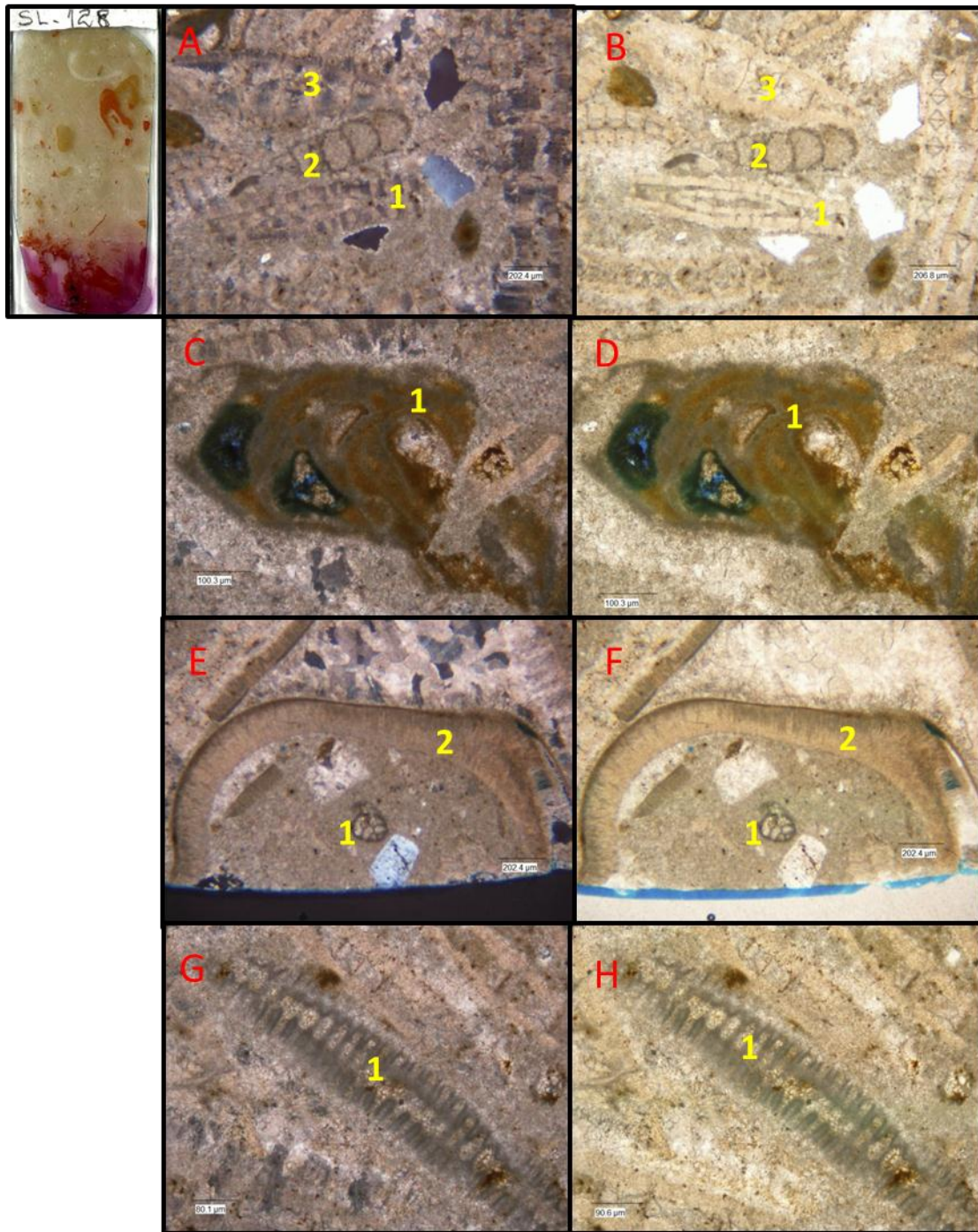
Un grainstone se define como una roca que contiene cemento entre los granos y espacios porosos producidos por la cementación; está formada por granos (bioclastos, ooides, fragmentos mixtos, etc.) que se soportan entre sí, manteniendo espacios porosos, los cuales finalmente pueden ser eliminados por el desarrollo de cementos en los diversos ambientes diagenéticos.

Representada por la muestra SL-128 (Fig. 31) donde el aloquímico que más abunda son los foraminíferos béticos del tipo *Heterostegina* sp.

Esta muestra está constituida por un 60% de aloquímicos entre los cuales se identificaron en orden de abundancia: *Heterostegina* sp., fragmentos de coral, braquiópodos, gasterópodos, pellets, algas coralinas, sorítidos, bivalvos, equinidos; y un 5 % de componentes siliciclásticos.

En esta facies la porosidad se presenta muy escasa siendo ésta de un 1% evidenciada por la disolución de partículas esqueléticas.





**Figura 31.** Petrografía SL-128.

**A** (nc) y **B** (np) **1** *Heterostegina* sp., **2** Foraminífero Uniserial, **3** Fragmento de coral (4x).

**C** (nc) y **D** (np) **1** Fragmento de alga con limonita (10x).

**E** (nc) y **F** (np) **1** Foraminífero Biserial, **2** Fragmento de Molusco (4x).

**G** (nc) y **H** (np) **1** Sorítido (10x).

### **4.2.3. FACIES DE FLOATSTONE:**

Embry & Klovan (1971), basaron su clasificación en el tamaño de grano, y que sus componentes originales no se encuentran unidos orgánicamente durante la sedimentación. El floatstone presenta granos con tamaño mayor a 2 mm y está soportado o flotando en el lodo carbonático o micrita.

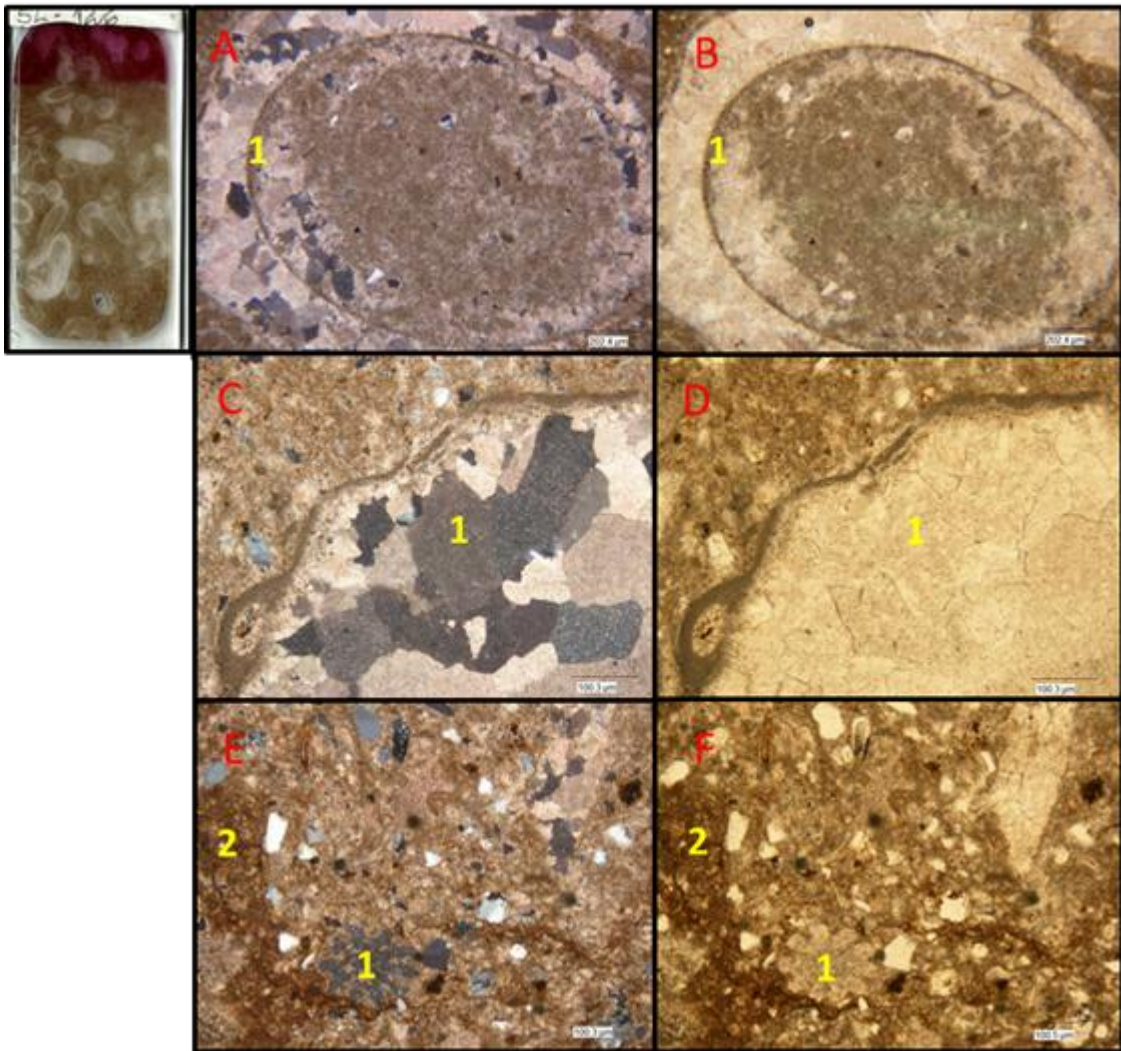
#### **4.2.3.1. Sub-facies 1: Floatstone de Coral en posición de crecimiento**

Esta facies está representada por la sección SL-126 (Fig. 32) la cual está conformada en su mayoría por corales en posición de crecimiento o en forma de tubos y por rodolitos.

La muestra SL-126 está constituido de 22% por componentes aloquímicos los cuales se identificaron principalmente corales en posición de crecimiento, rodolitos, fragmentos de algas coralinas, foraminíferos, bivalvos, equinidos, pellets; los componentes extraclásticos abarcan un 15% y se observan por toda la muestra de manera aleatoria estando constituido por cuarzo detrítico y metamórfico policristalino, algunas plagioclasas y fragmentos de roca tipo chert. Las estilolitas son de baja amplitud continuas en longitud.

#### **4.2.3.2. Sub-facies 2: Floatstone de Fragmentos de coral**

Esta facies está caracterizada por la presencia de grandes fragmentos de coral los cuales se encuentran recristalizados, bioturbados y micritizados en la muestra SL-85 (Fig. 33), la cual está constituida por 20% de aloquímicos, principalmente por dichos fragmentos de coral y algas coralinas probablemente *Archaelithothamnium* sp.; y un 15% comprendido por componentes extraclásticos siendo en su mayoría cuarzo detrítico, metamórfico policristalino e ígneo policristalino.



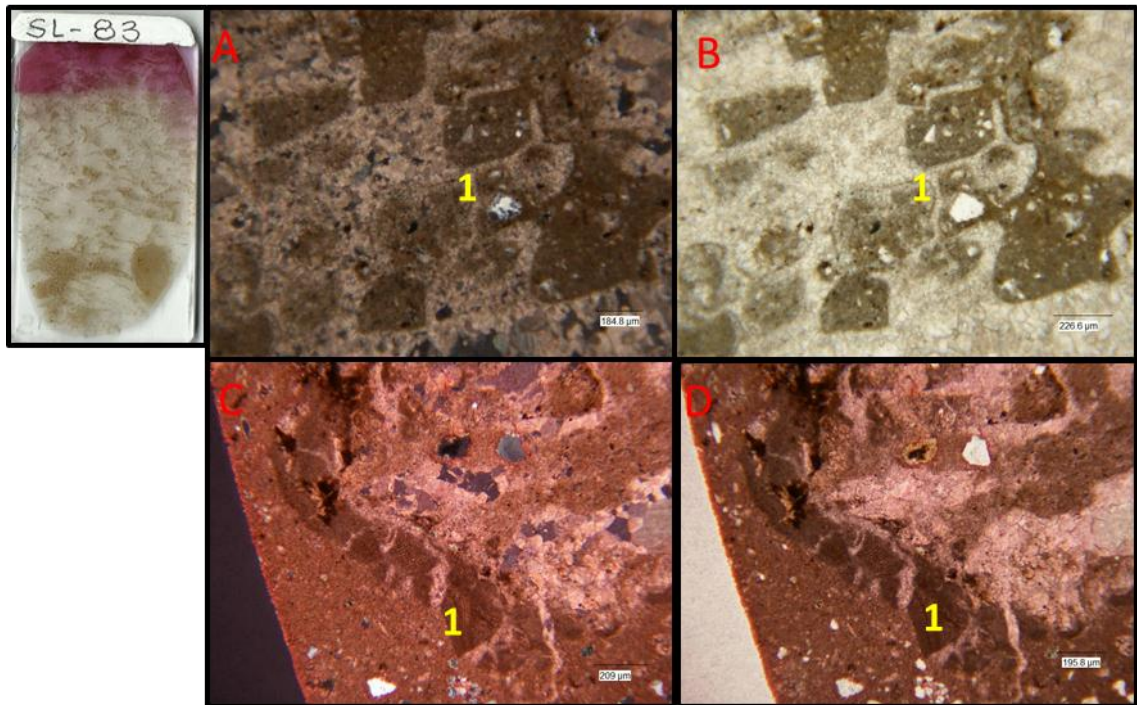
**Figura 32.** Petrografía SL-126.

**A** (nc) y **B** (np) **1** Coral en posición de crecimiento con inversión Heteroaxial (4x).

**C** (nc) y **D** (np) **1** Rodolito (10x).

**E** (nc) y **F** (np) **1** Equinido, **2** Micrita con óxido y material siliciclástico (10x).





**Figura 33.** Petrografía SL-85.

A (nc) y B (np) 1 Fragmento de coral (10x).

C (nc) y D (np) 1 Fragmento de alga (10x).

#### 4.2.4. FACIES DE RUDSTONE

Son rocas carbonáticas formadas por granos con tamaños mayor a 2 mm los cuales se soportan entre sí formando un caparazón, éstas no presentan micrita o lodo carbonático.

##### 4.2.4.1. Sub-facies 1: Rudstone de *Diploria* sp.

Representada por las muestras SL-131 (Fig. 34) y SL-108 (Fig. 35), las cuales presentan principalmente corales del tipo *Diploria* sp.

La muestra SL-131 está conformada por un 18% de componentes aloquímicos, entre los cuales encontramos principalmente *Diploria* sp., algas coralina identificadas como *Lithothamnium* sp. y *Lithophyllum* sp., así como también otros fragmentos de éstas y de foraminíferos, moluscos, briozoarios, equinidos, rodolitos y pellets; un 2% pertenece a componentes extraclásticos siendo éstos cuarzo detrítico, plutónico, metamórficos y fragmentos de rocas sedimentarias.

La muestra SL-108 está constituida en un 30% por componentes aloquímicos identificados en orden de abundancia como *Diploria* sp., fragmentos de algas rojas, braquiópodos, pelecípodos, foraminíferos, y gasterópodos; y 10% de material siliciclástico como cuarzo metamórfico monocristalino y policristalino así como también fragmentos de roca sedimentaria. Se identifica también materia orgánica y pirita en algunos sectores de la muestra, identificados mediante el análisis petrográfico. Presenta óxido de hierro (limonita) disperso en la matriz y rellenando las estilolitas productos de los efectos de presión-solución.

##### 4.2.4.2. Sub-facies 2: Rudstone de Coral en posición de crecimiento

Representada por las muestras SL-132 y SL-110, unidas en una sub-facies debido a la gran abundancia de corales en posición de crecimiento (en forma de tubos).

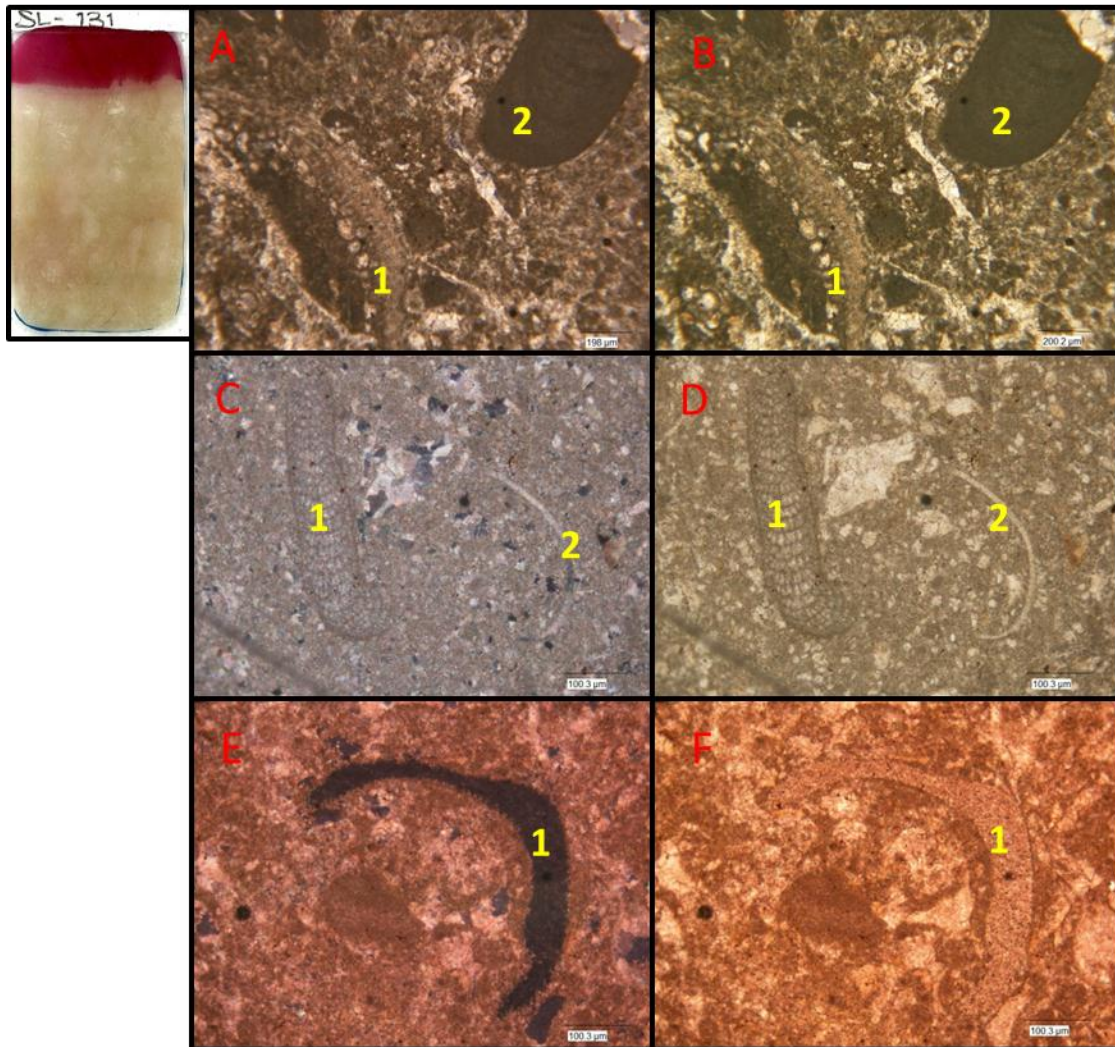
La muestra SL-132 (Fig. 36) está constituida por 30% de aloquímicos compuesta principalmente por corales en posición de crecimiento, fragmentos de algas coralinas, foraminíferos del tipo uniserial, braquiópodos, ooides, briozoas y equinidos; y un 5% de material siliciclástico.

La muestra SL-110 (Fig. 37) está constituida en un 30% por componentes aloquímicos identificándose en su mayoría algas rojas del tipo *Lithophorella* sp. y *Lithophyllum* sp., fragmentos de briozoas, foraminíferos como *Nummulites* sp., *Heterostegina* sp. y otros del tipo uniserial, algunos fragmentos de coral, equinidos y briozoas; se presenta 14% de componentes extraclásticos principalmente cuarzos metamórficos monocristalino y policristalinos así como también algunos fragmentos de rocas sedimentarios.

#### **4.2.4.3. Sub-facies 3: Rudstone de Coral aplastado**

Caracterizada por la presencia de corales aplastados no identificados debido a su gran bioturbación en la muestra SL-122 (Fig. 38). Está constituida por 15% de componentes aloquímicos como corales aplastados, fragmentos algas, foraminíferos, equinidos y pellets, un 4% pertenece al material siliciclástico.

En esta sección se observan una gran cantidad de estilolitas rellenas de calcita producto de la alta compactación producida, siendo éstas de baja amplitud y continuas en toda su longitud.



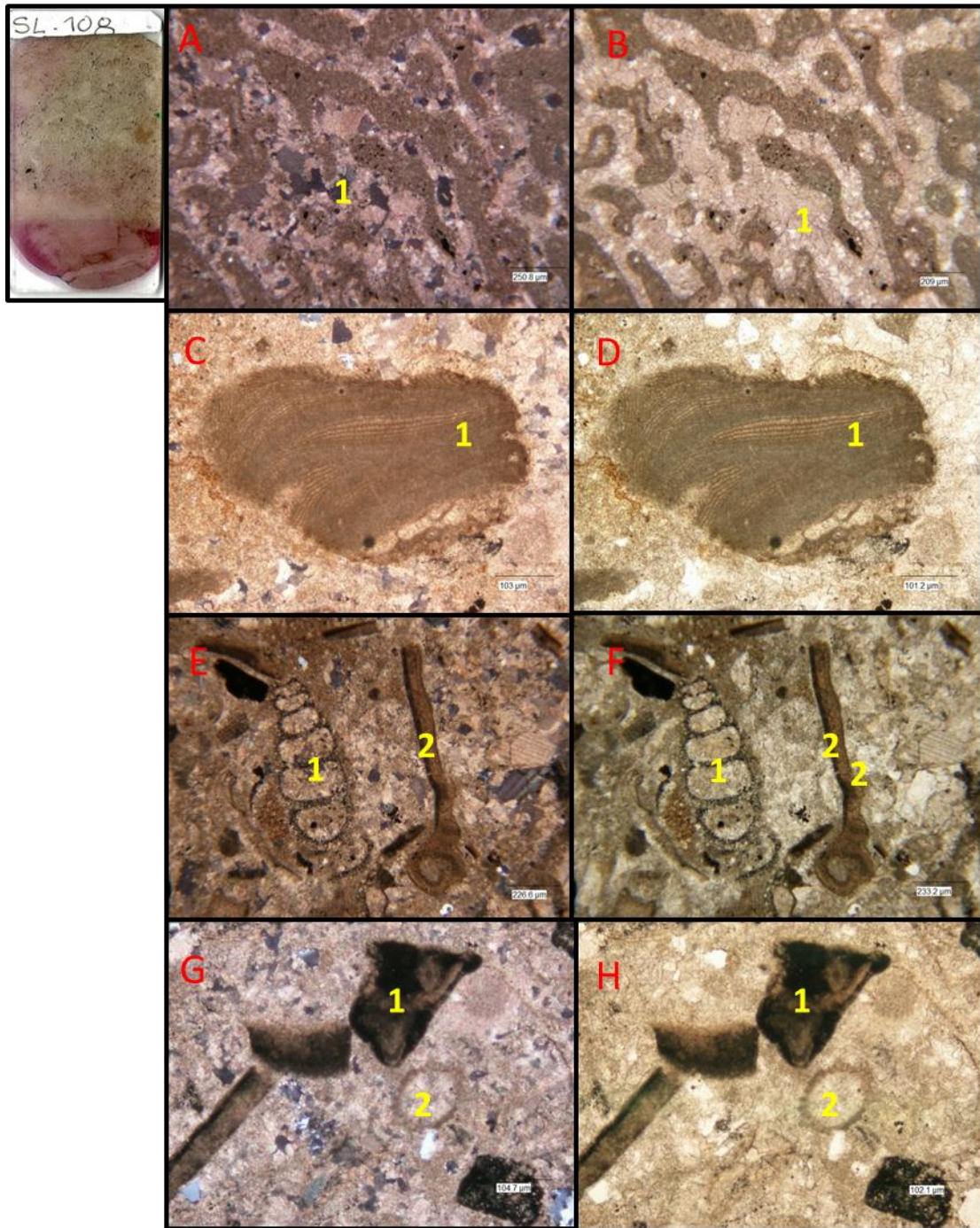
**Figura 34.** Petrografia SL-131.

**A** (nc) y **B** (np) **1** Fragmento de Briozoa, **2** *Lithothamnium* sp. (4x).

**C** (nc) y **D** (np) **1** *Lithophyllum* sp. **2** Fragmento de Bivalvo (10x).

**E** (nc) y **F** (np) **1** Equinodermo (10x).





**Figura 35.** Petrografía SL-108.

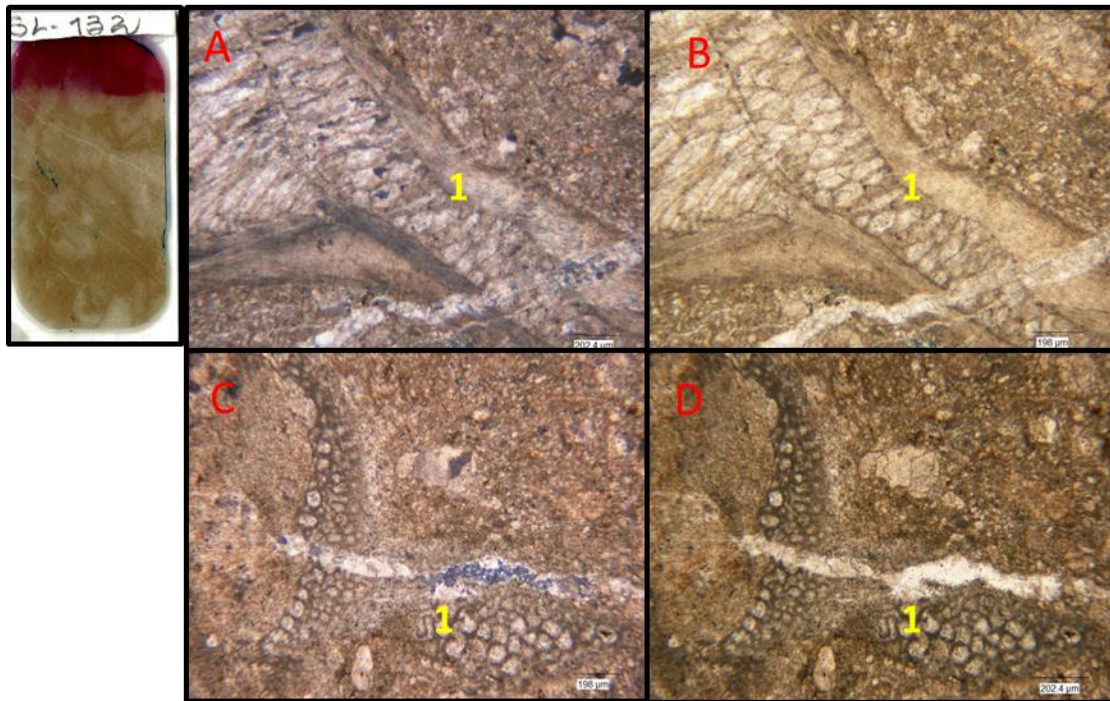
**A** (nc) y **B** (np) **1** *Diploria* sp. (4x).

**C** (nc) y **D** (np) **1** Fragmento de alga micritizada (10x).

**E** (nc) y **F** (np) **1** Foraminífero Uniserial con materia orgánica, **2** *Pelecípodo* (4x).

**G** (nc) y **H** (np) **1** Fragmentos de alga con materia orgánica, **2** *Equinido* (10x).

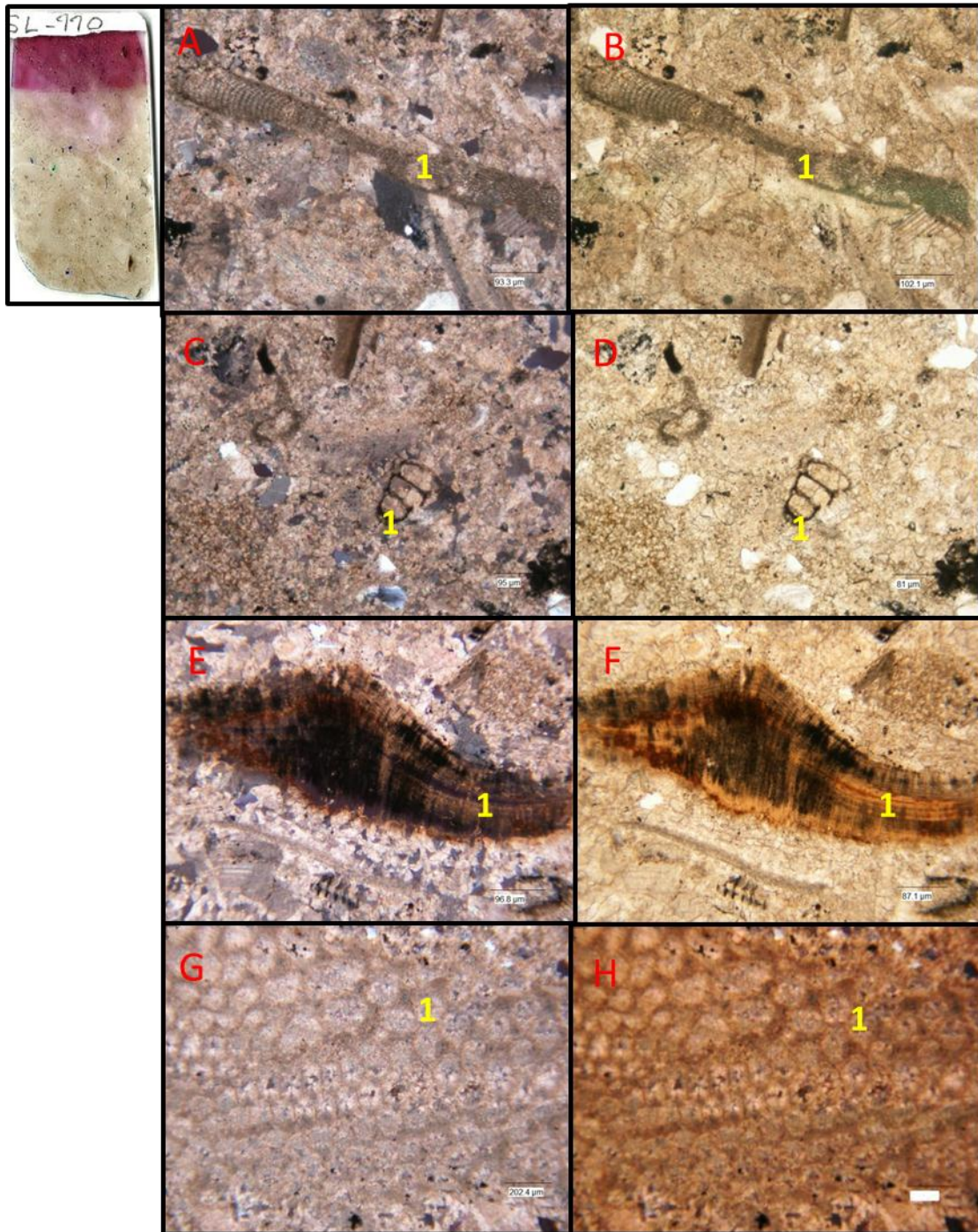




**Figura 36.** Petrografía SL-132.

**A** (nc) y **B** (np) **1** Fragmento de Fragmento de ostreido (4x).

**C** (nc) y **D** (np) **1** Fragmento de Briozoa (4x).



**Figura 37.** Petrografía SL-110.

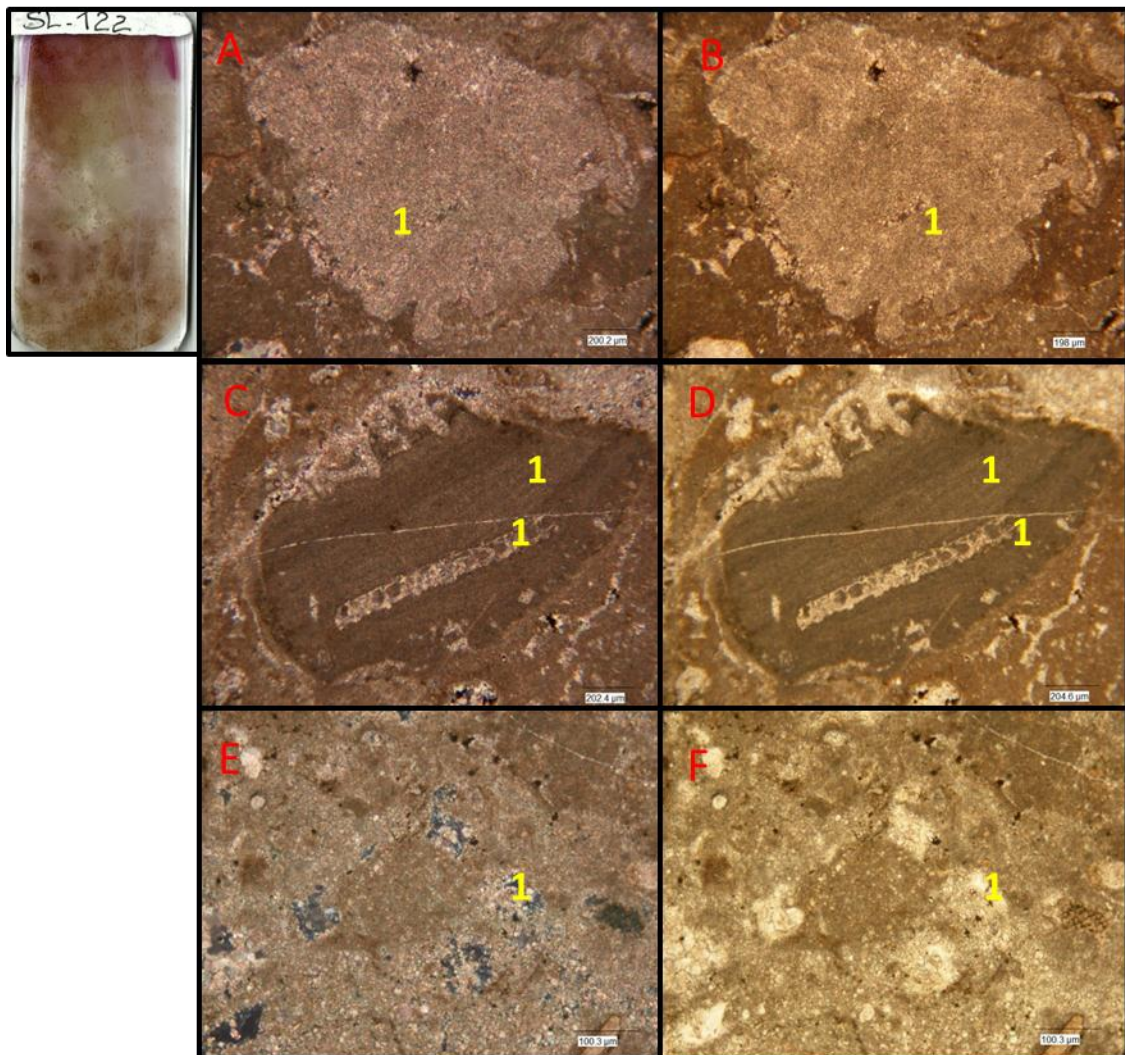
**A** (nc) y **B** (np) **1** *Lithophyllum* sp. (10x).

**C** (nc) y **D** (np) **1** Foraminífero Uniserial (10x).

**E** (nc) y **F** (np) **1** Braquiópodo. (10x).

**G** (nc) y **H** (np) **1** Fragmento de Briozoa (4x).





**Figura 38.** Petrografía SL-122.

**A** (nc) y **B** (np) **1** Fragmento de coral aplastado (4x).

**C** (nc) y **D** (np) **1** Fragmento de Alga (4x).

**E** (nc) y **F** (np) **1** Silicificación (10x).

#### 4.2.5. FACIES DE ARRECIFE O BINDSTONE

El arrecife es una unidad sedimentaria única en la que se interrelacionan los organismos que forman la propia estructura con sus esqueletos, con los organismos que por su actividad aglutinan partículas detríticas y por último con los que perforan y destruyen el edificio. Por lo tanto, un arrecife es la expresión física de la actividad de una comunidad de organismos que se desarrollan en un lugar determinado, durante un período de tiempo concreto (James, 1983). James y Bourque (1992) completan esta definición apuntando además que los arrecifes fósiles son aquellas estructuras construidas por un gran número de organismos normalmente coloniales y con la capacidad de desarrollarse en ambientes de gran energía, al igual que los arrecifes modernos. (MENÉNDEZ, 2005)

Se encuentra principalmente fragmentos de corales de diferentes tamaños, contrastando con los sedimentos que se encuentran a su alrededor cuyos tamaños comprenden las fracciones desde gránulos hasta los limos y se derivan de los fragmentos de corales, algas coralinas, foraminíferos, moluscos, equinodermos, etc.

Debido a la diversidad de organismos encontrados debido a su ambiente de formación, en las diferentes muestras estudiadas en esta facies, se subdividió en las siguientes sub-facies

##### 4.2.5.1. Sub-facies 1: Arrecife de *Diploria* sp.

Está constituida principalmente por grandes fragmentos de coral tipo *Diploria* sp., donde en algunos casos se encuentran rodeados por algas coralinas, formando así rodolitos.

En el estudio petrográfico de las muestras SL-96 (Fig. 39 y 40), SL-133 (Fig. 41 y 42), SL-105 (Fig. 43) y SL-113 (Fig. 44 y 45), se identificaron los siguientes organismos en orden de abundancia: corales tipo *Diploria* sp., así como también fragmentos de algas coralinas, foraminíferos bentónicos de géneros como *Nummulites* sp., *Fusilina*, *Peneróplido*, *Rotalia*, *Miliolidae* y especies como *Amphistegina* sp., entre otros, moluscos (gasterópodos, bivalvos), espinas y sorítidos, ostrácodos, braquiópodos y briozoos. Estos fósiles tienen un promedio de abundancia de 30% con tamaños que oscilan entre 0,1 mm y 2 cm.

La muestra SL-133 presenta materia orgánica y material siliciclástico en poca cantidad no excediendo el 4%, los cuarzos son de tipo plutónico y metamórfico, tienen forma irregular y de baja esfericidad, el tamaño de los granos no es mayor a 1 mm.

#### **4.2.5.2. Sub-facies 2: Arrecife de Coral aplastado**

Identificada en la muestra SL-121 (Fig. 46), la cual está compuesta en su mayoría por corales aplastados no identificados, y algunos corales en posición de crecimiento presentando forma de tubos, se identificaron foraminíferos como la *Fusilina* sp., y diversos fragmentos de algas rojas, gasterópodos y equinidos. El porcentaje de fósiles, fragmentos de fósiles y otros tipos de bioclastos representan el 45% de las muestras cuyo tamaño es de 1 mm a mayor de 2 cm. Los componentes extraclásticos abarcan un 5% y están constituidos por cuarzo del tipo plutónico y metamórfico, cuyos tamaños van de 0,1 a 1 mm, son subredondeados y de baja esfericidad. Se observó la presencia de óxido de hierro (limonita y probablemente hematita) en los bordes de los fósiles y disperso en la micrita.

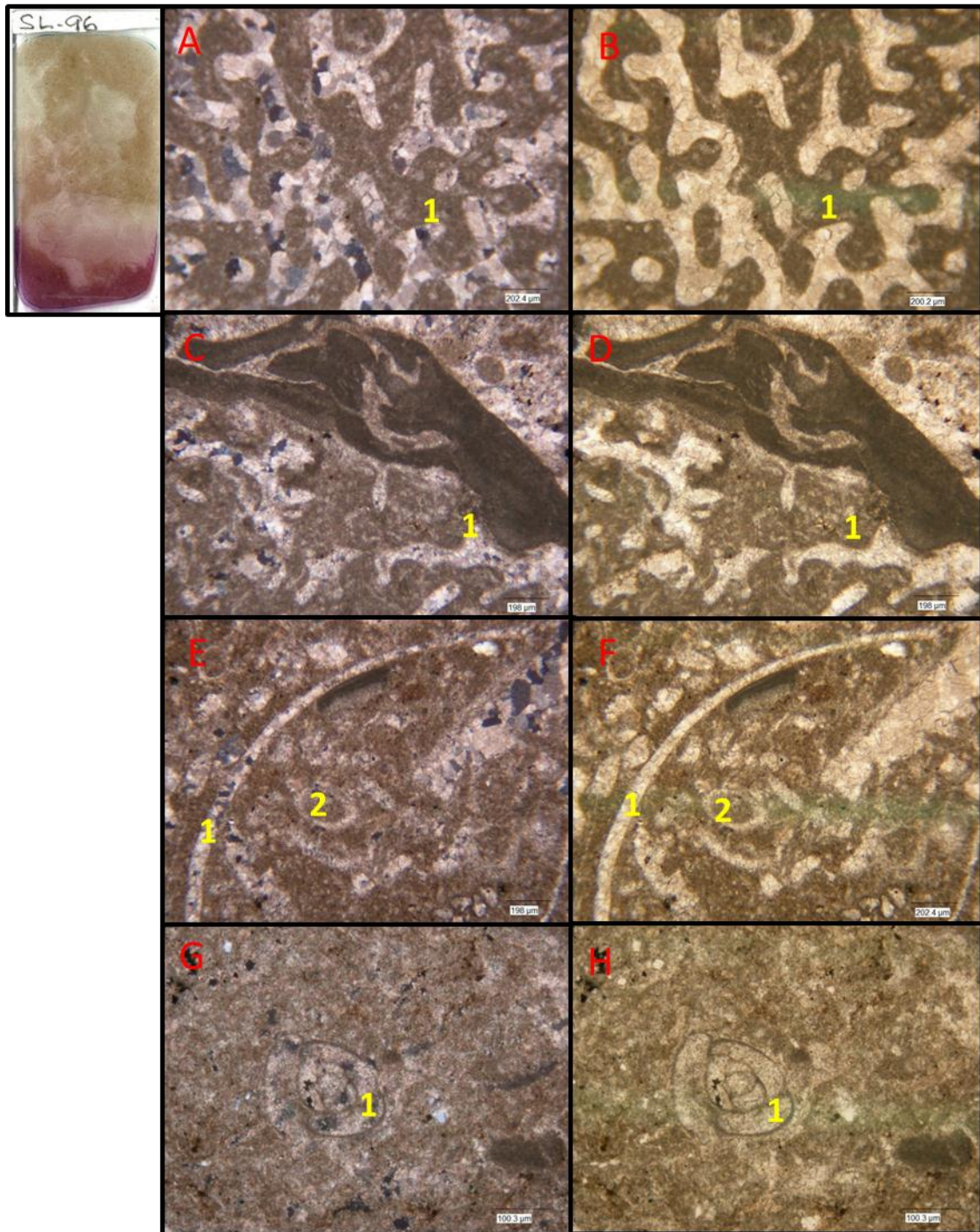
#### 4.2.5.3. Sub-facies 3: Arrecife con Algas rojas

Representada por la muestra SL-119 (Fig. 47 y 48), la cual está constituida en su gran mayoría por algas rojas y rodolitos, es decir, corales que se encuentran rodeados por algas coralinas. El 43% de la muestra comprende una gran cantidad de algas coralinas identificadas como: *Lithothamnium* sp., *Lithophyllum* sp., *Lithophorella* sp. y *Halimeda* sp. las cuales están muy micritizadas y oxidadas; así como también foraminíferos del tipo *Heterostegina* sp., *Rotalia*, *Peneróplido*, *Nummulites* sp. y otros pertenecientes al grupo uniserial; finalmente fragmentos de otros organismos como bivalvos, sorítidos, ostrácodos y equinidos. Las estilolitas son de baja amplitud siendo continua en toda su longitud y presentan acumulaciones de óxido de hierro.

#### 4.2.5.4. Sub-facies 4: Arrecife de Coral en posición de crecimiento

Representada por las secciones SL-112 (Fig. 49) y SL-114 (Fig. 50) las cuales están constituidas en su totalidad por corales en posición de crecimiento. En la muestra SL-114 el corte es transversal y en la muestra SL-112 el corte mostrado es longitudinal. En ambas muestras se observan algunos foraminíferos y fragmentos de algas, la cantidad de componentes extraclásticos no es mayor a 1% en cada una de estas muestras.





**Figura 39.** Petrografía SL-96.

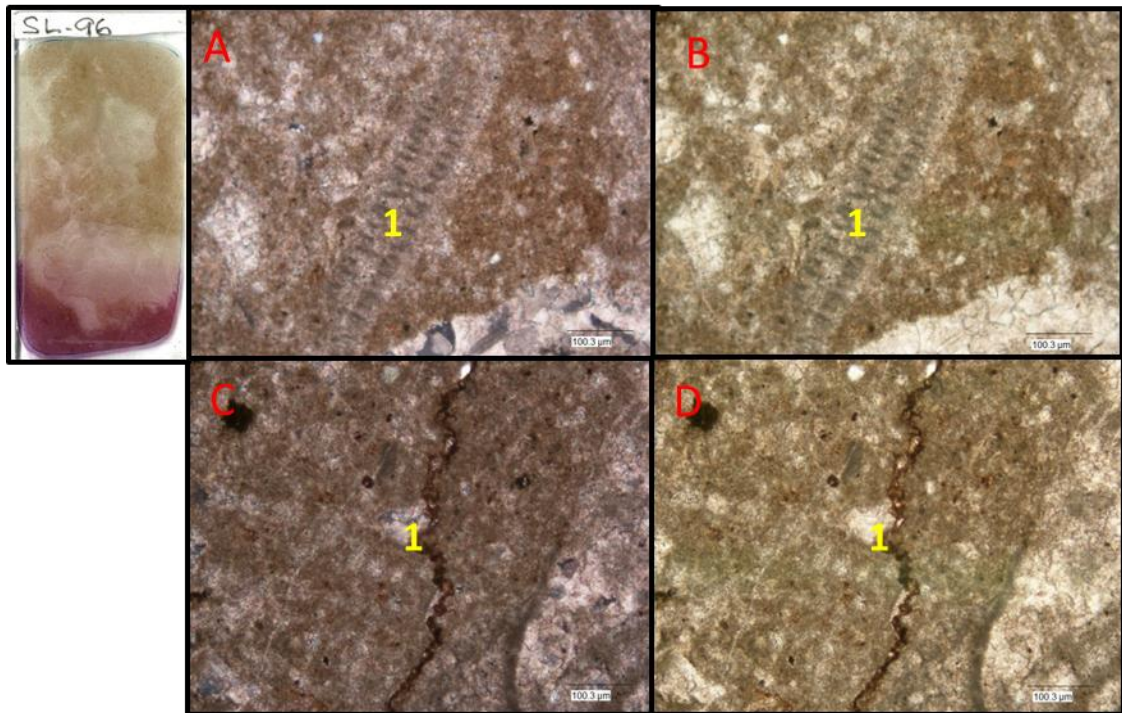
A (nc) y B (np) **1** *Diploria* sp. (4x).

C (nc) y D (np) **1** Rodolito (4x).

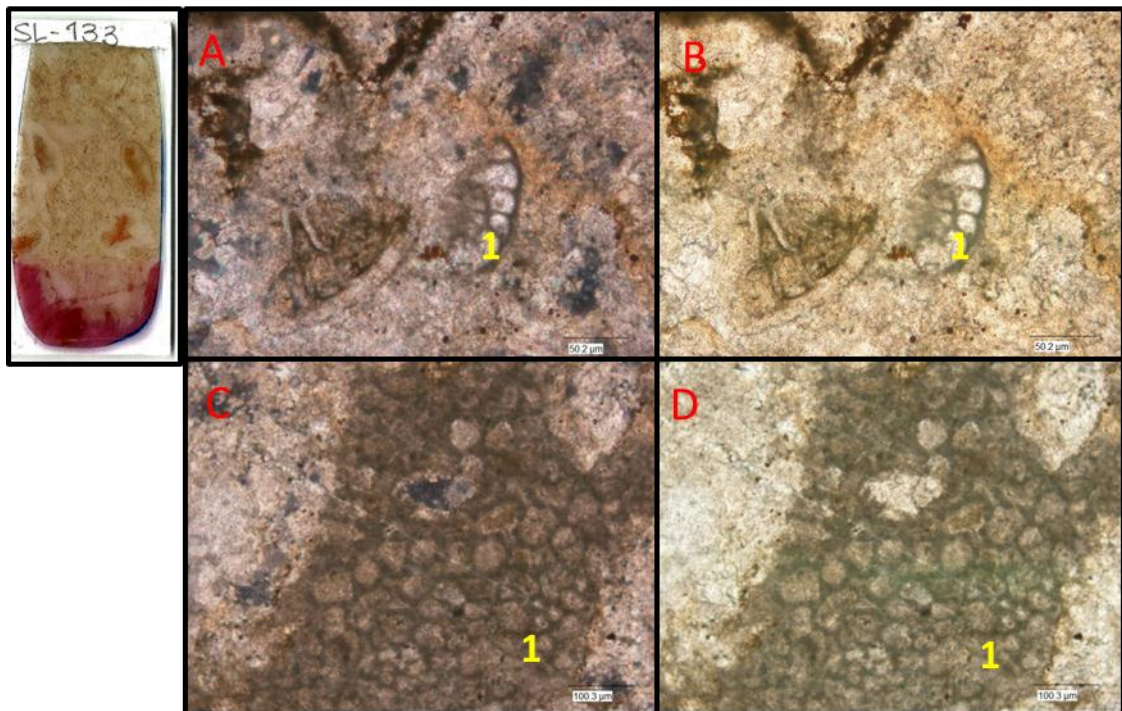
E (nc) y F (np) **1** Fragmento de Bivalvo, **2** Ostrácodo (4x).

G (nc) y H (np) **1** *Triloculina* sp. (10x).



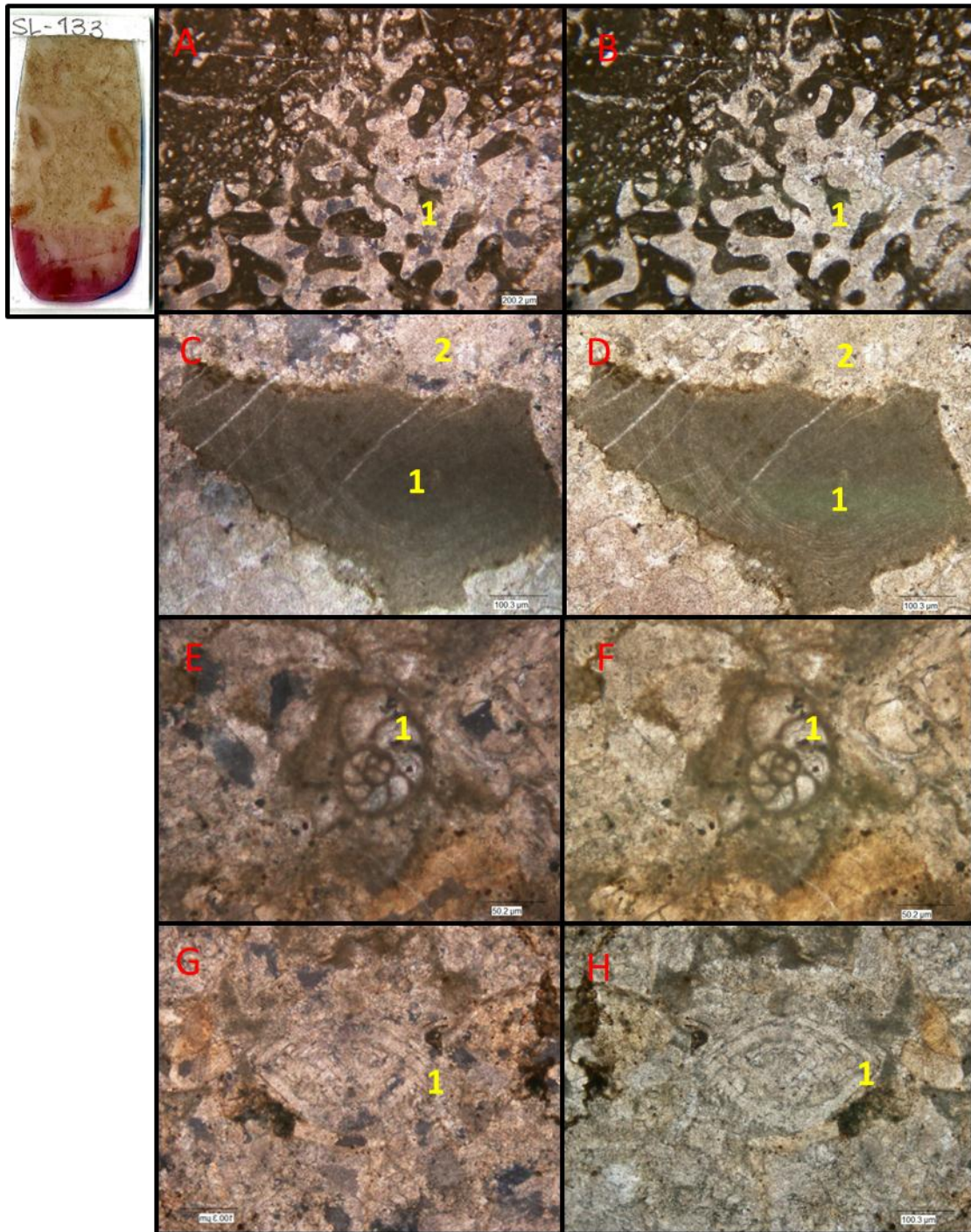


**Figura 40.** Petrografía SL-96. **A** (nc) y **B** (np) 1 Sorítido (4x).  
**C** (nc) y **D** (np) 1 Estilolita rellena de óxido de Hierro (Limonita) (10x).



**Figura 41.** Petrografía SL-133. **A** (nc) y **B** (np) 1 Fragmento de *Rotalia* (20x).  
**C** (nc) y **D** (np) 1 Fragmento de Briozoa (10x).





**Figura 42.** Petrografía SL-133.

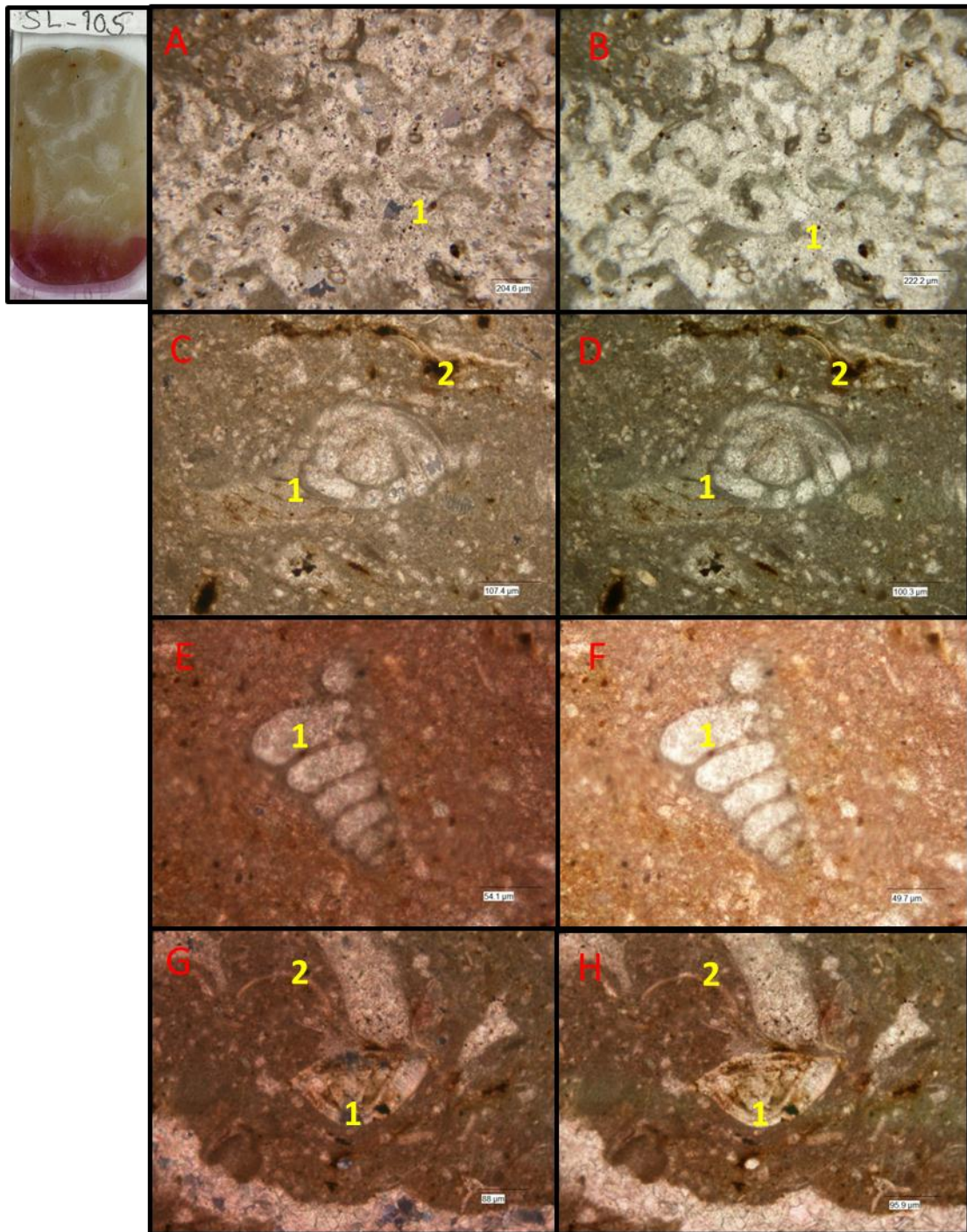
A (nc) y B (np) 1 *Diploria* sp. (4x).

C (nc) y D (np) 1 Fragmento de alga, 2 Esparita (10x).

E (nc) y F (np) 1 *Lenticulina* sp. (20x).

G (nc) y H (np) 1 *Nummulites* sp. (10x).





**Figura 43.** Petrografía SL-105.

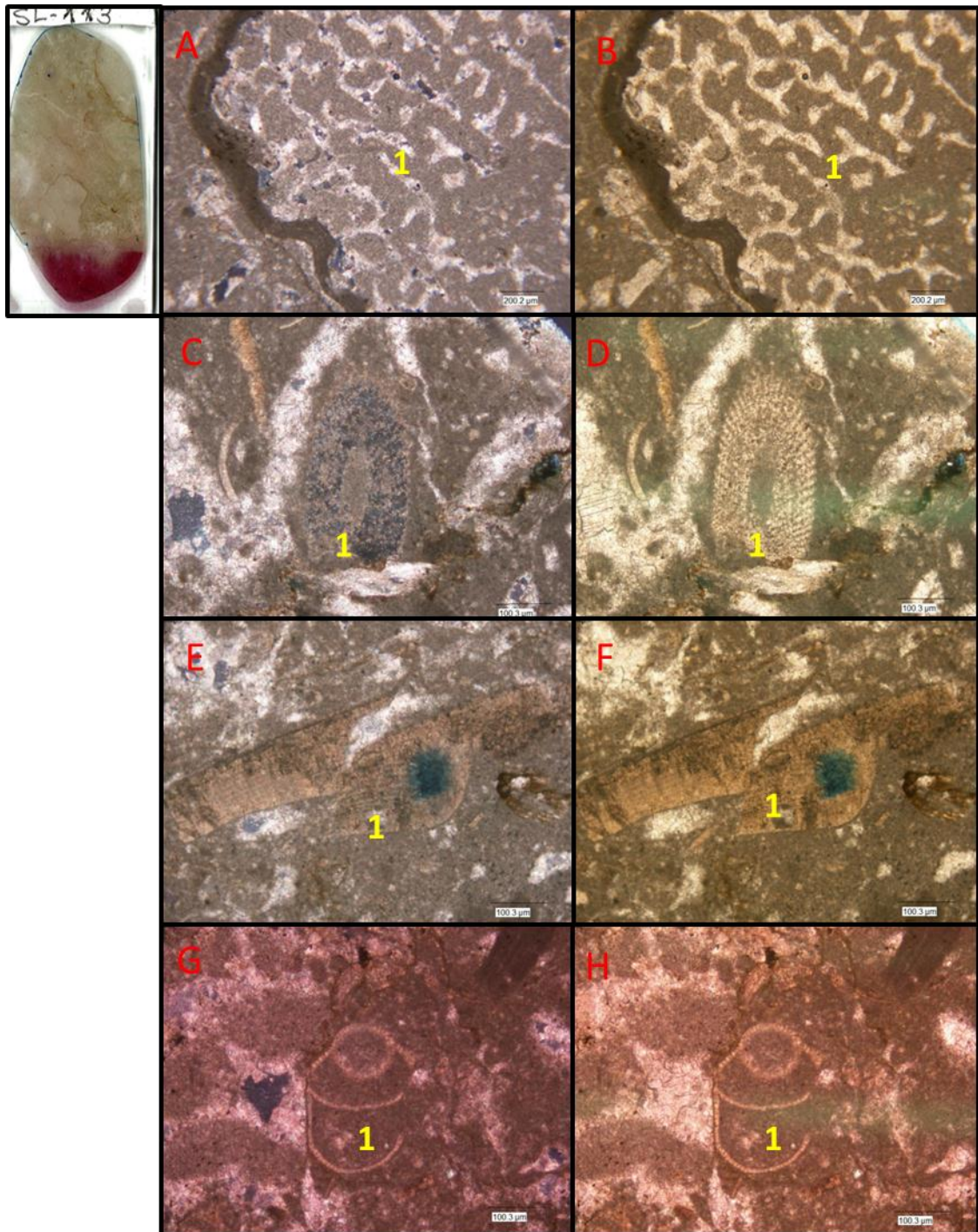
A (nc) y B (np) **1** *Diploria* sp. (4x).

C (nc) y D (np) **1** *Peneroplido*, **2** Óxido de Hierro (10x).

E (nc) y F (np) **1** Foraminífero Uniserial (20x).

G (nc) y H (np) **1** *Amphistegina* sp., **2** Fragmento de Bivalvo (20x).





**Figura 44.** Petrografía SL-113.

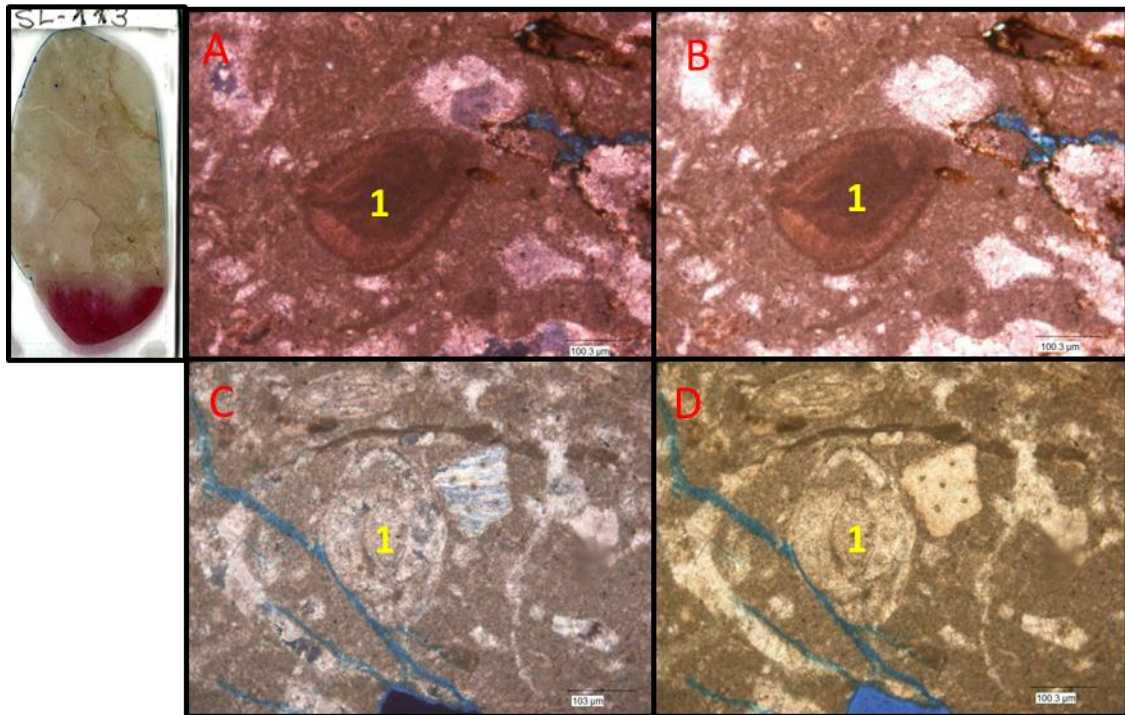
**A** (nc) y **B** (np) **1** Rodolito (4x).

**C** (nc) y **D** (np) **1** Equinido (10x).

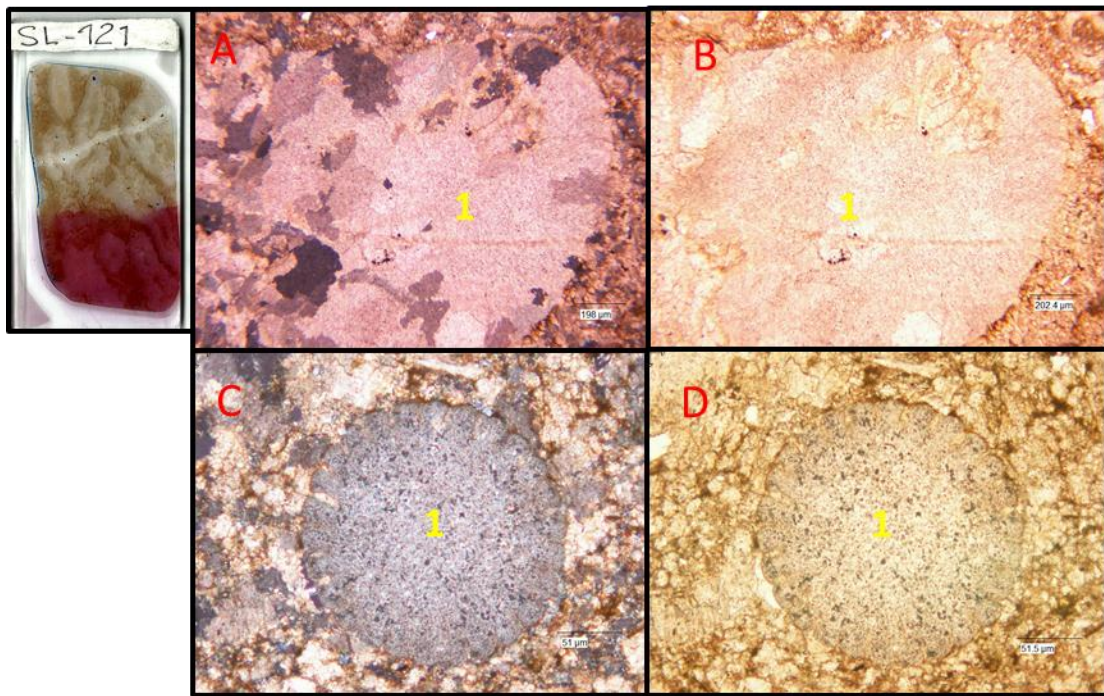
**E** (nc) y **F** (np) **1** Fragmento de Molusco fracturado (10x).

**G** (nc) y **H** (np) **1** Foraminífero Uniserial (10x).



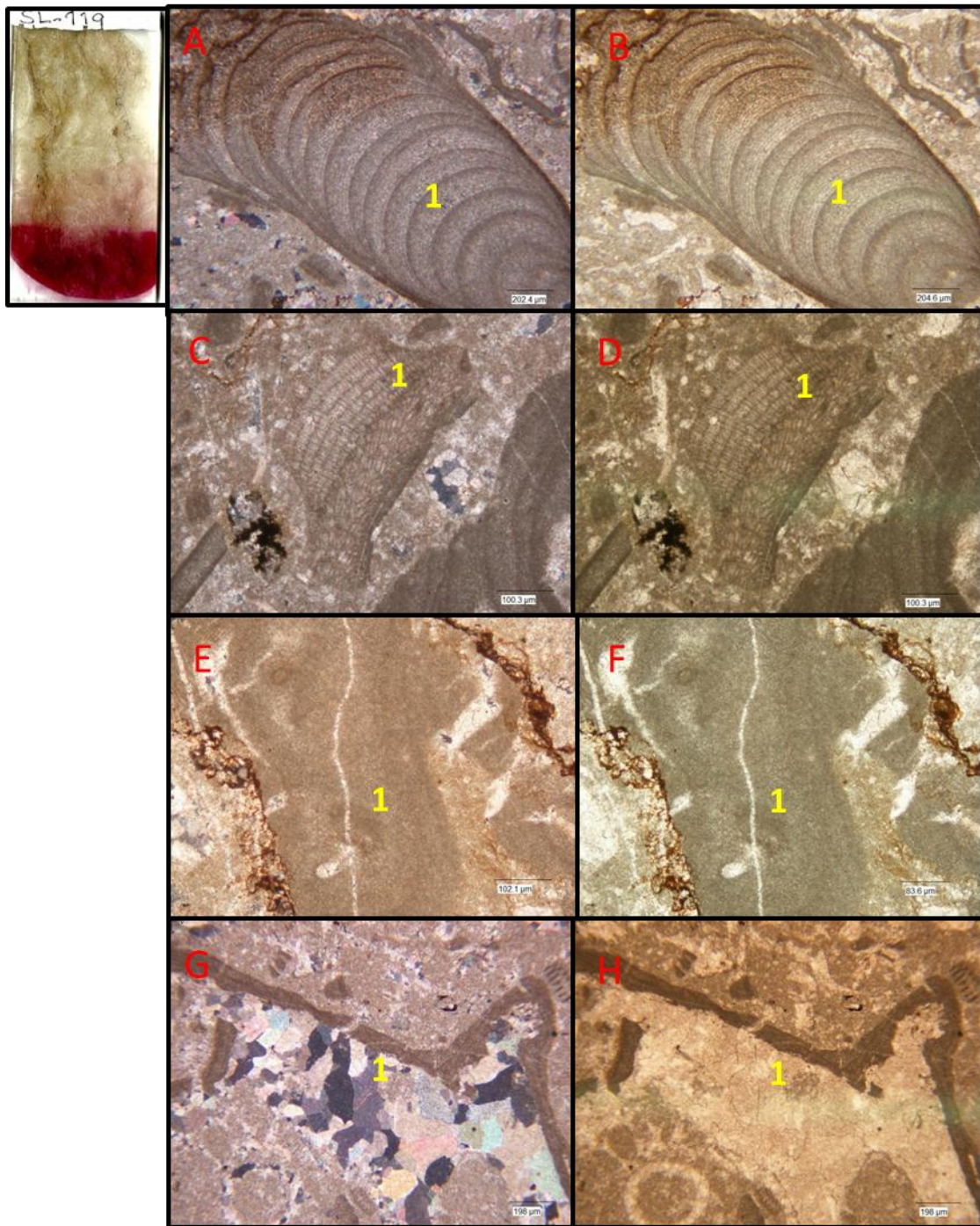


**Figura 45.** Petrografía SL-113. A (nc) y B (np) 1 *Amphistegina* sp. (10x).  
C (nc) y D (np) 1 *Nummulites* sp. (10x).



**Figura 46.** Petrografía SL-121. A (nc) y B (np) 1 Coral aplastado (4x).  
C (nc) y D (np) 1 Equinido (20x).





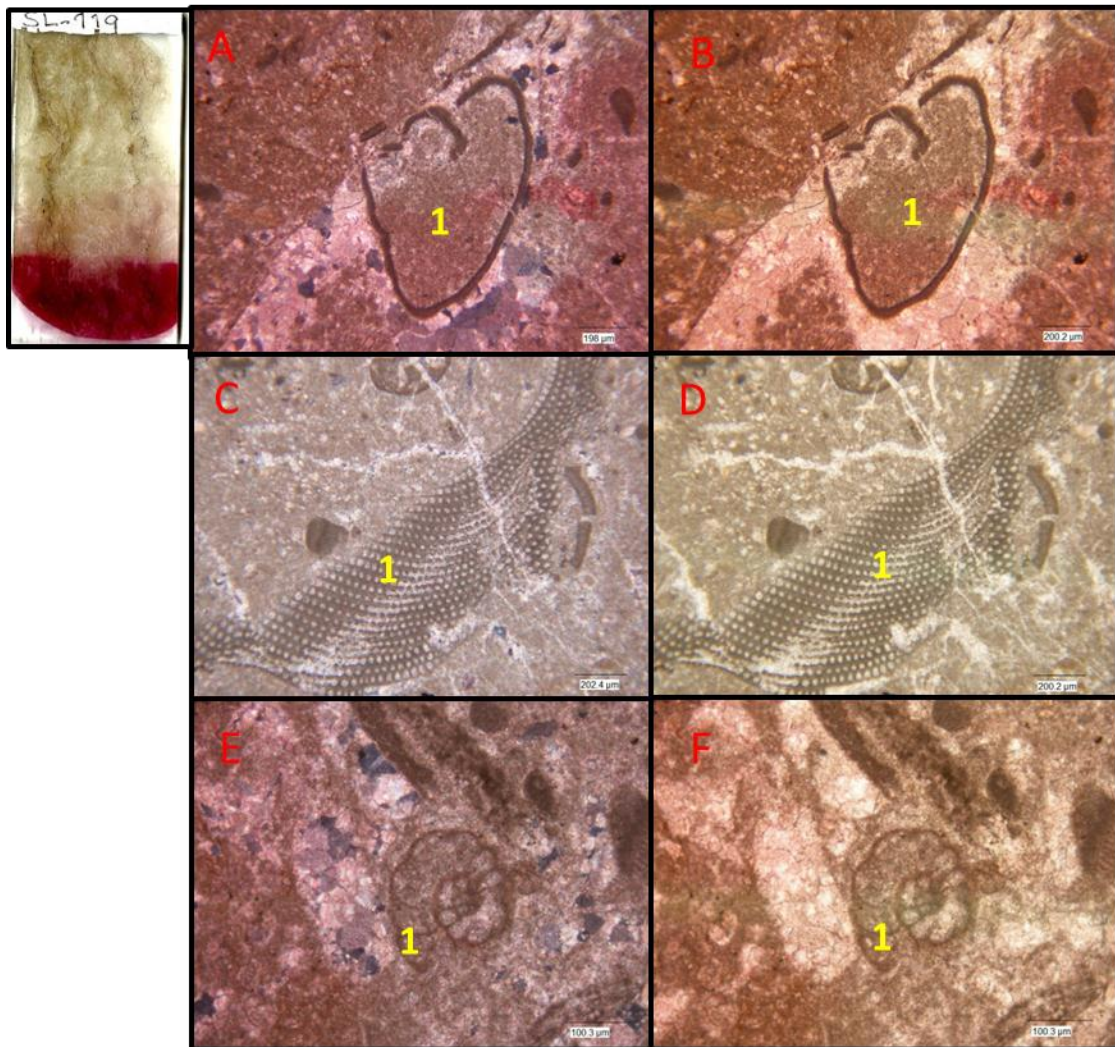
**Figura 47.** Petrografía SL-119.

A (nc) y B (np) **1** *Lithothamnium* sp. (4x).

C (nc) y D (np) **1** *Lithophorella* sp. (10x).

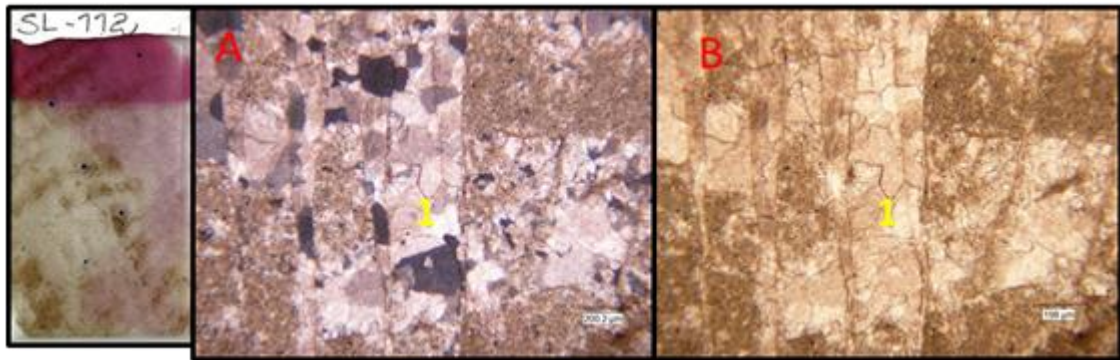
E (nc) y F (np) **1** *Halimeda* sp. (10x).

G (nc) y H (np) **1** Rodolito (4x).

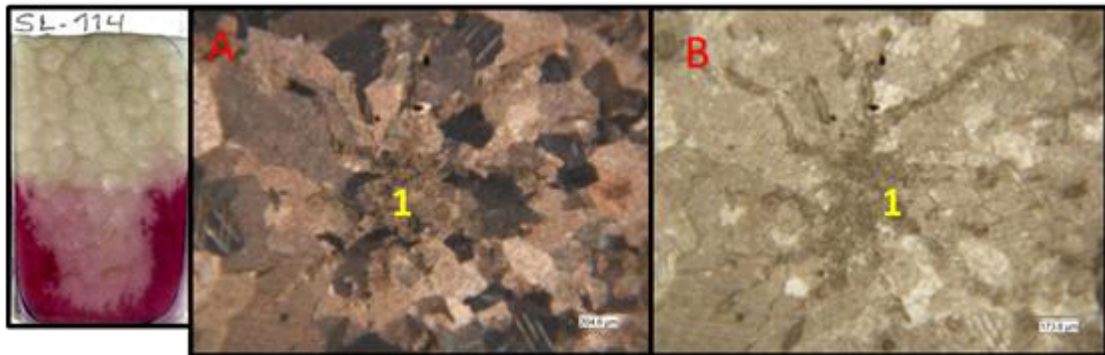


**Figura 48.** Petrografía SL-119.  
A (nc) y B (np) 1 Fragmento de Foraminífero (4x).  
C (nc) y D (np) 1 Fragmento de Sorítido (4x).  
E (nc) y F (np) 1 Rotalia (10x).





**Figura 49.** Petrografía SL-112.  
A (nc) y B (np) 1 Fragmento de coral en corte transversal (10x).



**Figura 50.** Petrografía SL-114. A (nc) y B (np) 1 Hexacoral (4x).

#### 4.2.6. FACIES DE “PILLOWS” O FRAMESTONE

Representada por las muestras SL-123 y SL-124 siendo estas dos una variación de base a tope del sector donde se encontraron esos grandes cuerpos de colonias de corales entre 20 y 70 cm.

La muestra SL-123 (Fig. 51), está constituida por un 15% de aloquímicos como fragmentos de algas rojas y corales, foraminíferos, equinidos, bivalvos y braquiópodos, en orden de abundancia respectivamente; se observa un 18% de material siliciclástico, compuesto principalmente por granos de cuarzo metamórfico policristalino y algunos fragmentos de roca sedimentarias. Se encuentra también materia orgánica y ankerita en algunas zonas de la sección con una cantidad menor al 2%.

La muestra SL-124 (Fig. 52), está constituida por un 15% de componentes aloquímicos siendo estos en orden de abundancia *Diploria* sp., foraminíferos, equinidos, bivalvos, braquiópodos, briozoarios. Se observa la presencia de óxido de hierro (limonita) se encuentra en las estilolitas de baja amplitud y disperso en la matriz.





**Figura 51.** Petrografía SL-123.

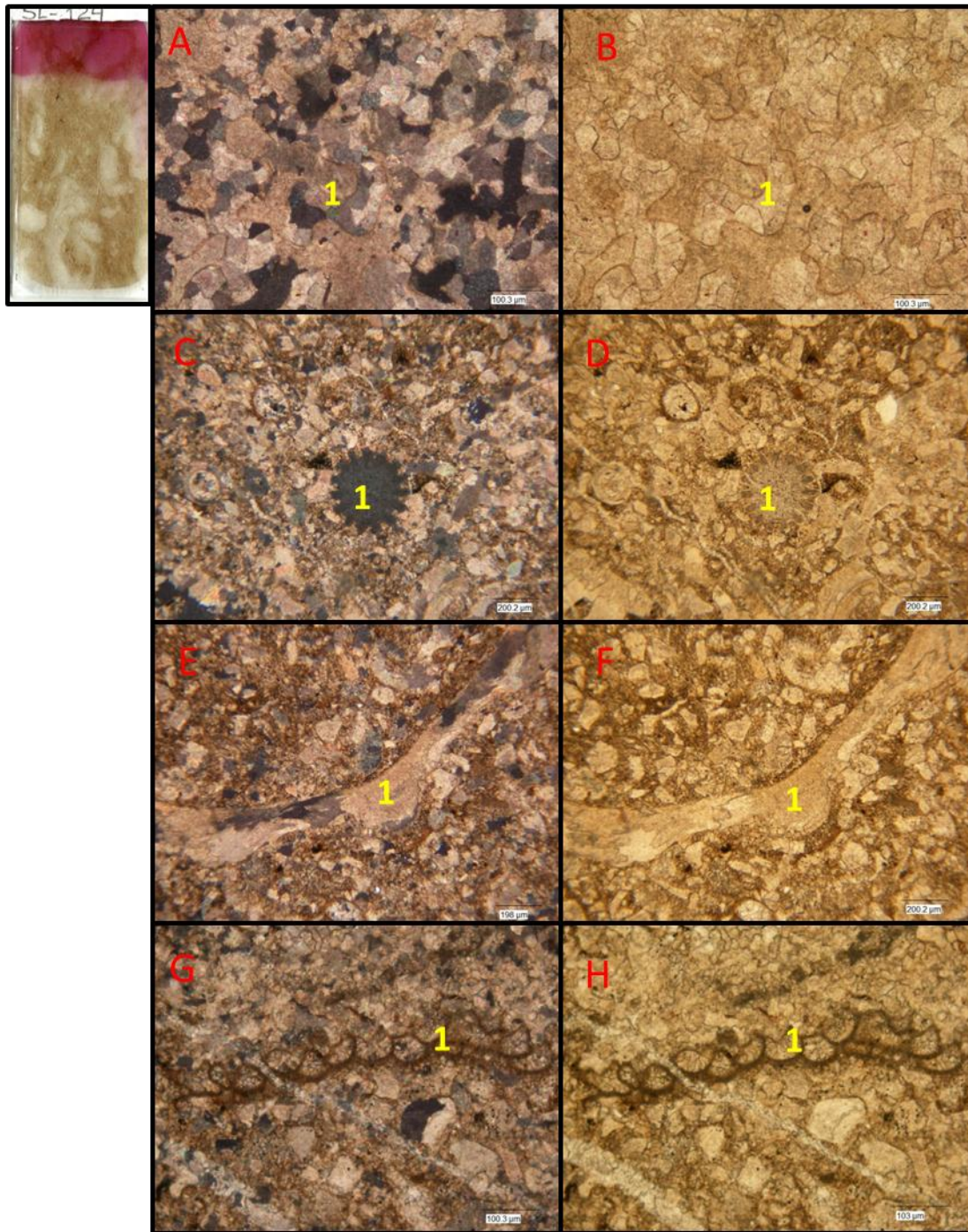
**A** (nc) y **B** (np) **1** Fragmento de alga, **2** Porosidad por disolución, **3** Silicificación (10x).

**C** (nc) y **D** (np) **1** Equinido, **2** Granos de Cuarzo (10x).

**E** (nc) y **F** (np) **1** Fragmento de Molusco fracturado con óxido de hierro (10x).

**G** (nc) y **H** (np) **1** Ostrácodo oxidado, **2** Micrita con limonita (10x).





**Figura 52.** Petrografía SL-124.

A (nc) y B (np) 1 *Diploria* sp. (10x).

C (nc) y D (np) 1 Equinido (4x).

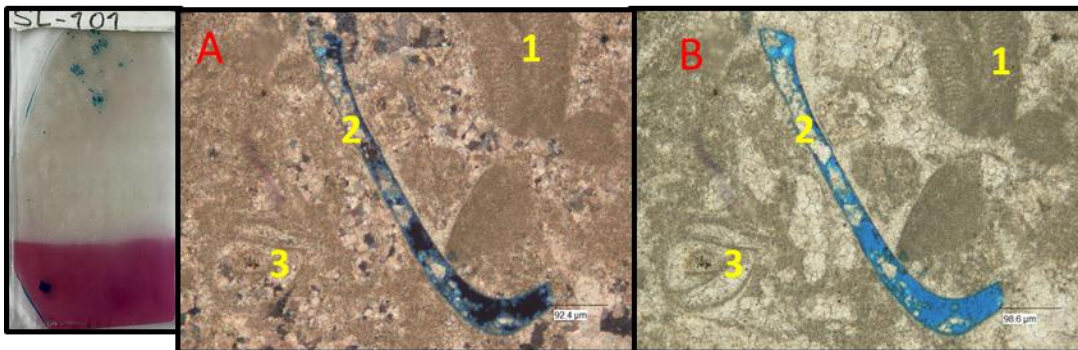
E (nc) y F (np) 1 Fragmento de Braquiópodo con inversión heteroaxial (4x).

G (nc) y H (np) 1 Fragmento de Briozoa (10x).

#### 4.2.7. FACIES BRECHA:

Las brechas se describen como una roca formada por fragmentos angulosos; dicha angulosidad significa una cantidad mínima de transporte, razón por la cual la fuente está cercana y puede estar asociada a arrecifes de coral, fósil y moderno. Los depósitos de brechas pueden formarse por la meteorización mecánica en la cara de los acantilados en cuya base se forman los taludes o depósitos de deyección; también pueden ser depositados por ríos de flujo esporádico en regiones áridas. Las brechas son útiles en construcción, revestimiento y decoración.

Representada por la muestra SL-101 (Fig. 53), la cual está constituida por un 20% de aloquímicos como fragmentos algas rojas *Lithophyllum* sp., foraminíferos como la *Spiroloculina* sp., sorítidos, bivalvos, ooides y ostrácodos.



**Figura 53.** Petrografía SL-101.

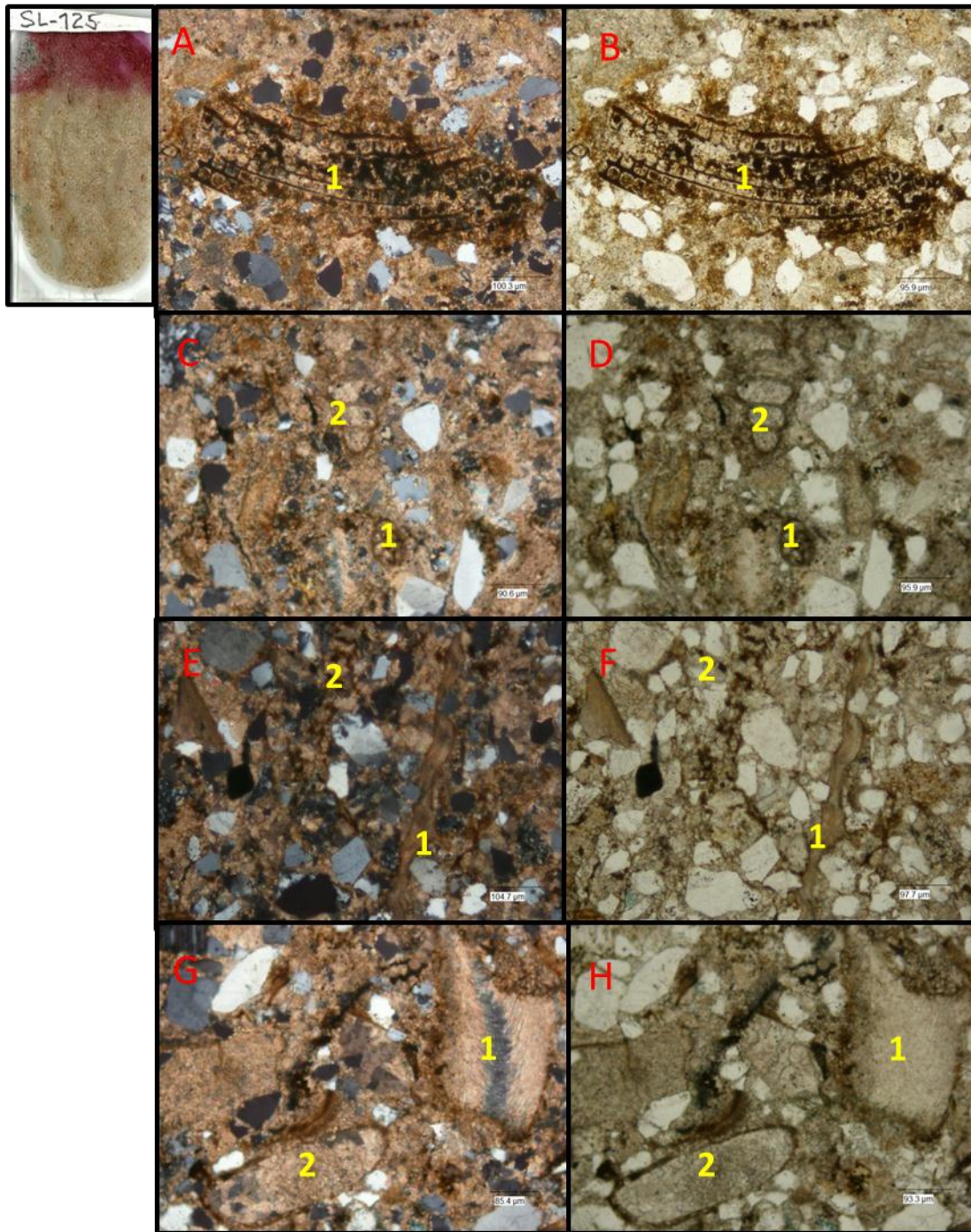
A (nc) y B (np) 1 Fragmento de alga micritizada, 2 Porosidad por disolución, 3 *Spiroloculina* sp. (10x).

#### 4.2.8. FACIES CALCARENITA:

La calcarenita (GRABAU, 1904) es un término general empleado para designar rocas carbonáticas de grano de tamaño de arena (diámetro 1/16 a 2 mm) depositadas mecánicamente e integradas con 50 por ciento o más de detrito carbonático según PETTIJOHN (1963).

Está representada por la muestra SL-125 (Fig. 54), la cual está constituida principalmente por un 30% de componentes siliciclásticos conformados por cuarzo monocristalino y policristalino metamórficos, algunas plagioclasas y fragmentos de roca del tipo sedimentario, un 20% está comprendido por componentes aloquímicos los cuales en orden de abundancia se presentan de la siguiente manera: algas rojas, foraminíferos del tipo *Heterostegina* sp., y uniseriales en general, equinidos, fragmentos de bivalvos y braquiópodos. Se observa gran cantidad de limonita en el lodo carbonático.





**Figura 54.** Petrografía SL-125.

A (nc) y B (np) 1 *Heterostegina* sp. (10x).

C (nc) y D (np) 1 *Rotalia*, 2 Foraminífero Uniserial (10x).

E (nc) y F (np) 1 Fragmento de Molusco con inversión Homoaxial, 2 Siliciclástico (10x).

G (nc) y H (np) 1 Fragmento de Molusco con inversión Homoaxial, 2 Ostrácodo (10x).

### 4.3. DISCUSIÓN PETROGRÁFICA

A continuación se desarrollara el estudio cualitativo de cada una de las 22 muestras estudiadas. Se presenta la discusión petrográfica en dos apartados, dentro de cada uno se discuten los datos obtenido de cada facies, sus características petrográficas y mineralógicas, así como también sus implicaciones sedimentológicas y diagenéticas, explicados así:

#### 4.3.1. Cambios mineralógicos y texturales

##### 4.3.1.1. Matriz

La micrita puede tener varios orígenes relacionados con parámetros biológicos, químicos y físicos. En los arrecifes se puede derivar de la disgregación de fragmentos de moluscos, corales ramosos, briozoarios, braquiópodos, entre otros; de la actividad fotosintética de las algas, las cuales extraen el CO<sub>2</sub> y expelen oxígeno aumentando el pH y promoviendo la precipitación de aragonito y la calcita magnesiana.

El origen de la micrita sigue siendo un problema importante en sedimentología de carbonatos. Como otros componentes de las calizas, la micrita es poligenética por lo que después de la diagénesis es generalmente imposible comprobar su origen. (TUCKER ET AL., 2001)

La mineralogía inicial de la micrita es de calcita con alto contenido de magnesio o aragonito y la mineralogía post-depositacional de la misma es de bajo contenido de magnesio.

Mientras mayor sea el porcentaje de micrita, indicará un ambiente de aguas más tranquilas durante su deposición; mientras menor sea el porcentaje de micrita y mayor el de aloquímicos esto indicará un ambiente de mayor energía. La muestra SL-128, la cual es un grainstone con abundancia de foraminíferos béticos del género *Heterostegina* sp., por su parte presenta un 60% de aloquímicos donde la micrita no

actúa como soporte, dando un ambiente de mayor energía mientras la muestra SL-105 que es un arrecife, está siendo soportada por micrita con un 60%.

#### 4.3.1.2. Cemento

Los cementos encontrados en las secciones finas estudiadas fueron:

Cemento tipo “Drusy”: se caracteriza por tener un hábito anhedral a subhedral o fibroso, encontrándose localizado en fragmentos de coral tipo *Diploria* sp.

Cemento isópaco: se observa en la muestra SL-108 bordeando las superficies de coral y éste se caracteriza por formar cristales de hábito fibroso de fino a medio (Fig. 55.1).

Cemento equigranular: se observa dentro del coral formando cristales de calcita que varían entre 50 y 100 micras, con contornos irregulares y de hábito anhedral, es decir, mosaicos isométricos, además algunos cristales están maclados y otros no (Fig. 55.2).

Estos tipos de cemento nos indican que nos ubican en ambientes diagenéticos de zonas freáticas y vadosas.

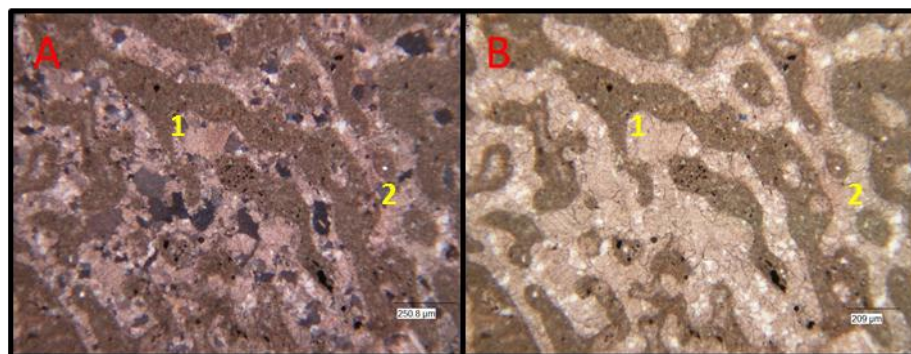


Figura 55. Cemento A (nc) y B (np) 1 Isópaco, 2 Equigranular petrografía SL-108 (4x)

#### 4.3.1.3. Partículas esqueléticas

En las muestras estudiadas pertenecientes a las Formación San Luis hay ciertos organismos que no pudieron ser reconocidas debido a que los mismos ya han sufrido

una serie de transformaciones como la destrucción y la redistribución física, química y biológica, lo cual dificulta su reconocimiento.

La identificación correcta de los tipos de granos esqueléticos que ocurren en una roca carbonática es importante para su interpretación ambiental. Además, el tipo de preservación considerado en granos biogénicos varía de phylum a phylum, y a su vez dentro de cada phylum. Muchas partículas biogénicas son estructuras tridimensionales complejas y su aspecto en secciones finas de dos dimensiones puede ser altamente variable dependiendo de la orientación de la sección. (TUCKER ET AL., 2001). Algunas secciones estudiadas tenían bioclastos que no pudieron ser identificados debido a no tener una forma y estructura característica debido al corte obtenido en la sección fina.

Los granos esqueléticos son identificados en base a su tamaño, forma, microestructura y su mineralogía original. Sin embargo, algunas conclusiones en la naturaleza de la mineralogía original y de la microestructura se deben basar en un solo concepto de la diagénesis que el fósil ha experimentado posteriormente. Según lo discutido arriba, la inestabilidad inherente de los sedimentos de carbonato durante la diagénesis es el resultado de la presencia de minerales inestables, tales como aragonito y calcita con alto-magnesio. Mucha de esta inestabilidad viene de los granos esqueléticos, los cuales en el caso de los carbonatos de ambientes someros se componen principalmente de minerales inestables. La naturaleza de los mecanismos del remplazo y de los productos de minerales esqueléticos inestables es compleja pero algunos cambios importantes pueden suceder en esta etapa, que son críticos para interpretar incluso características básicas en las rocas carbonáticas (TUCKER ET AL., 2001).

Según MÉNDEZ (2009), los corales mesozoicos y cenozoicos (scleractínidos) están formados por aragonito, provocando que se conserve muy mal la estructura interna cristalina y su identificación se basa en las placas internas, thecas, septos y disipimentos que en muchos no pudieron ser reconocidos.



Inicialmente, las rodofitas (algas rojas) encontradas en las muestras estudiadas, se constituyen de calcita con alto contenido de magnesio, pero pasan a tener una composición de calcita con bajo contenido de magnesio. Juegan un papel cementante muy importante en los arrecifes. Se dan en ambientes con alta energía. Si la colonia incrusta un objeto, hablamos de rodolitos (ARCHE, 2010).

Así, todos los organismos, que fueron aragoníticos en composición, se han considerado que si no está completa su estructura, por lo menos ha perdido su mineralogía detallada.

#### **4.3.1.4. Minerales autigénicos**

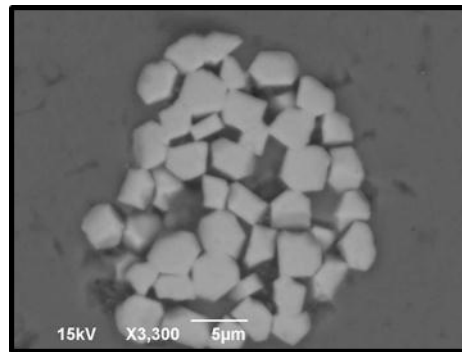
##### ➤ Calcita

La calcita es el mineral más abundante dentro de la sección, ésta se puede conseguir como precipitado rellenando fósiles, poros, algunas fracturas siendo éste generalmente del tipo espato.

##### ➤ Pirita

La pirita indica condiciones reductoras del medio diagenético en ambiente marino (ZAPATA, 1983). Presenta una ocurrencia puntual y fue identificado en el análisis petrográfico. La pirita ( $S_2Fe$ ) es el sulfuro más común y extendido en la roca sedimentaria, pudiendo ser de origen primario o secundario. Se presenta como granos esparcidos, los cuales después de la oxidación se convierten en limonita.

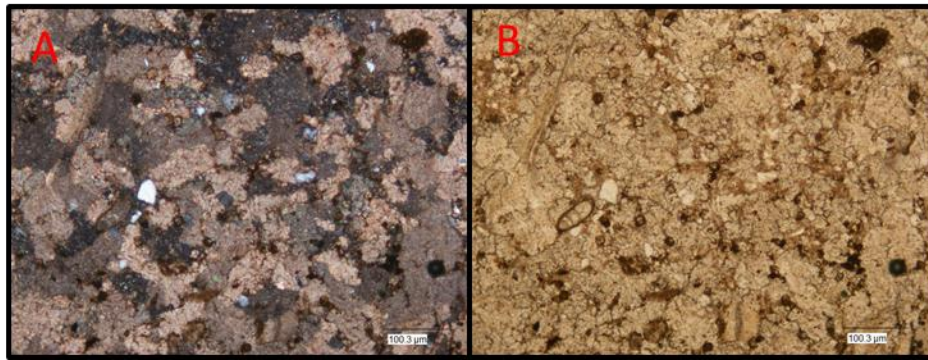
En la muestra SL-108 fue identificado por medio de la técnica de Microscopía Óptica de Barrido la presencia de cristales de pirita por su hábito cúbico característico, el cual es mostrado en la siguiente figura:



**Figura 56.** Cristales de Pirita, SEM, petrografía SL-108 (3,300x)

➤ Ankerita

La ankerita es una alteración de la dolomita, la cual ocurre cuando se produce sustitución isomorfa de magnesio por el hierro. En el estudio petrográfico se identificó este mineral en una sola muestra la cual fue la SL-123, siendo ésta reconocida por su hábito particular de dolomita y encontrándose bordeada por gran cantidad de óxido de hierro, pudiendo ser observada en la figura siguiente.



**Figura 57.** Ankerita **A** (nc) y **B** (np) petrografía SL-123 (10x)

#### 4.3.2. Procesos diagenéticos

La diagénesis se puede definir como todas aquellas transformaciones que sufren los sedimentos como consecuencia de la acción conjunta de procesos físicos, químicos y biológicos, desde el momento de su depositación hasta el comienzo del

metamorfismo o hasta que vuelven a ser expuestos a los efectos de la meteorización (ARCHE, 1992).

Las transformaciones que tienen lugar en la diagénesis son debidas a que las partículas sólidas del sedimento y los fluidos encerrados en sus poros tienden a mantenerse en equilibrio mediante reacciones controladas por parámetros físico-químicos (ARCHE, 1992).

Los procesos diagenéticos en sedimentos carbonáticos tienen gran importancia ya que debido a la movilización de los componentes carbonáticos que lo integran se pueden producir en la roca, cambios mineralógicos, geoquímicos, texturales y de litificación (compactación, cementación y recristalización). Dichos procesos están regidos principalmente por las características hidroquímicas de las aguas intersticiales y otros factores como: presión, CO<sub>2</sub>, pH, flujo de aguas intersticiales, tamaño cristalino y mineralogía entre otros (ARCHE, 1994).

A continuación se describirán los procesos orgánicos y físico-químicos ocurridos en la sección estudiada de la Formación San Luis.

#### **4.3.2.1. Procesos orgánicos**

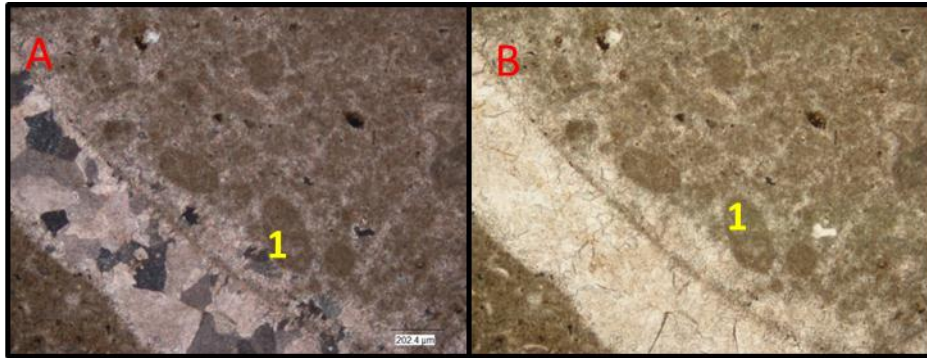
Son frecuentes en las etapas tempranas de la diagénesis, y pueden ser micritización, bioturbación, horadación, y agregados entre otros. Los observados en las muestras fueron:

➤ **Agregados**

Estos son principalmente los pellets, originados bajo condiciones de poca compactación y depositación lenta. Pueden estar rodeadas por algas o foraminíferos incrustantes, los cuales les cementan originando una estructura solida. En ambientes antiguos como es el caso, es difícil verlos, debido a la deformación que pudo haber por la compactación durante la diagénesis.

En la figura 58 presentada a continuación, perteneciente a la sección SL-126 se observan estos pellets los cuales fueron depositados junto al lodo carbonático dentro

de los corales que se encuentran en posición de crecimientos, los agregados presentan un tamaño promedio de 2 mm.



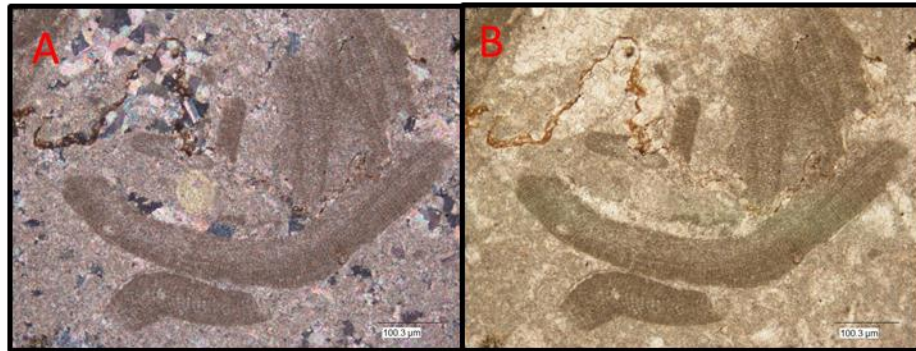
**Figura 58.** Pellets (1) **G** (nc) y **H** (np) SL-126 (10x).

#### ➤ Micritización

Se produce debido a la alteración que sufren los bioclastos o partículas esqueléticas, pudiendo formar envoltorios micríticos o modificándolos por completo.

Según ARCHE (1992) en un principio un organismo genera una perforación que luego queda libre cuando éste muere, posteriormente se rellena por cemento micrítico de aragonito o calcita alta en magnesio y al ocurrir este evento en repetidas ocasiones producirá el envoltorio micrítico alrededor del grano.

En la mayoría de las muestras estudiadas se evidencia cómo las algas encontradas se encuentran micritizadas completamente por lo cual se habla que el bioclasto está peletizado, y muestra coloraciones pardas rojizas a pardo oscuras. A su vez, algunos corales presentan envoltorios micríticos dentro de sus cavidades. Estos ocurren desde que comienza la depositación de los sedimentos, por lo tanto es típico de etapas diagenéticas tempranas. En la sección SL-119 observamos como los fragmentos de algas se encuentran completamente ya micritizadas (Fig. 59).



**Figura 59.** Micritización **A** (nc) y **B** (np) petrografía SL-119 (10x)

➤ Bioturbación

Los organismos excavadores o aquellos que se alimentan de partículas calcáreas, como los moluscos, equinodermos, etc, tienden a modificar y mezclar los sedimentos; para ello el ambiente de ser de baja energía y es considerado un proceso destructivo dentro de los ambientes arrecifales.

#### 4.3.2.2. Procesos físico-químicos

➤ Cementación

Otro componente importante en las muestra es la esparita (calcita cristalina), el cual es un componente textural importante, además es de origen físico-químico precipitado por sobresaturación de  $\text{CaCO}_3$  en las aguas que se encuentran en los espacios porosos. La principal mineralogía de los cementos es calcita con alto contenido de magnesio o aragonito en aguas marinas, calcita de bajo contenido de magnesio en aguas meteóricas y calcita de bajo contenido de magnesio o dolomita en aguas profundas.

Las 22 muestras estudiadas presentan abundantes cementos equigranulares, drusa e isópacos compuesto de calcita rica en hierro observándose en forma microespato y espato.

La cementación tipo drusa está asociada a la porosidad del tipo vuga o caverna producto de la pérdida de fluidos durante la compactación Se aprecia cemento

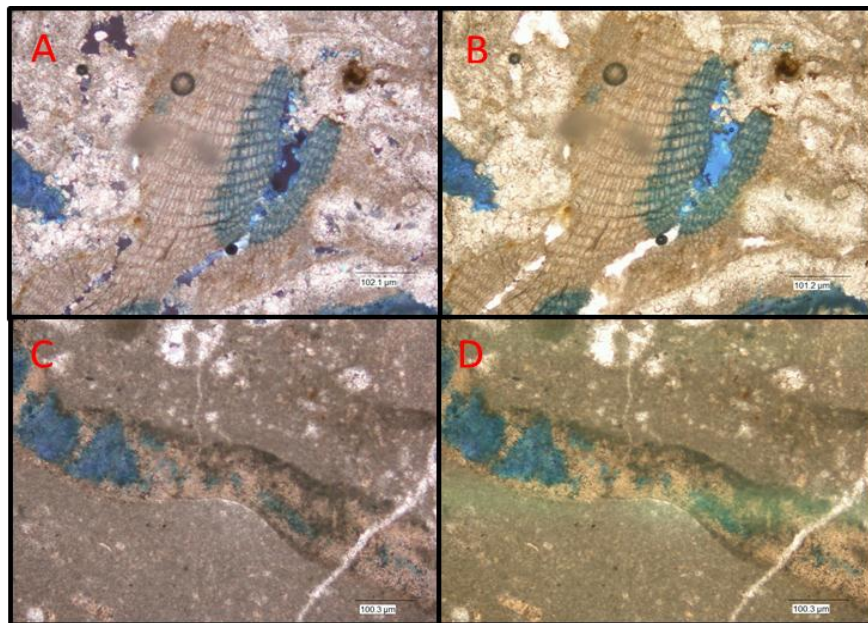
equigranular producto posiblemente de precipitación directa o de neomorfismo donde ocupa el lugar dejado por el material original de la mayoría de las conchas.

➤ Disolución

La disolución es un proceso en el cual los carbonatos u otros minerales son disueltos selectivamente (MÉNDEZ, 2009).

Este proceso es el responsable de la porosidad secundaria, ocurriendo principalmente disolución de la matriz y partículas esqueléticas. La disolución está condicionada por la composición inicial donde minerales como el aragonito o calcita con alto magnesio, tienden a desaparecer.

Los componentes que suelen ser disueltos con mayor facilidad según lo observado en el estudio petrográfico son los fragmentos de moluscos y las algas coralinas principalmente, ambos casos son evidenciados en las muestras SL-113 y SL-127 mostrados en la figura siguiente.



**Figura 60.** Disolución. **A** (nc) y **B** (np) en algas coralinas, petrografía SL-127 (10x).  
**C** (nc) y **D** (np) en fragmento de molusco, petrografía SL-113 (10x).



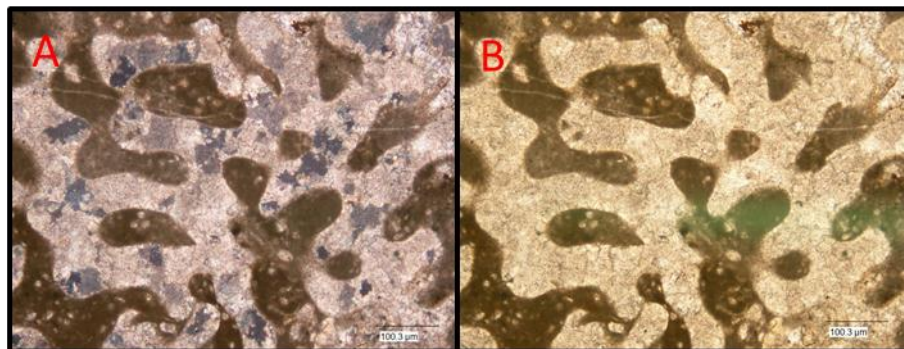
➤ Neomorfismo

Todas las transformaciones dentro de un mineral o un polimorfo de ese mineral, bien sea inversión, recristalización, o que los nuevos cristales son mas grandes o pequeños, o simplemente difieran en la forma. Los cristales viejos son reemplazados por nuevos del mismo mineral (MÉNDEZ, 2009).

La inversión ocurre de un polimorfo de un mineral a otro, permaneciendo la composición química general constante, ésta puede ser homoaxial cuando se preserva la estructura fibrosa del aragonito en los organismos o heteroaxial cuando su estructura cambia a cristales de calcita.

En la inversión a calcita heteroaxial no hay relación óptica ni textural entre los cristales de aragonito y calcita, se presenta durante las primera etapas de la diagénesis y ocurre por la variación de posición de los iones en la película cristalina sin presencia de líquido ni largo transporte de iones, y en la homoaxial el aragonito fibroso pasa a calcita fibrosa de la misma orientación.

En las 22 muestras estudiadas pertenecientes a la Formación San Luis, observamos que el tipo de inversión predominante es del tipo heteroaxial, actuando éstas principalmente sobre los fragmentos de foraminíferos, moluscos y braquiópodos, transformando la estructura de los cristales de aragonito a calcita como observamos en la figura 61.



**Figura 61.** Inversión Heteroaxial **A** (nc) y **B** (np) petrografía SL-133 (10x)



➤ Reemplazamiento

El reemplazamiento es producto de la disolución simultánea de un mineral existente y la precipitación de uno nuevo, y puede tener influencia variable sobre la porosidad, tanto aumentando como disminuyendo.

Son varios los procesos de reemplazamiento que pueden ocurrir durante la diagénesis de una roca carbonática, ya sea: glauconitización, dolomitización, fosfatización y silicificación, entre otras (ARCHE, 1992).

Son observados en las partículas esqueléticas y la matriz, donde la mineralogía inicial de sílice fue reemplazada por la calcita. También hubo procesos de fosfatización, silicificación y piritización.

➤ Piritización

Cuando la materia orgánica se descompone en un ambiente carente de oxígeno se produce ácido sulfhídrico, que reacciona con las sales de hierro del agua marina produciendo sulfuros de hierro, generalmente marcasita y pirita, que sustituyen a la materia de origen orgánico de las conchas y esqueletos.

Si la pirita se conserva inalterada los fósiles presentan un aspecto metálico, pero esto no sucede habitualmente sobre todo con los fosilizados en marcasita, suelen aparecer limonitizados, y se oxidan y destruyen rápidamente en contacto con la atmósfera.

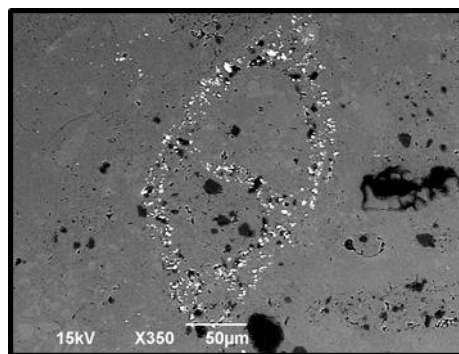
El proceso de piritización indica condiciones reductoras del medio diagenético en ambiente marino y se forma en una etapa temprana de la diagénesis. Hay que señalar que para la formación de sulfuro de hierro (pirita), se requiere la presencia de materia orgánica capaz de absorber el hierro en suspensión coloidal y precipitarlo posteriormente por reducción de la materia orgánica (ZAPATA, 1983). Si el agua presenta elementos químicos en solución como hierro ( $Fe^{+2}$ ) y azufre (S) la pirita tiende a precipitar.

En las secciones SL-102, SL-108, SL-110, SL123 y SL-133 se observó este proceso encontrándose algunas veces como parches precipitando en la matriz carbonática y en otros casos recubriendo por completo o haciendo envoltorios en algunos organismos como los foraminíferos.

La muestra SL-108 fue analizada con la técnica de Microscopía Óptica de Barrido (SEM) con la cual se pudo identificar y observar que algunos organismos, en este caso un foraminífero, está siendo bordeado por cristales de pirita como muestran las figuras 62 y 63.



**Figura 62.** Piritización 1 petrografía SL-108

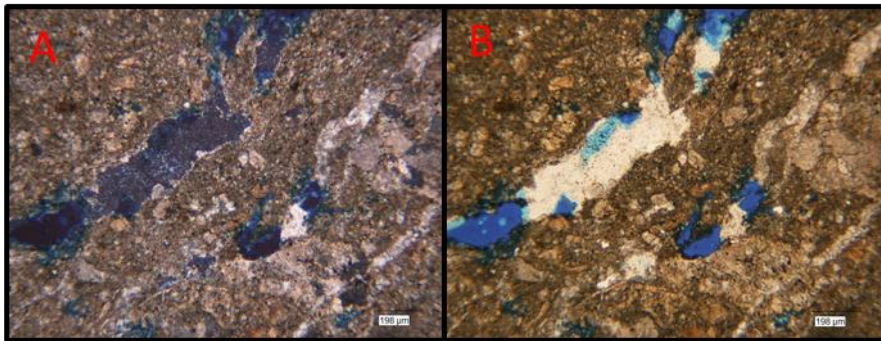


**Figura 63.** Piritización, SEM, muestra SL-108

#### ➤ Silicificación

La presencia de silicificación indica condiciones reductoras de Eh entre (0 y -0,3) (KRUMBEIN Y GARRELS, 1952) y condiciones de Ph bajas entre (7,0 y 7,5), lo cual favorece a la formación de dichos minerales. Según ARCHE (1992), este proceso es favorecido por pH, temperaturas bajas y aguas sobresaturadas en sílice. El proceso de

silicificación, está estrechamente relacionado con la presencia de materia orgánica, ya que ésta puede servir como absorbente para separar sílice de una solución o suspensión coloidal, por tal motivo la silicificación debe ocurrir tempranamente antes de que la materia orgánica sea removida por reducción en el avance del soterramiento. MCLLEATH & MORROW (1990) en SOLORZANO (2005) proponen que soluciones supersaturadas en sílice pueden reemplazar carbonatos, con condiciones de presión y temperaturas bajas en presencia de CO<sub>2</sub>. La silicificación es básicamente el reemplazo de Ca por Si. En la sección SL-132 observamos este proceso actuando en las zonas donde se encuentra disolución de la matriz y de algunas partículas esqueléticas, donde finalmente el sílice está siendo atacado de nuevo por procesos de disolución, como se observa en la siguiente figura donde se ve de nuevo zonas porosas.



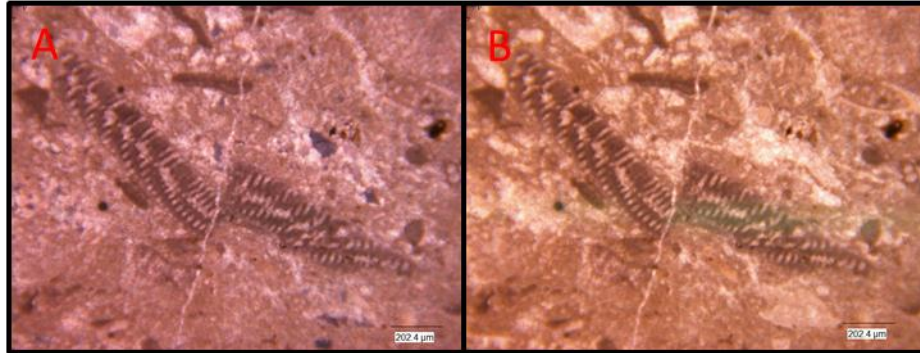
**Figura 64.** Silicificación **A** (nc) y **B** (np) petrografía SL-132 (4x)

➤ Compactación

Al aplicar presión debido al peso del enterramiento los granos se fracturan y la porosidad disminuye debido a la compresión. Los procesos físicos de compactación se desarrollan durante todos los estados de ocurrencia de la diagénesis, generando la pérdida de fluidos y una reducción del espesor, donde cada vez el contacto entre los granos es mayor.

Este efecto de compactación en la sección estudiada es evidenciada por el fracturamiento producido en algunos fragmentos fósiles como moluscos, sorítidos y

otros, como consecuencia de la presión-solución, la cual se puede observar en la siguiente figura perteneciente a la muestra SL-119 donde observamos como el fragmento de soritido esta siendo fracturada por la gran compactación en la zona.

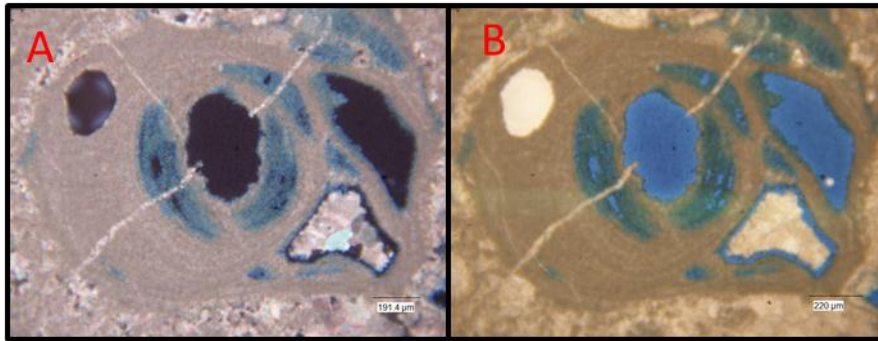


**Figura 65.** Compactación por fracturamiento **A** (nc) y **B** (np) petrografía SL-119 (4x)

#### 4.3.2.3. Porosidad

En las muestras estudiadas la porosidad secundaria es la más observada, debido a que se evidenció disolución y fracturamiento de los fósiles. También se encontró porosidad desarrollada a favor de superficies estilolíticas y porosidad primaria interpartícula parcialmente ocupada por cemento de calcita observada en la muestra SL-127.

La porosidad en la matriz es creada principalmente por efectos de disolución puntual en la micrita. La porosidad móldica encontrada en las muestras es característica de ambientes diagenéticos superficiales (zona vadosa y freática), donde se desarrolla por la disolución de las partículas esqueléticas cuya mineralogía es principalmente de aragonito, estos poros reproducen la morfología del componente original como se observa en la muestra SL-101, donde el alga se encuentra en disolución (Fig. 66)



**Figura 66.** Porosidad por disolución **A** (nc) y **B** (np) petrografía SL-101 (10x)

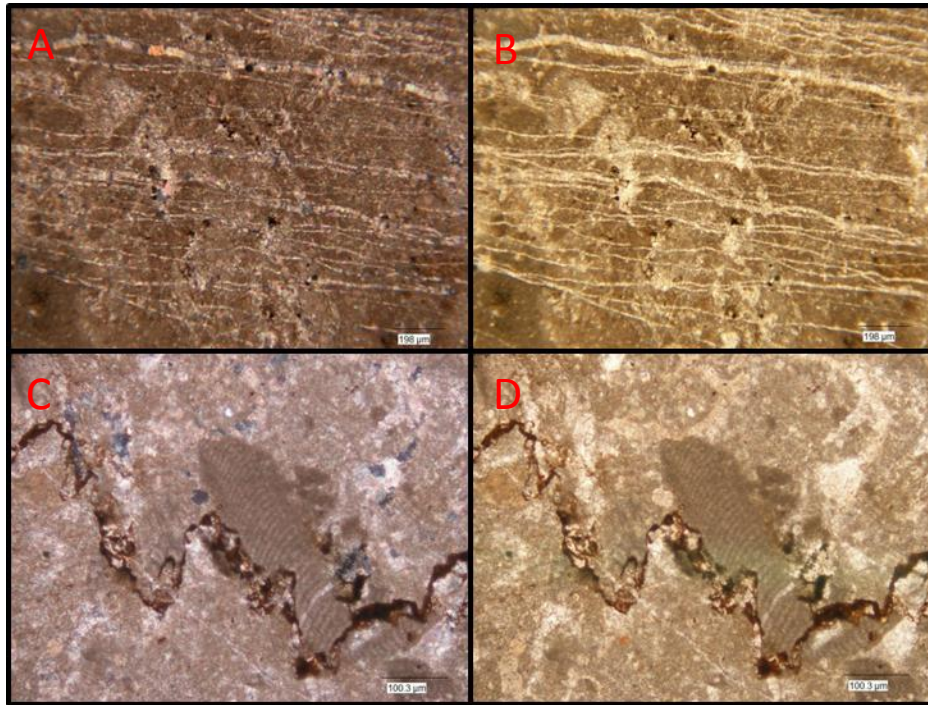
#### 4.3.2.4. Fracturas y Estilolitas

Las estilolitas y superficies de disolución constituyen elementos muy comunes en las rocas sedimentarias. En ambos casos estas superficies se desarrollan perpendicularmente a la dirección de esfuerzo principal, el cual puede ser tanto debido a la presión litostática o a una etapa de epidiagénesis por basculamiento. Debido a que las estilolitas y superficies de disolución son zonas preferenciales de disolución dentro del sedimento, algunos pequeños fragmentos o los minerales menos solubles tienden a acumularse a lo largo de estas superficies.

En la mayoría de las muestras analizadas se observaron diversas fracturas en partículas esqueléticas las cuales fueron rellenas por material carbonático, óxido de hierro y en la muestra SL-132 se observó precipitando material siliciclástico.

Las estilolitas (Fig. 67), estuvieron presentes en las muestras SL-119 siendo éstas de baja y alta amplitud y continua a lo largo de la sección rellena por óxido de hierro, en el caso de la sección SL-122 se presentan varias estilolitas con un solo patrón siendo éstas paralelas entre sí y de baja amplitud, son continuas en longitud y están rellenas por esparita.



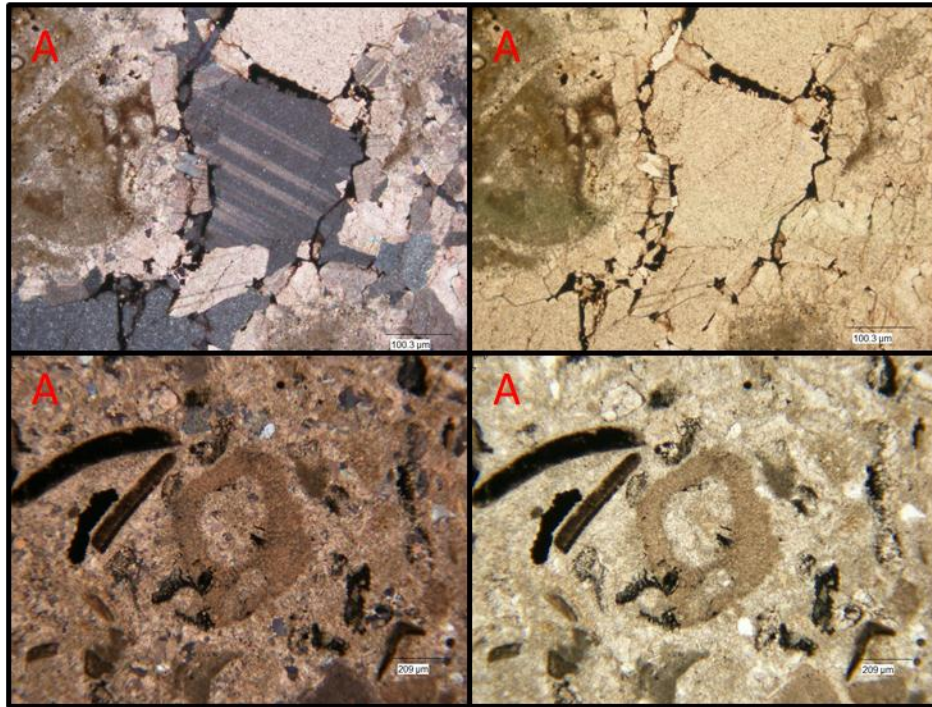


**Figura 67.** . **A** (nc) y **B** (np) Fracturas rellena de esparita, petrografía SL-122 (4x).  
**C** (nc) y **D** (np) Estilolita rellena de óxido de hierro, petrografía SL-119 (10x).

#### 4.3.2.5. Materia Orgánica

La materia orgánica fue observada en las muestras SL-102, SL-108, SL-110, SL-123 y SL-133 presentándose la mayoría de las veces junto a la pirita. La muestra SL-128 en particular presenta esta en las zonas de mayor porosidad mientras que en la SL-108 se encontró dentro de las algas y algunas partículas esqueléticas.





**Figura 68.** Materia Orgánica.

**A** (nc) y **B** (np) en fracturas, petrografía SL-102 (10x).

**C** (nc) y **D** (np) en partículas esqueléticas y algas, petrografía SL-108 (4x).

#### 4.4. CONCLUSIONES

La presencia de foraminíferos bentónicos como: *Heterostegina* sp., *Nummulites* sp. y *Miliólidos*; así como algas rojas; equinidos; moluscos y corales, nos indica un ambiente marino de aguas someras, tranquilas, de salinidad normal y fuerte luminosidad, que puede ser interpretada como una zona protegida por arrecifes indicando condiciones periarrecifales (detrás del arrecife).

Por la posición de crecimiento de los organismos como los corales y las algas, podemos ubicar la Formación San Luis en un ambiente detrás del arrecife, el cual engloba el talud exterior de la plataforma, el arrecife orgánico, plano arrecifal o eje intermedio de la plataforma y la laguna interna o plataforma interna abierta, correspondientes a los cinturones 4, 5, 6, y 7 de Wilson (1975) respectivamente como se representa en la figura 69, observando en ésta la abundancia de compuestos aloquímicos que conforman estas facies según el estudio realizado en este trabajo, y se explica a continuación:

➤ Cinturón 4

Zona de la plataforma donde se encuentran los sedimentos derivados de fragmentos depositados en la pendiente, en donde se observaron fragmentos de equinodermos, algas y foraminíferos, en la facies textural identificada como Brecha.

➤ Cinturón 5

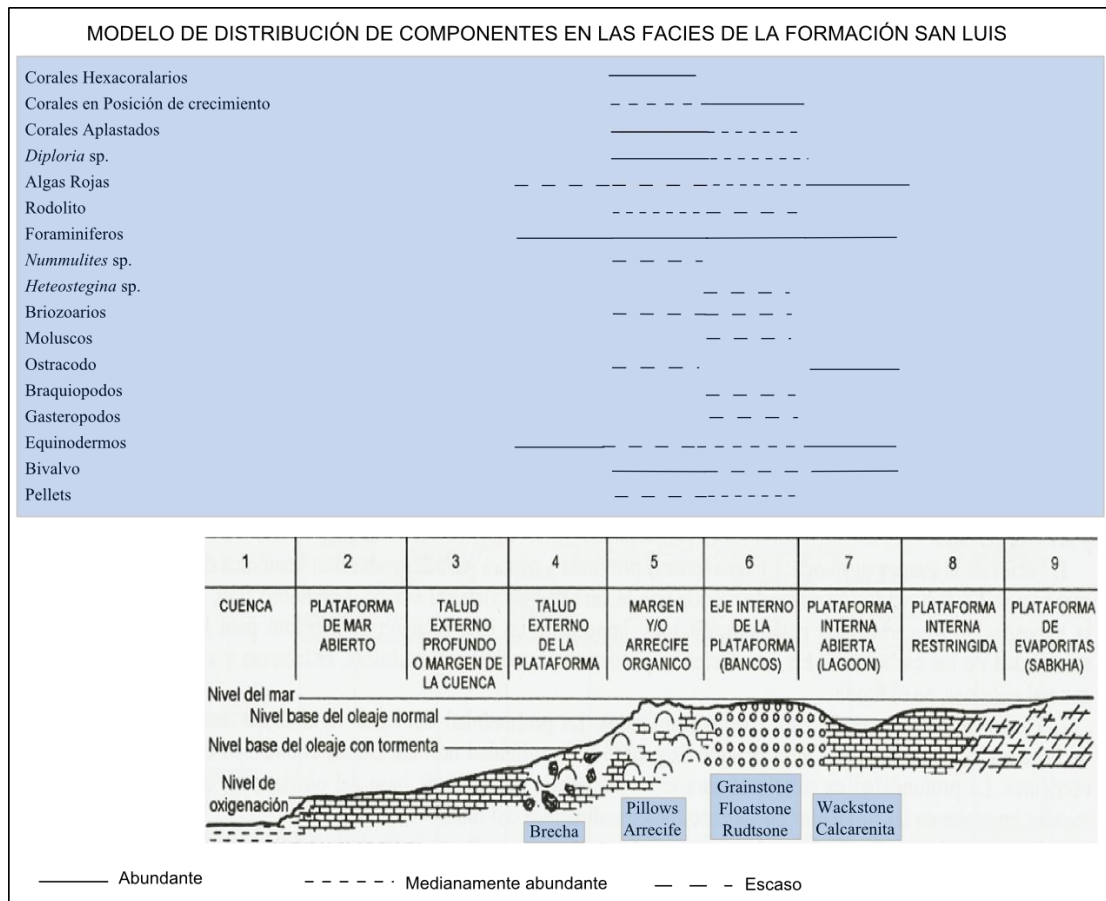
En la zona de arrecife que se extiende desde la cresta hasta las áreas de laguna, se desarrollan los arrecifes orgánicos, evidenciados por las colonias de hexacorarios hermatípicos (*Diploria* sp.) y algas coralinas incrustantes y cementantes como el *Lithothamnium* sp., también briozoarios, braquiópodos y foraminíferos bentónicos, en las facies clasificadas como “Pillows” o Framestone y Arrecifes o Bindstone.

➤ Cinturón 6

En el plano arrecifal o eje intermedio de la plataforma que se extiende desde la cresta hasta el área de laguna, se desarrollan corales de características ramosas (*Porites* sp.), algas coralinas, foraminíferos incrustantes, equinidos, etc. En esta zona se ubican las facies texturales de rudstone, grainstone, floatstone y packstone.

➤ Cinturón 7

En la zona de laguna interna o plataforma interna abierta son ambientes de poco oleaje y baja energía donde predominan organismos como los moluscos, foraminíferos bénticos; desarrollándose facies texturales tipo mudstone y wackestone. El sedimento fino y lodo carbonático encontrado se deriva de la disgregación de algas y bioturbación de los organismos.



**Figura 69.** Modelo de distribución de componentes en las Facies de la Formación San Luis

En el levantamiento en campo se observaron secuencias estratificadas de areniscas, lutitas y limolitas intercaladas con calizas arrecifales de la Formación San Luis por lo cual se puede inferir que hubo un aporte de sistemas fluvio-deltaico proveniente de algún macizo rocoso positivo durante el Oligoceno Tardío- Mioceno Temprano. Además la interdigitación de la Formación San Luis con las formaciones Guarabal y Patiecitos indica que dichos elementos emergentes tuvieron varios pulsos de sedimentación de terrígenos.

Lo observado en la sección estudiada evidencia hacia el tope la disminución del espesor de las capas de caliza y el aumento del material clástico, lo cual puede explicarse por lo citado de DÍAZ DE GAMERO (1977), donde señala que la cordillera de Churuguara, el Alto de Dabajuro, y el Alto de Paraguaná - Coro eran elementos emergentes positivos que limitaban la cuenca durante el Oligoceno - Mioceno Temprano, y podría ser lo que genera la colmatación de la laguna interna o plataforma interna abierta detrás del arrecife de San Luis, debido posiblemente al aporte de material clástico acabando con el crecimiento arrecifal.

La diagénesis intermedia es evidenciada debido a la presencia de estilolitas de baja amplitud rellenas de calcita y de óxidos de hierro. También se observó microfracturas tanto en fragmentos fósiles, matriz y el cemento; así como también el neomorfismo presente en la mayoría de las secciones estudiadas siendo del tipo heteroaxial, observada en los corales, braquiópodos, moluscos y otros.

## CAPITULO V

### ANÁLISIS GEOQUÍMICO

#### 5.1. Generalidades

Con el propósito de determinar la naturaleza química de las diferentes unidades litológicas así como de los procesos geológicos que les afectan, se han seleccionado 22 muestras para analizar. Las muestras fueron seleccionadas en forma tal de tener un muestreo representativo de todas las facies observadas, tanto de las rocas que presentan poca o ninguna alteración como de aquellas que aparecen alteradas en el terreno.

Los cambios mineralógicos ocurridos durante la diagénesis de los carbonatos involucran a una serie de procesos de disolución–precipitación durante los cuales se desencadenan reacciones entre el sedimento/roca sedimentaria y la fase fluida. Esta última puede ser agua de mar, incorporada durante los primeros estadios de diagénesis, agua de formación asociada a la diagénesis de soterramiento o agua meteórica introducida generalmente en un estadio diagenético posterior en la proximidad de la superficie. La magnitud de dichos cambios puede deberse a innumerables causas, la más importante está dada por la diferencia composicional entre el agua y la roca y la duración de la reacción.

Dada la complejidad de procesos acontecidos durante la precipitación del carbonato y la fuerte dependencia de las facies, las variaciones geoquímicas en una misma sucesión podrían producirse por procesos diagenéticos similares, los cuales afectan a las rocas de manera diferente debido a la heterogeneidad de su composición.

Las variaciones de algunos elementos son considerados indicadores muy sensibles ante los cambios ocurridos durante la diagénesis de carbonatos, los que deben ser acompañados con estudios petrográficos.

A continuación se presentan los resultados del análisis estadístico de todos los datos obtenidos:



## 5.2. Análisis univariante de los datos geoquímicos

Los estudios de geoquímica sedimentaria son importantes para establecer la composición y distribución de los elementos químicos en las rocas sedimentarias. Las relaciones y el comportamiento geoquímico de los elementos aportan información acerca de las condiciones de depositación y la composición de la fuente, pero siempre deben integrarse con otras herramientas petrológicas.

A continuación se presenta los análisis estadísticos realizados a las 22 muestras estudiadas por las técnicas de absorción atómica determinando los compuestos MgO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, MnO y los elementos Ni y Zn; y la técnica de fluorescencia de rayos X donde se obtuvieron los compuestos Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub> y el elemento V.

### 5.2.1. Diagramas de dispersión

Se muestra a continuación la matriz de correlación para los compuestos y elementos obtenidos mediante las técnicas de Absorción atómica y Fluorescencia de rayos X.

**Tabla 2.** Coeficiente de correlación de las variables evaluadas

Variables (%)	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	V	Zn	Ni	SiO <sub>2</sub>
CaO	1											
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-0,300	1										
MnO	-0,825	0,432	1									
MgO	-0,135	0,962	0,236	1								
Na <sub>2</sub> O	-0,248	0,891	0,325	0,883	1							
K <sub>2</sub> O	-0,469	0,944	0,525	0,894	0,866	1						
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-0,524	0,066	0,236	0,045	0,141	0,230	1					
TiO <sub>2</sub>	-0,529	-0,054	0,247	-0,113	0,141	0,119	0,665	1				
V	-0,340	-0,064	0,007	-0,043	0,109	0,125	0,629	0,814	1			
Zn	-0,485	0,490	0,502	0,406	0,325	0,569	0,263	-0,102	0,072	1		
Ni	0,217	0,313	-0,416	0,464	0,253	0,277	0,143	-0,141	0,071	0,165	1	
SiO <sub>2</sub>	-0,968	0,240	0,748	0,084	0,270	0,431	0,625	0,668	0,443	0,376	-0,210	1

La composición de las rocas, el aporte terrígeno y/o biogénico puede ser responsable del enriquecimiento de algunos elementos mayoritarios. En la tabla 2 se muestra que las asociaciones del  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  con los compuestos:  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  y  $\text{K}_2\text{O}$  poseen gran correlación, lo cual podrían responder a las condiciones de oxidación del medio de sedimentación inicial.

La concentración de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  es útil como indicador del flujo detrítico, y se vincula con el  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (0,066) y  $\text{MnO}$  (0,236). El origen del  $\text{Al}_2\text{O}_3$  se relaciona también con el  $\text{SiO}_2$  (0,625),  $\text{K}_2\text{O}$  (0,230),  $\text{TiO}_2$  (0,665) y su correspondencia se debe principalmente a aportes de origen terrígeno.

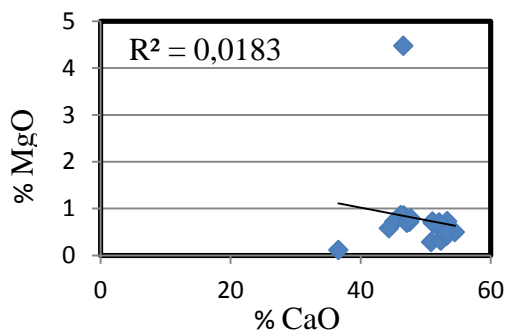
Los compuestos  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO}$  presentan conductas semejantes, y tienen un coeficiente negativo con respecto al  $\text{CaO}$ , y positivo entre el  $\text{MgO-K}_2\text{O}$  (0,894)  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-K}_2\text{O}$  (0,944) indicando dichos valores que estos elementos están agrupados en los minerales arcillosos. Existe una gran correlación entre  $\text{MgO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  Y  $\text{K}_2\text{O}$  y se relacionaría al proceso de glauconitización identificado en sección fina y a los minerales autigénicos y detríticos como los minerales de arcilla, relacionados con la calcita.

El coeficiente de correlación entre  $\text{Na}_2\text{O-CaO}$  es negativo y bajo, esta asociación inversamente proporcional se deriva probablemente de las plagioclasas y feldespatos, observándose en sección fina. Sin embargo el  $\text{Na}_2\text{O}$  tiene una afinidad positiva con los compuestos:  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  y  $\text{TiO}_2$ , lo cual indicaría que se encuentran posiblemente en los minerales hidrolizados (se forman por descomposición química de los silicatos preexistentes como los minerales de arcilla) autigénicos.

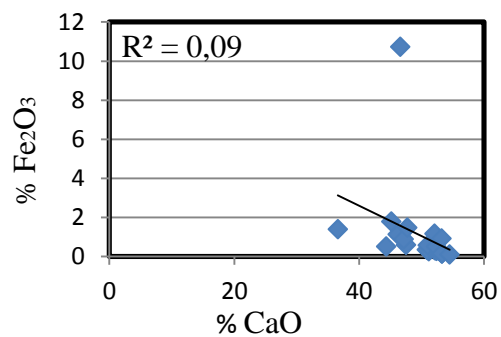
Además se observa la conducta del  $\text{CaO}$ , parcialmente opuesta a la del  $\text{MgO}$ , y en parte coincidente con la del  $\text{MnO}$ . El coeficiente de correlación  $\text{MnO-CaO}$  indica que parte del mismo se encuentra en la red cristalina de la calcita.

Los gráficos de dispersión permiten observar si existe algún tipo de relación lineal significativa entre las variables químicas estudiadas. RODRÍGUEZ ET AL. (2000) en

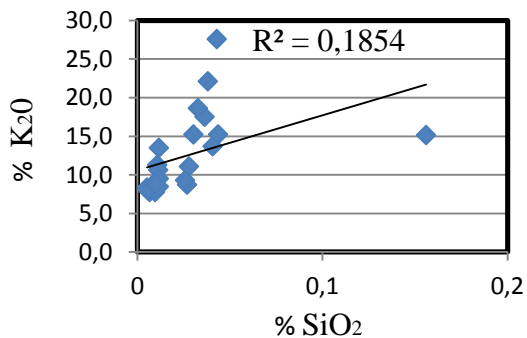
LEAL Y RIVERO (2004), mencionan que en análisis de los diagramas de dispersión se presentan dos casos principales: la presencia de correlación lineal significativa entre dos variables, bien sea positiva o negativa, o muy baja entre dos variables. A continuación se muestran se observan los gráficos de dispersión de las combinación de elementos que tienen o dan información relevante para discriminar o soportar la distribución de facies, los demás se encuentran en el apéndice 4.



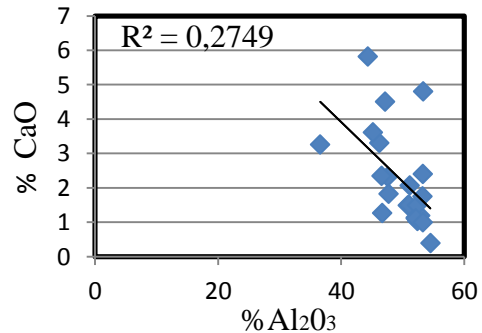
**Figura 70.** Relación CaO vs MgO



**Figura 71.** Relación CaO vs Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>



**Figura 72.** Relación SiO<sub>2</sub> vs K<sub>2</sub>O



**Figura 73.** Relación Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> vs CaO

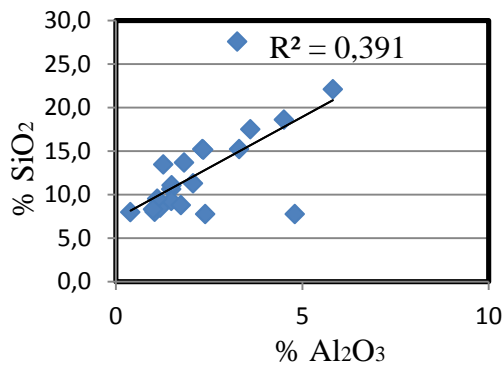


Figura 74. Relación  $\text{Al}_2\text{O}_3$  vs  $\text{SiO}_2$

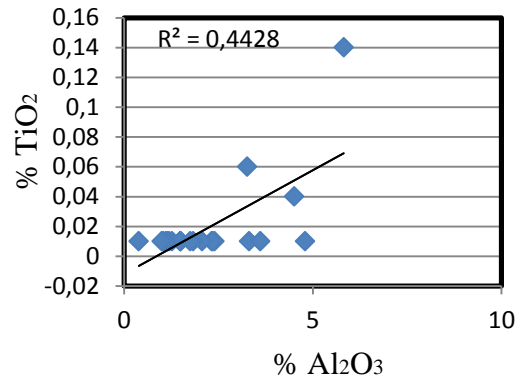


Figura 75. Relación  $\text{Al}_2\text{O}_3$  vs  $\text{TiO}_2$

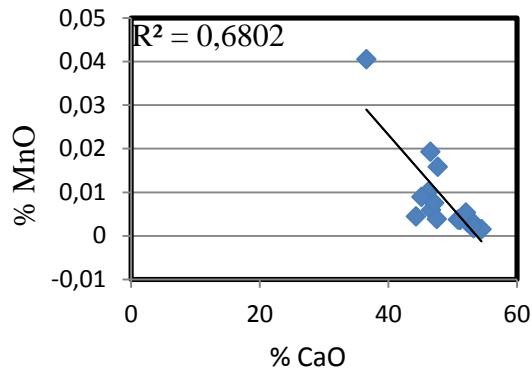


Figura 76. Relación  $\text{CaO}$  vs  $\text{MnO}$

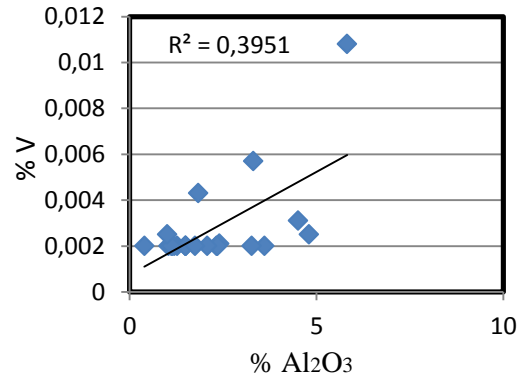


Figura 77. Relación  $\text{Al}_2\text{O}_3$  vs  $\text{V}$

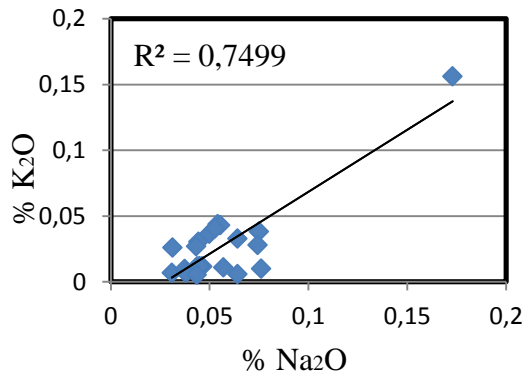


Figura 78. Relación  $\text{Na}_2\text{O}$  vs  $\text{K}_2\text{O}$

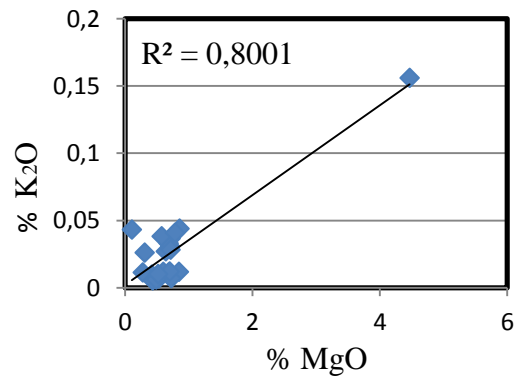
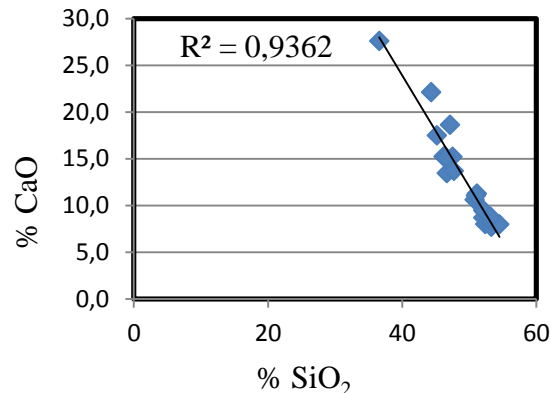


Figura 79. Relación  $\text{MgO}$  vs  $\text{K}_2\text{O}$



**Figura 80.** Relación SiO<sub>2</sub> vs CaO

Se muestra la correlación positiva directa entre: el K<sub>2</sub>O–Na<sub>2</sub>O, debido al material siliciclástico, evidenciado por la presencia de plagioclasas y feldespatos en las secciones finas, el MgO–K<sub>2</sub>O posiblemente asociado al proceso de glauconitización. La relación SiO<sub>2</sub>–CaO da una correlación negativa directa, confirma el aporte de material terrígeno a la secuencia estudiada, y además indica que a medida que el sílice entra en el sistema el calcio disminuye a diferencia de la relación anterior K<sub>2</sub>O–Na<sub>2</sub>O que cuando el potasio se incrementa se espera que el sodio aumente junto con este.

Por otra parte se observa una correlación positiva entre el Al<sub>2</sub>O–TiO<sub>2</sub> debiéndose probablemente a la incorporación de estos óxidos a minerales de arcilla e indicando que a medida que el óxido de aluminio entra en el sistema el óxido de titanio también aumenta, mientras que la correlación MnO–CaO es posible negativa, vinculada a la presencia de cemento calcáreo u óxidos de manganeso, y aunque no es común puede estar asociado a la presencia de siderita y silicatos de hierro, y para este caso el manganeso se encontraría sustituyendo al calcio.

Las correlaciones negativas bajas se encuentran entre el MgO–CaO, el Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–CaO y Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–CaO posiblemente vinculado a procesos de meteorización y de reemplazo.

Las correlaciones positivas bajas vinculados al  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{SiO}_2$  están asociados a los minerales de arcilla y feldespatos.

La alta dispersión de MnO y los demás compuestos, puede deberse a que los sedimentos se depositaron en condiciones de oxígeno bajas, evidenciado principalmente por la correlación entre MnO- $\text{Al}_2\text{O}_3$  la cual da muy baja, pero es indicativo de condiciones reductoras en el ambiente de depositación. También la asociación V-Ni indica condiciones reductoras del medio, al igual que la correlación  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -V, este se puede atribuir a la incorporación del V en minerales arcillosos con contenido de materia orgánica.

Sin embargo la correlación baja entre  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ -CaO, así como también la presencia de organismos bentónicos observados en sección fina, indican periodos variables de oxígeno, por tanto condiciones óxicas.

### 5.2.2. Cajas graficas de las facies por compuesto o elemento.

Para observar la relación de las facies en cuanto a la composición química se realizó un estudio multivariante para entender la correspondencia entre éstas como se presenta a continuación:

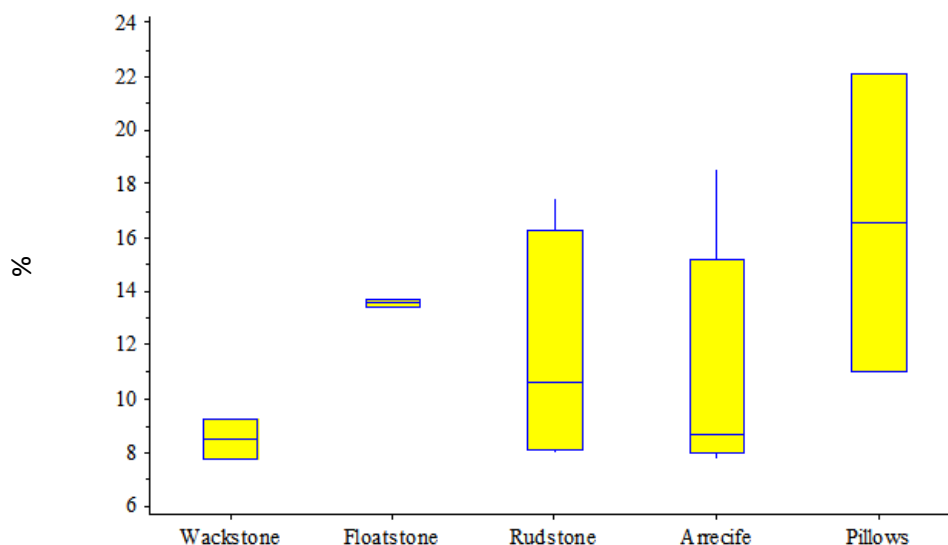


Figura 81. Caja gráfica del  $\text{SiO}_2$



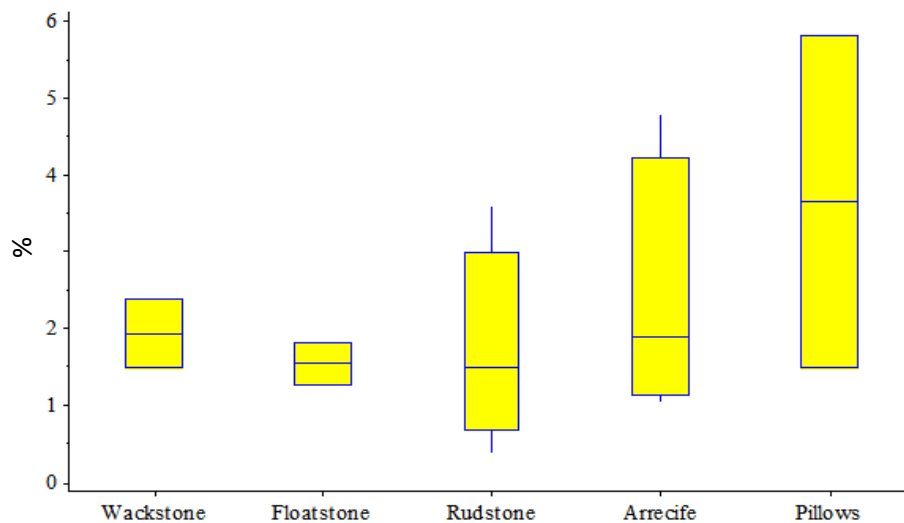


Figura 82. Caja gráfica del  $\text{Al}_2\text{O}_3$

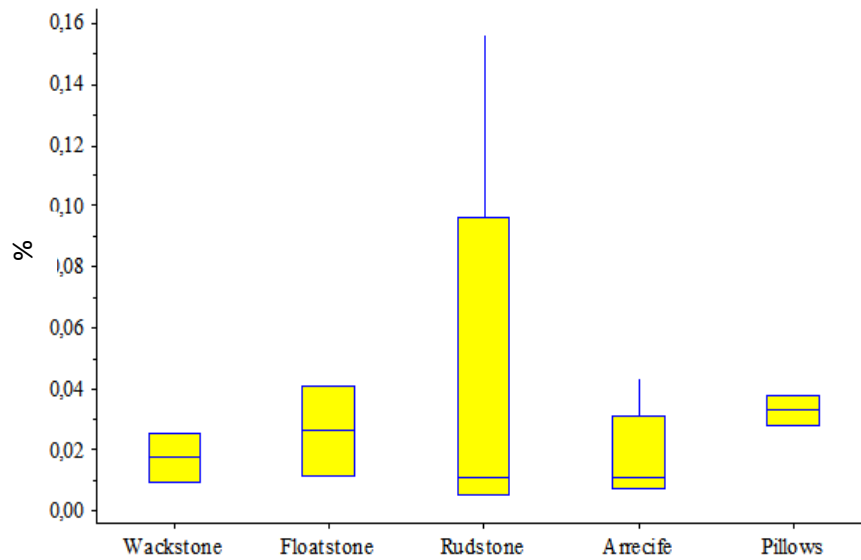


Figura 83. Caja gráfica del  $\text{K}_2\text{O}$

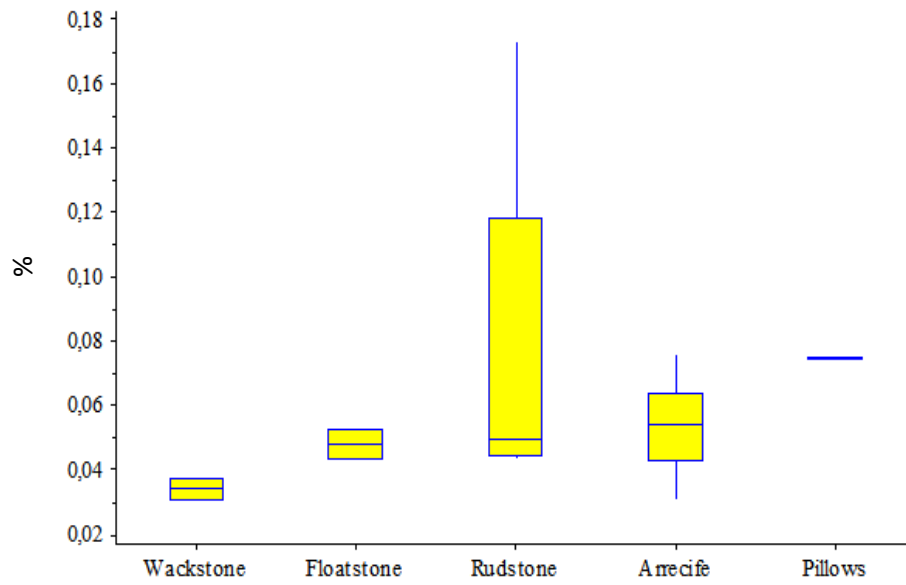


Figura 84. Caja gráfica del Na<sub>2</sub>O

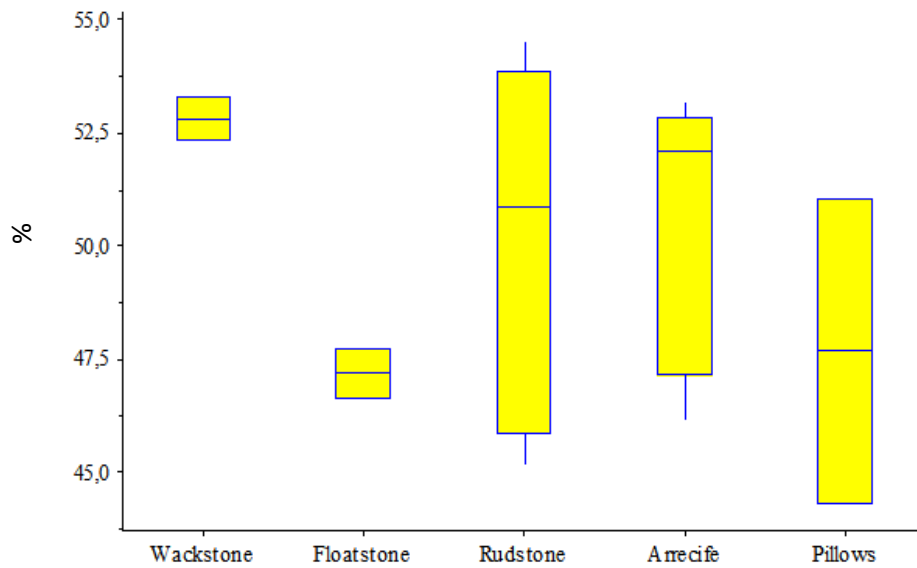


Figura 85. Caja gráfica del CaO

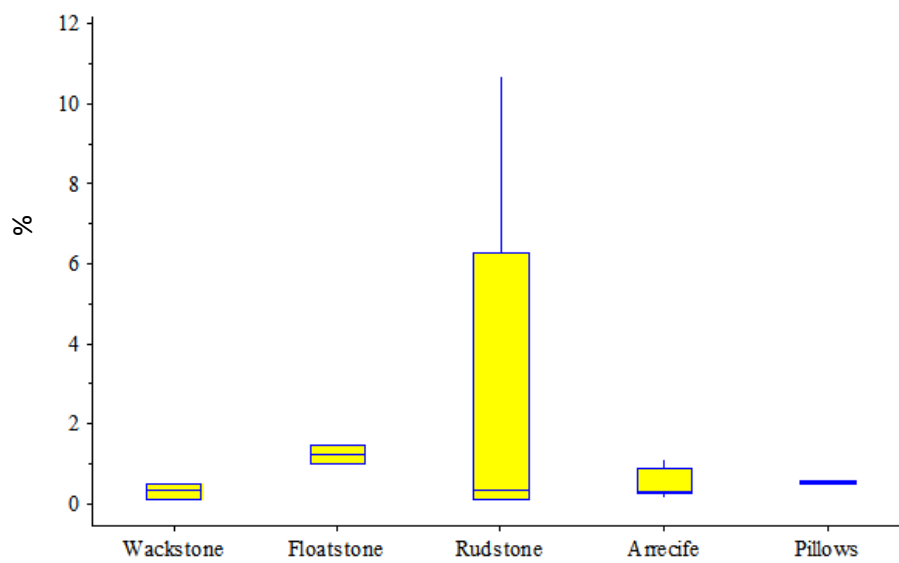


Figura 86. Caja gráfica del Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

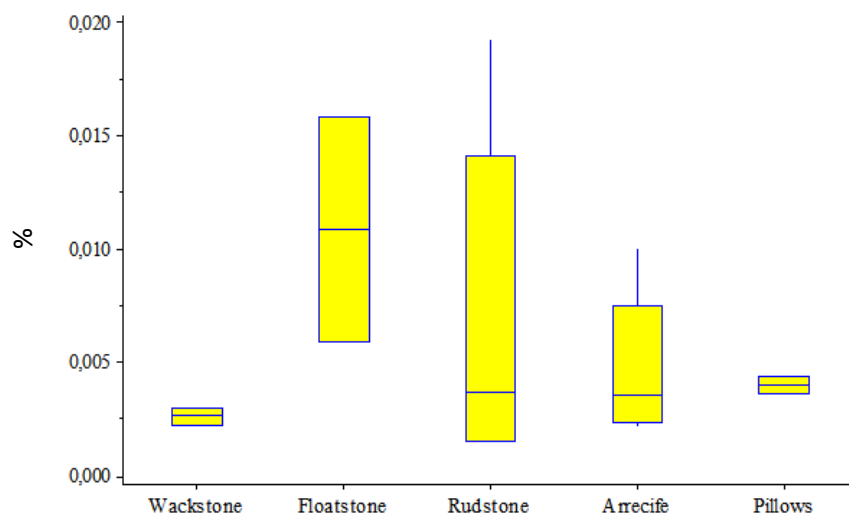


Figura 87. Caja gráfica del MgO

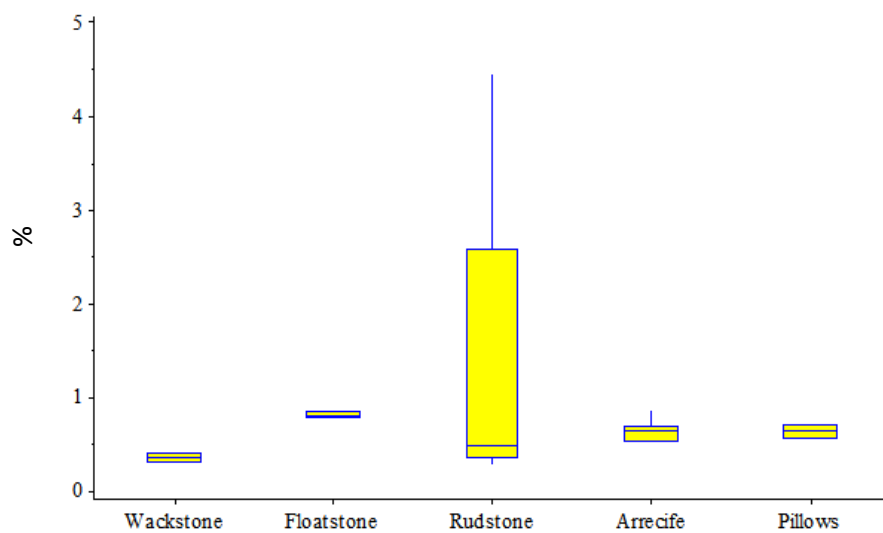


Figura 88. Caja gráfica del MnO

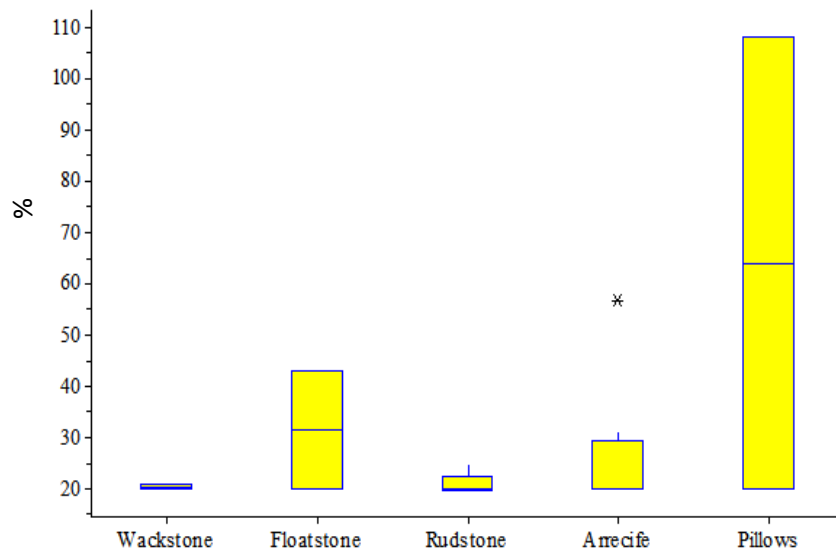


Figura 89. Caja gráfica del V

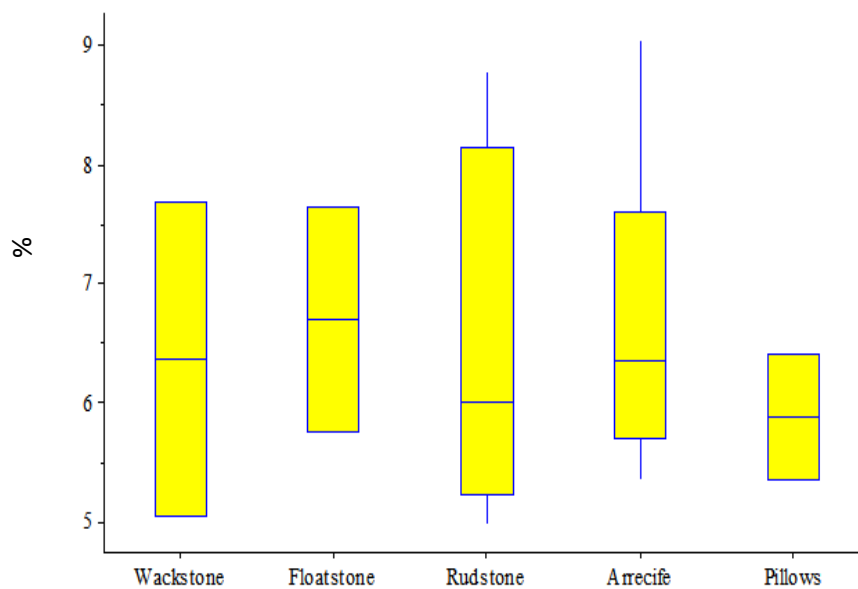


Figura 90. Caja gráfica del Ni

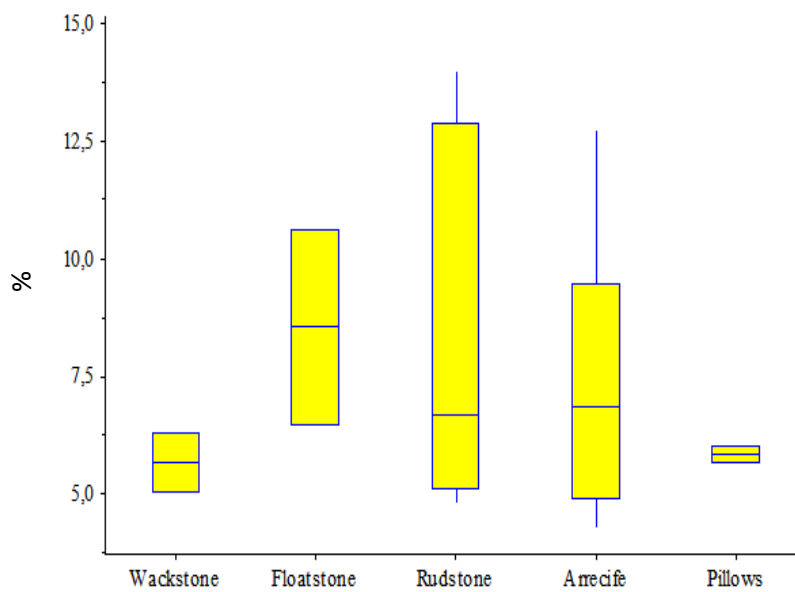


Figura 91. Caja gráfica del Zn

De la relación de las cajas gráficas obtenidas por elementos de las facies texturales descritas en el Capítulo IV, se obtuvo que:

Las facies de Wackestone presentaron los valores más altos de contenido de óxido de calcio (CaO) estando estos entre 52,2 a 53,3% aproximadamente, con una mediana de 52,8%; obteniendo los valores más bajos en MnO (0,0045), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0,4%), MgO (0,3%), Na<sub>2</sub>O (0,034%), Zn (5,7 ppm) y el SiO<sub>2</sub> (8,3%), respecto a la mediana, a diferencia de la facies de Floatstone la cual presenta los valores más bajos en óxido de calcio (CaO) con un 47% y los más altos en MnO (0,012%), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (1,4%), MgO (0,7%), Na<sub>2</sub>O (0,05%), Zn (8,5 ppm) y el SiO<sub>2</sub> (13,7%), mostrando estos resultados una marcada diferencia de formación para cada una de estas facies, ya que la primera tiene mayor contenido de lodo carbonático y menor cantidad de aloquímicos, mientras que en la segunda tiene mayor contenido de aloquímicos (siendo estos > a 2 mm) y menor cantidad de lodo carbonático.

La facies de Rudstone y Arrecife o Bindstone presentan gran similitud respecto a la mediana de los elementos determinados, a excepción del contenido de SiO<sub>2</sub> el cual es mayor en la primera facies con un 10,5% mientras que en la segunda tiene un 8,5%, debido a que hubo un mayor aporte de material siliciclástico como se observó en la muestra SL-110 que pertenece a la facies de Rudstone y contiene un 14% de estos.

La facies de “Pillows” o Framestone presenta sus mayores valores con respecto a la mediana en el contenido de V (65 ppm), SiO<sub>2</sub> (16,5%), Na<sub>2</sub>O (0,075%), K<sub>2</sub>O (0,03%) y Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (3,6%) y los menores valores MnO (0,003%), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0,6%), MgO (0,8%), Na<sub>2</sub>O, Zn (5,8 ppm) y el Ni (5,5 ppm); lo cual podría estar relacionado al contenido de siliciclástico según lo observado en sección fina, donde la muestra SL-123 posee un 18% y la SL-124 un 0%. Esta facies está conformada por dos muestras que presentan composición química un poco diferente, motivo por el cual se observa la notable separación o amplitud de los percentiles 25 y 75 con respecto a la mediana.



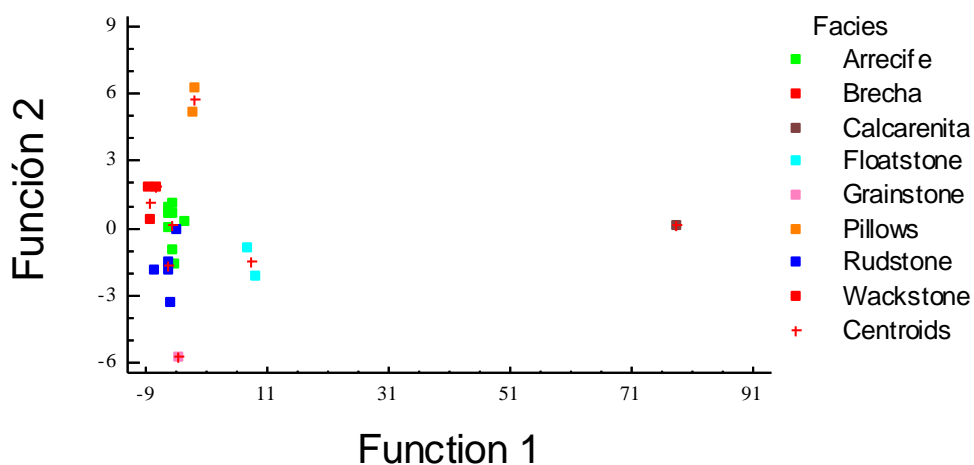
Las facies Grainstone, Brecha y Calcarenita no se incluyeron en los diagramas de caja, debido a que cada una de estas tenía una sola muestra como dato.

Se pudo observar cómo en la facies de Rudstone a lo largo de todos los elementos presentó siempre una mayor dispersión entre el percentil 50 y el 75, esto se debe a que la muestra SL-108 perteneciente a esta facies contiene valores anómalos para cada uno de los elementos.

No se observa dependencia de los valores de concentración con la profundidad, es decir, no existe un aumento o disminución de las concentraciones a medida que aumenta o disminuye la profundidad.

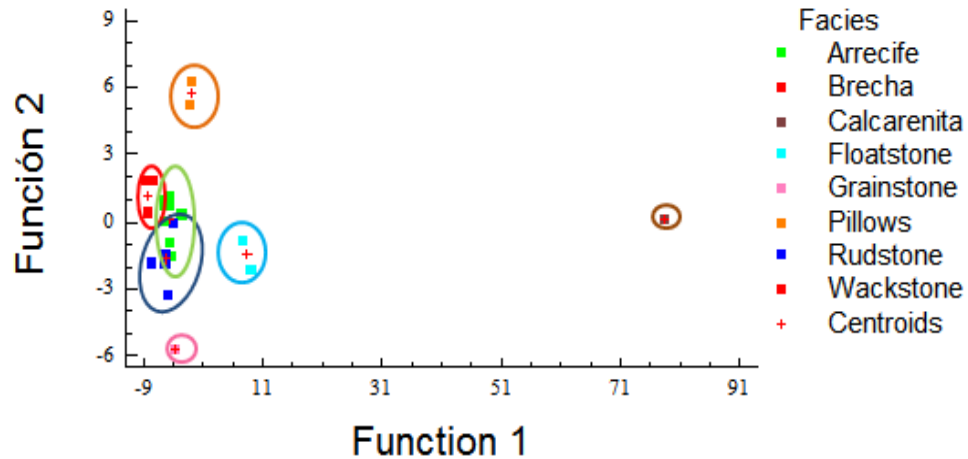
### 5.3. Análisis discriminante

Por el análisis discriminante (Fig. 105) se pudo observar claramente la distribución de las facies en cuanto a su composición química reflejando así, una gran similitud en las facies de Wackestone y Brecha, así como también en la facies de Rudstone y Arrecife o Bindstone, mientras que las facies de Floatstone, Calcarenita, “Pillows” o Framestone y Grainstone se encontraron en dispersión con respecto a las demás facies, debido a su diferencia en composición y ambiente depositacional.



**Figura 92.** Gráfico de análisis discriminante

Este gráfico se utilizó con la finalidad de poder predecir a cual nivel de una variable independiente en este caso facies, pertenece una nueva observación, además se determinó las ecuación de las funciones que permiten discriminar una cada compuesto o elemento por facies.



**Figura 93.** Gráfico de análisis discriminante interpretado

La primera función estandarizada obtenida fue:

$$0,121413*Al_2O_3 - 9,30444*CaO - 11,7906*Fe_2O_3 - 3,47099*K_2O + 3,85679*MgO + 9,50339*MnO + 4,48174*Na_2O - 1,84799*Ni - 10,8883*SiO_2 + 7,1328*TiO_2 - 5,96575*V - 0,413591*Zn$$

Y la primera no estandarizada es:

$$0,0795327* Al_2O_3 - 2,89317*CaO - 4,77744* Fe_2O_3 - 95,2661* K_2O + 4,01448*MgO + 1962,44*MnO + 143,126* Na_2O - 1,34245*Ni - 2,5964* SiO_2 + 277,681* TiO_2 - 0,288634*V - 0,13408*Zn$$

Esta función fue utilizada para determinar a que tipo de facies pertenecen los datos originales de origen conocido. En la siguiente tabla se muestran los coeficientes de las funciones discriminantes:

**Tabla 3.** Coeficientes estandarizados

	1	2	3	4	5	6	7
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,121413	1,90018	-1,14968	0,574981	0,151267	-0,510909	0,471902
CaO	-9,30444	-6,3147	-0,028858	-2,13301	-1,24817	-3,47757	-1,36737
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-11,7906	-8,962	-3,97691	-1,32392	-.3,29311	2,90788	-0,453038
K <sub>2</sub> O	-3,85679	9,5915	-4,20754	-0,842208	0,929369	0,341393	1,56797
MgO	3,85679	-3,18553	6,44212	-1,45246	2,81907	-3,36529	-2,53529
MnO	9,50339	-0,934027	-0,096368	1,34268	0,0981054	-0,476403	-0,17573
Na <sub>2</sub> O	4,48174	4,08205	1,11087	2,15878	-0,904553	0,457227	1,90644
Ni	-1,84799	-0,227906	-0,180572	1,29394	0,148739	0,364952	0,261855
SiO <sub>2</sub>	-10,8883	-7,59131	1,77864	-3,99633	-0,355227	-3,2862	-1,45203
TiO <sub>2</sub>	7,1328	1,04942	-0,14915	0,236896	-1,11874	0,153674	-0,516083
V	-5,96575	-1,40717	0,609846	0,460497	0,256947	0,568707	-0,477602
Zn	-0,413591	-1,57616	1,02717	0,205243	-0,834777	-0,653223	0,0058414

**Tabla 4.** Coeficientes no estandarizados

	1	2	3	4	5	6	7
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,0795327	1,24473	-0,753311	0,376647	0,0992198	-0,334676	0,3090124
CaO	-2,89317	-1,96352	0,0089731	-0,663247	-0,388113	-1,08133	-0,425177
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-4,77744	-3,63132	-1,61141	-0,536439	-1,33434	1,17825	-0,183518
K <sub>2</sub> O	-95,2661	263,252	-115,481	-23,1156	25,5078	9,37	-0,183567
MgO	4,01448	-3,31577	6,70551	-1,51184	2,93432	-3,50288	43,0352
MnO	1962,44	-192,875	-19,8999	277,261	20,2586	-98,3765	-2,63895
Na <sub>2</sub> O	143,126	130,362	35,4759	68,9413	-28,8872	-14,6017	-36,288
Ni	-1,34245	-0,16556	-0,131175	0,939965	0,10805	0,26255	0,190222
SiO <sub>2</sub>	-2,5964	-1,81021	0,424132	-0,95296	0,084707	-0,783623	-0,34625
TiO <sub>2</sub>	277,681	40,854	-5,80644	9,2224	-43,5526	5,98255	-20,0912
V	-0,288634	-0,068081	0,0295054	0,0295054	0,0124316	0,027515	-0,023107
Zn	-0,13408	-0,510997	0,332993	0,332993	-0,270623	-0,211766	-0,001894
Constante	170,282	116,397	-7,55805	-7,55805	21,9687	64,2251	22,4091

Las dos tablas anteriores muestran los coeficientes de las funciones utilizadas para discriminar entre los diferentes niveles de facies. De particular interés son los coeficientes estandarizados.

De la magnitud relativa de los coeficientes en la ecuación anterior, se puede determinar cómo las variables independientes se utilizan para discriminar entre los grupos.

**Tabla 5.** Cuadro de clasificación de las funciones discriminantes por facies.

Actual Facie	Grupo/Tamaño	Wackstone	Floatstone	Grainstone	Rudstone	Arrecife	Pillows	Brecha	Calcarenita
Wackstone	3	2(100%)	0 (0,00%)	0 (0,00%)	0 (0,00%)	0 (0,00%)	0 (0,00%)	0 (0,00%)	0 (0,00%)
Floatstone	1	0 (0,00%)	1 (100%)	0 (0,00%)	0 (0,00%)	0 (0,00%)	0 (0,00%)	0 (0,00%)	0 (0,00%)
Grainstone	1	0 (0,00%)	0 (0,00%)	1 (100%)	0 (0,00%)	0 (0,00%)	0 (0,00%)	0 (0,00%)	0 (0,00%)
Rudstone	5	0 (0,00%)	0 (0,00%)	0 (0,00%)	4 (80%)	1 (20%)	0 (0,00%)	0 (0,00%)	0 (0,00%)
Arrecife	8	0 (0,00%)	0 (0,00%)	0 (0,00%)	1 (12,50%)	7 (87,5%)	0 (0,00%)	0 (0,00%)	0 (0,00%)
Pillows	2	0 (0,00%)	0 (0,00%)	0 (0,00%)	0 (0,00%)	0 (0,00%)	2 (100%)	0 (0,00%)	0 (0,00%)
Brecha	1	0 (0,00%)	0 (0,00%)	0 (0,00%)	0 (0,00%)	0 (0,00%)	0 (0,00%)	1 (100%)	0 (0,00%)
Calcarenita	1	0 (0,00%)	0 (0,00%)	0 (0,00%)	0 (0,00%)	0 (0,00%)	0 (0,00%)	0 (0,00%)	1 (100%)

En la tabla 5 se observa las relaciones en porcentaje entre las facies conocidas y las obtenidas, donde la facies de Arrecife original es compatible solo en un 87,5% con la facies de Arrecife obtenida mientras que un 12,50% esta relacionado con la facies de Rudstone. Los resultados obtenidos mediante las funciones discriminantes para cada facies demuestran que este método es bastante confiable. El porcentaje de acierto es de 90,91.

El grado de confiabilidad de estas funciones permite que las mismas sean usadas para determinar los tipos de facies de muestras desconocidas a las cuales se les haya realizado un análisis químico. Dicha función podrá ser usada posteriormente para clasificar nuevas muestras correspondientes a la sección inferior de la Formación San Luis.

**Tabla 6.** Facies actual vs Facies probables.

Rango	Facies actual	Facies probable 1	Valor	Facies probable 2	Valor
1	Floatstone	Floatstone	24294,3	Pillows	24229,9
2	Arrecife	Arrecife	26485,3	Rudstone	26483,7
3	Brecha	Brecha	26785,3	Arrecife	26771,5
4	Wackstone	Wackstone	26937,8	Arrecife	26930,3
5	Arrecife	Arrecife	26407,9	Rudstone	26403
6	Rudstone	Rudstone	26801,8	Arrecife	26796
7	Rudstone	Rudstone	26942,6	Grainstone	26937,6
8	Arrecife	Arrecife	26133,9	Rudstone	26128,7
9	Arrecife	Arrecife	26361,4	Rudstone	26355,5
10	Arrecife	Arrecife	26423,9	Rudstone	26416,9
11	Arrecife	Arrecife	26634,8	Rudstone	26634,8
12	Arrecife	Arrecife	26690,7	Rudstone	26686,4
13	Rudstone	<b>Arrecife</b>	26232,3	Rudstone	26231
14	Pillows	Pillows	25190,6	Arrecife	25169,1
15	Pillows	Pillows	25282,4	Arrecife	25265,7
16	Calcarenita	Calcarenita	15417,2	Floatstone	12959,5
17	Floatstone	Floatstone	24418,7	Pillows	24336,8
18	Wackstone	Wackstone	26973,4	Brecha	26960,9
19	Grainstone	Grainstone	27047,2	Rudstone	27035,7
20	Rudstone	Rudstone	27216,5	Arrecife	27212,3
21	Rudstone	Rudstone	26918,1	Arrecife	26915,6
22	Arrecife	<b>Rudstone</b>	26505,8	Arrecife	26505,5

La tabla anterior muestra los resultados obtenidos usando las funciones discriminantes derivadas de la clasificación. En él se dan las dos calificaciones más altas entre las funciones de clasificación para cada una de las 22 observaciones utilizadas para ajustar el modelo, así como para nuevas observaciones. Por ejemplo, en el primer puesto la calificación más alta para Facies = Floatstone y el segundo más alto para Facies = Pillows. Pero, el verdadero valor de la Facies era Floatstone. Entre los 22 rangos utilizados para ajustar el modelo, 20 de ellas o el 90,9091% fueron clasificadas correctamente. Los datos en negritas corresponden a facies incorrectamente clasificadas.

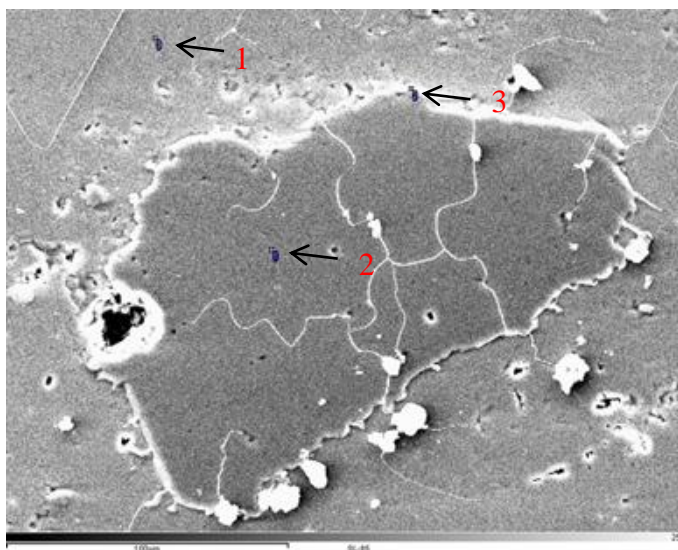


#### 5.4. Microscopia Electrónica de Barrido (SEM)

Se realizaron dos sesiones de análisis bajo el microscopio electrónico de barrido en el Instituto Tecnológico Venezolano del Petróleo (INTEVEP, SA), donde se obtuvo la morfología de ciertos fósiles y la matriz, para así luego conocer su composición química, los detalles de esta metodología así como también los equipos utilizados pueden estudiarse en detalle en el capítulo 3. Todas las figuras y tablas de este apartado se encuentran en el apéndice 4.

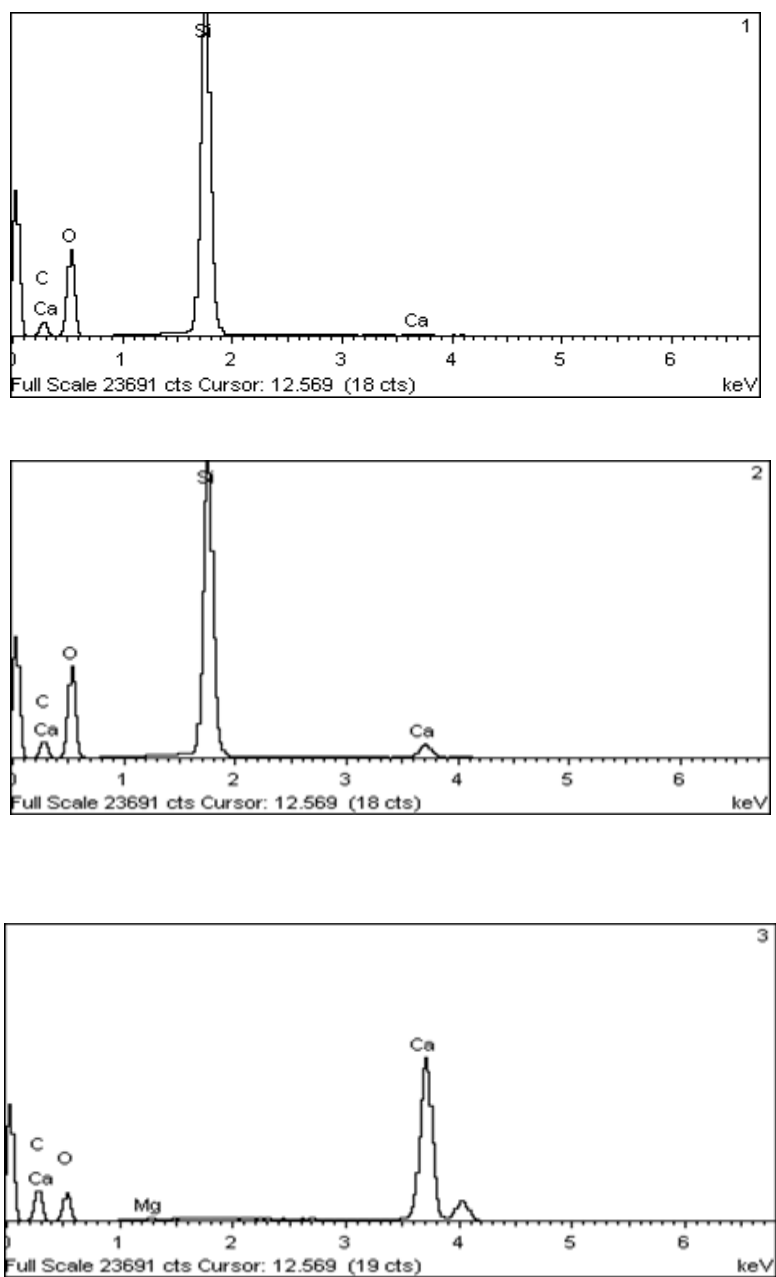
##### ➤ Resultados de la muestra SL-85

En la figura 94, se muestra la vista de un grano, en donde se tomaron solo en cuenta para su estudio detallado los denotado por 1, 2 y 3.



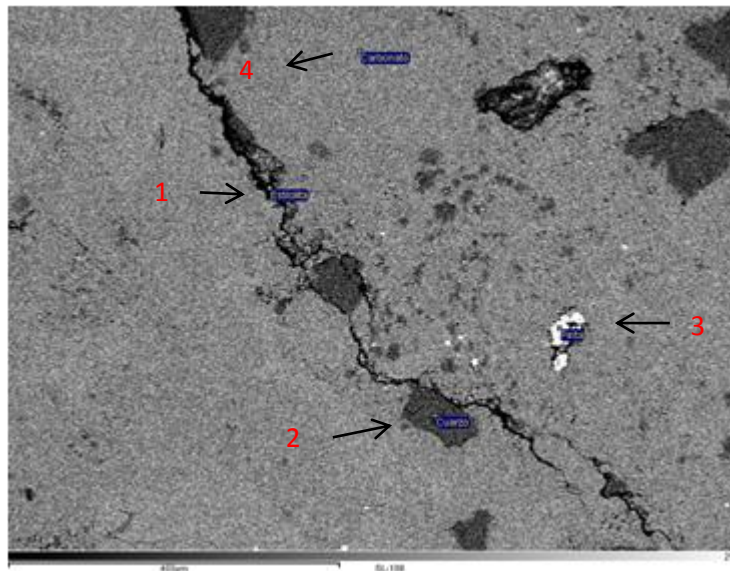
**Figura 94.** Micrografía de barrido electrónico de la muestra SL-85.

En la figura 95 se observa 3 espectros generados para este grano tomadas con una energía dispersiva de 25 keV. Donde para los espectros 1 y 2 el % Si es alto y puede estar relacionado con la presencia de cuarzo en el análisis petrográfico y en el espectro 3 el Ti es alto podría estar vinculada con el rutilo.



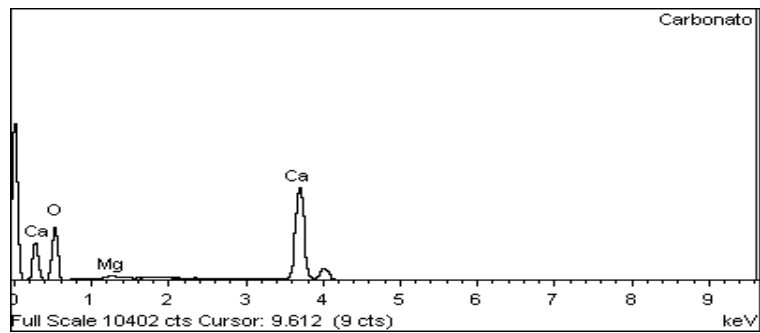
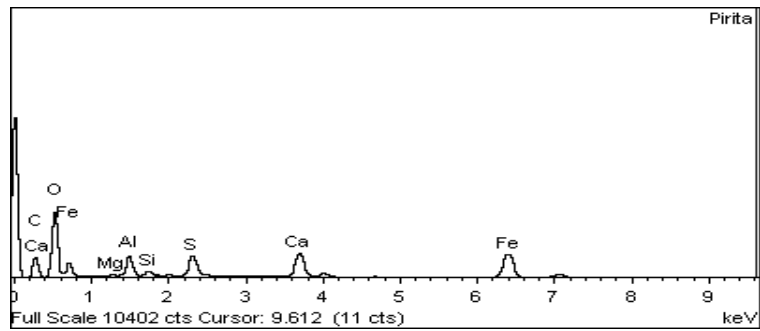
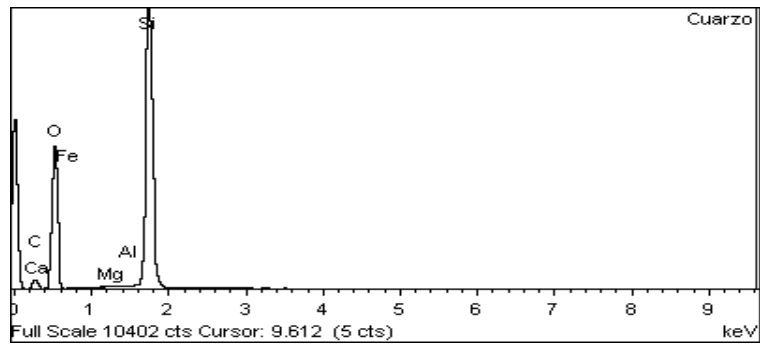
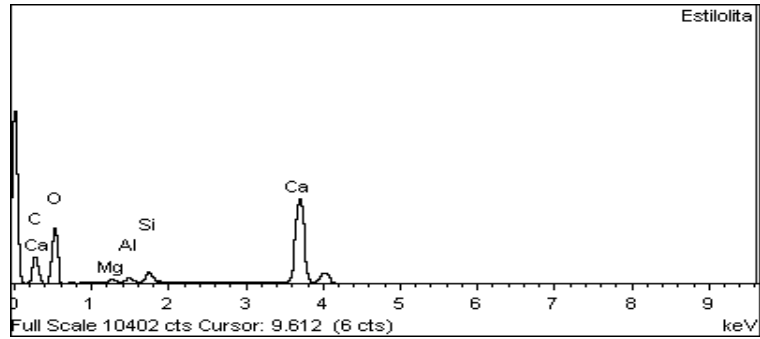
**Figura 95.** Análisis composicional de la muestra SL-85, mediante la técnica Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDS).

➤ Resultados de la muestra SL-108 (A1)



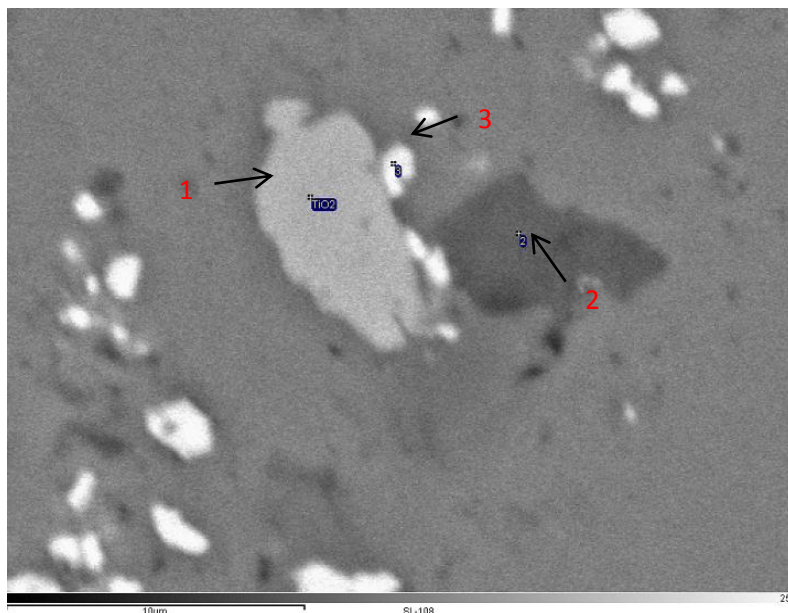
**Figura 96.** Micrografía de barrido electrónico de la muestra SL-108 (A1)

En la figura 96 se observa una estilolita rellena por algún mineral y otros granos dispersos en la matriz. En la figura 97 se observan cuatro espectros generados para este grano tomada con una energía dispersiva de 25 keV. El espectro 1 tomado dentro de la estilolita su contenido es alto en calcio, pudo haber precipitado carbonato de calcio. El segundo espectro da cuarzo debido al alto contenido de Si. El espectro 3 presenta picos de Fe y S importantes, lo cual indica que posiblemente es un grano de pirita, es importante señalar en este espectro que hay la presencia de otros elementos que estarían asociados a la matriz y por su cercanía aparecen y el ultimo espectro se obtuvo en la matriz y nos confirma lo observado en petrografía, ya que ésta es rica en carbonato de calcio debido al fuerte pico en Ca.



**Figura 97.** Análisis composicional de la muestra SL-108 (A1), mediante la técnica *Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy* (EDS)

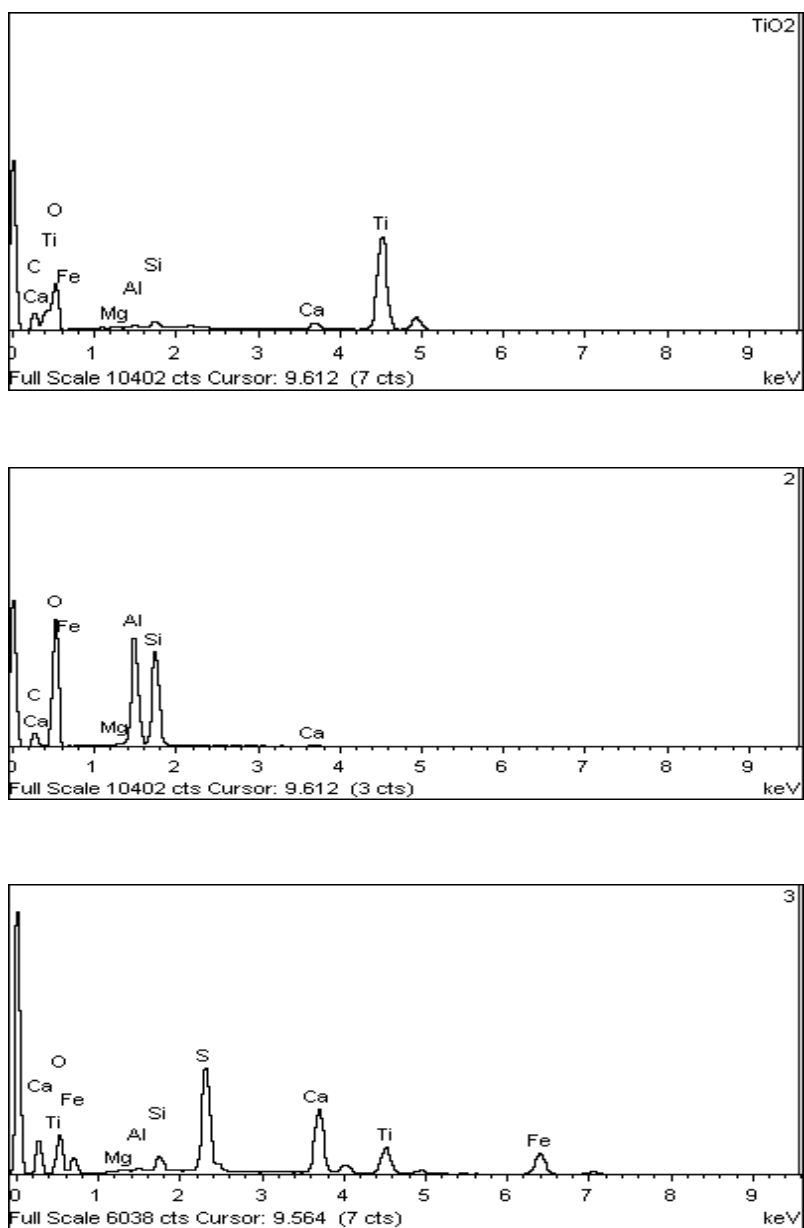
➤ Resultados de la muestra SL-108 (A2)



**Figura 98.** Micrografía de barrido electrónico de la muestra SL-108 (A2)

Se tomaron los espectros de tres granos lo cuales fueron identificados como 1, 2 y 3, tomados con una energía dispersiva de 25 keV, como se puede observar en la figura 98.

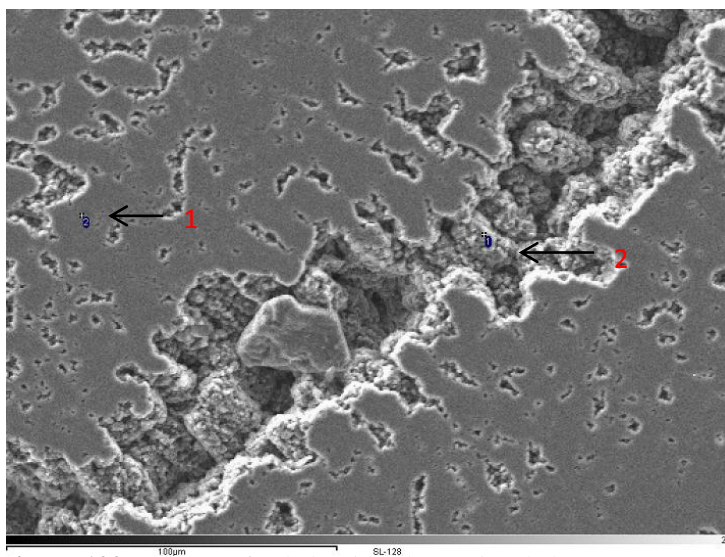
En la figura 99 el primero nos dice que según el espectro podría tratarse de un óxido de titanio  $\text{TiO}_2$ , probablemente rutilo, debido a los picos de Ti y O. El segundo espectro da picos altos de Si, O y Al, el cual podría ser un aluminosilicato, no distinguido con claridad. Y el último espectro es una pirita por su morfología y composición de Fe y S.



**Figura 99.** Análisis composicional de la muestra SL-108 (A2) mediante la técnica *Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy* (EDS)

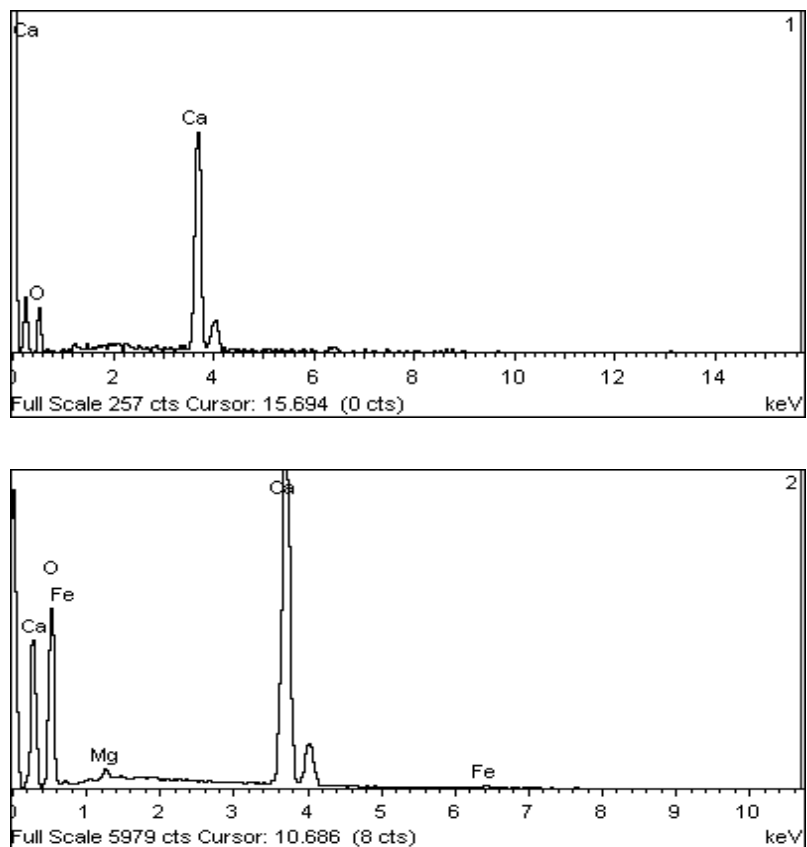


➤ Resultados de la muestra SL-128 (A1)



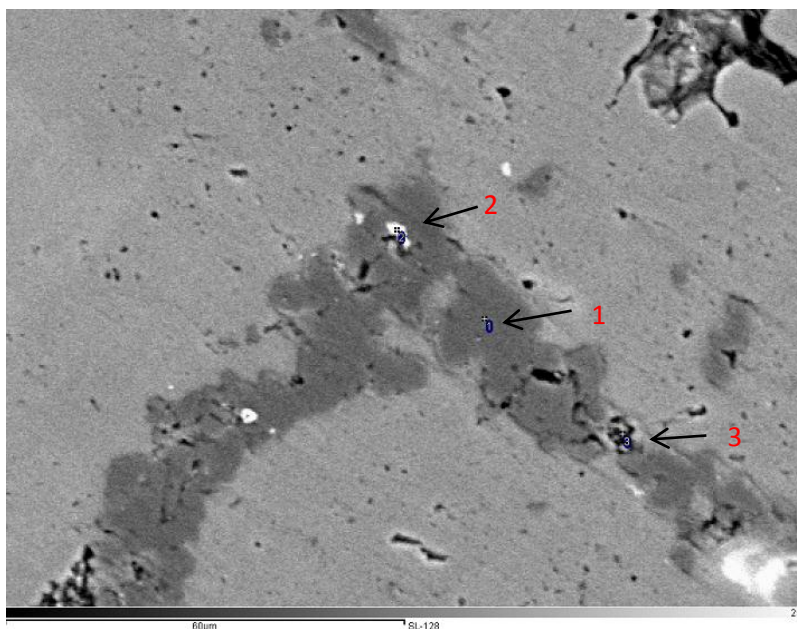
**Figura 100.** Micrografía de barrido electrónico de la muestra SL-128 (A1)

La figura 100 fue tomada en la porosidad de un alga, y se tomaron dos espectros como se observa en la figura 101 dando como resultado un alto contenido de calcio tanto fuera de la porosidad como dentro, lo cual confirma la composición carbonática del alga. Los espectros fueron tomados con una energía dispersiva de 25 keV.



**Figura 101.** Análisis composicional de la muestra SL-128 (A1), mediante la técnica *Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy* (EDS)

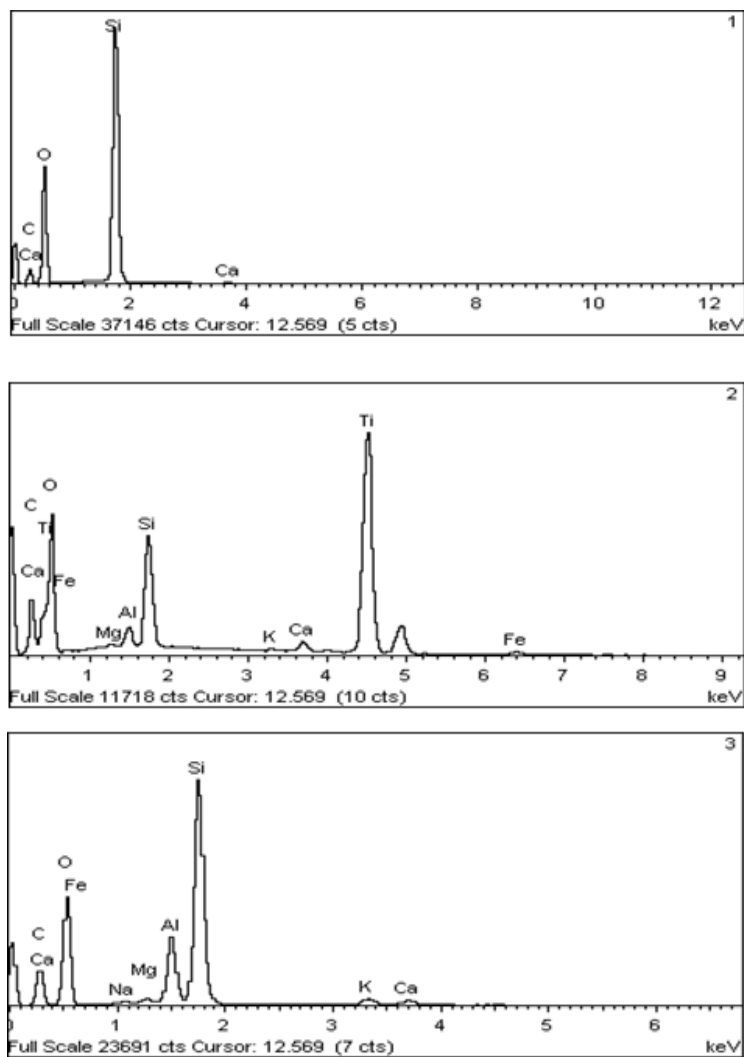
➤ Resultados de la muestra SL-128 (A2)



**Figura 102.** Micrografía de barrido electrónico de la muestra SL-128 (A3)

La imagen 102 fue tomada en un fragmento de un foraminífero, se tomaron tres espectros en tres granos, con una energía dispersiva de 25 keV.

El primer espectro da alto en sílice como se observa en la figura 103 por lo cual podría ser un grano de cuarzo. El segundo espectro tiene altas concentraciones de S y Fe y otros elementos que podrían deberse a su cercanía a la matriz y no haberlo tomado acercamiento, lo cual nos indica que es una pirita, confirmado por su morfología. Y el último espectro es otro fragmento de cuarzo debido a los picos de elementos Si y O.



**Figura 103.** Análisis composicional de la muestra SL-128 (A3), mediante la técnica *Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy* (EDS)

## 5.5. CONCLUSIONES

El contenido de óxido de magnesio ( $MnO$ ) en las facies de Floatstone, Rudstone, Arrecife o Bindstone y “Pillows” o Framestone, es indicativo de zonas donde los fragmentos de algas coralinas y restos de equinodermos son componentes importantes del sedimento. Se puede inferir que estas facies se depositaron en una zona de mediano a bajo oleaje.

El contenido de óxido de hierro ( $Fe_2O_3$ ) está asociado a un ambiente óxido-reductor, el cual fue observado por la presencia de hematita y limonita en el lodo carbonático y formando envoltorios micríticos en las partículas esqueléticas.

Los valores de  $Fe_2O_3$ ,  $Al_2O_3$ ,  $K_2O$ ,  $Na_2O$ ,  $TiO_2$ , Ni y Zn, aumentan de manera importante cuando hay incremento en el contenido de material siliciclástico. El  $Al_2O_3$  está relacionado probablemente con la meteorización de los feldespatos de las rocas ígneas expuestas en macizos rocosos cercanos, como el  $Al_2O_3$  tiene baja solubilidad se habría depositado como material terrígeno arcilloso en un ambiente restringido. El Zn y Mn se incrementan en las fracciones de los granos más pequeños, especialmente en los limos.

El Ni por otra parte también se encuentra asociado a la materia orgánica al igual que el V y Zn, cuando no se encuentra sustituyendo al Fe y Mg, aunque el V fue difícil de detectar debido al poco contenido en los sedimentos carbonáticos, ya que el límite de detección de la técnica utilizada es mayor que el contenido de este elemento en las muestras analizadas.

Por el análisis discriminante se pudo observar claramente la distribución de las facies en cuanto a su composición química reflejando así, una gran similitud en las facies de Wackestone y Brecha, así como también en la facies de Rudstone y Arrecife o Bindstone, mientras que las facies de Floatstone, Calcarenita, “Pillows” o

Framestone y Grainstone se encontraron en dispersión con respecto a las demás facies, debido a su diferencia en composición y ambiente depositacional.

La primera función estandarizada obtenida fue:

$$0,121413*Al_2O_3 - 9,30444*CaO - 11,7906*Fe_2O_3 - 3,47099*K_2O + 3,85679*MgO + 9,50339*MnO + 4,48174*Na_2O - 1,84799*Ni - 10,8883*SiO_2 + 7,1328*TiO_2 - 5,96575*V - 0,413591*Zn$$

Y la primera no estandarizada es:

$$0,0795327* Al_2O_3 - 2,89317*CaO - 4,77744* Fe_2O_3 - 95,2661* K_2O + 4,01448*MgO + 1962,44*MnO + 143,126* Na_2O - 1,34245*Ni - 2,5964* SiO_2 + 277,681* TiO_2 - 0,288634*V - 0,13408*Zn$$

El porcentaje de acierto es de 90,91, permite que las mismas sean usadas para determinar los tipos de facies de muestras desconocidas a las cuales se les haya realizado un análisis químico. Dicha función podrá ser usada posteriormente para clasificar nuevas muestras correspondientes a la sección inferior de la Formación San Luis.

La muestra SL-108 presentó en todos sus componentes valores anómalos fuertes, por lo cual podríamos decir que esta tuvo un mal tratamiento en la fase previa al análisis químico o se encontraba altamente meteorizada.

En el análisis de cajas gráficas por facies cabe recalcar que para el Wackestone, Floatstone y Pillows solo se tuvieron dos datos como población para cada una de ellas, lo cual podría estar dando un resultado poco confiable al momento de interpretar las mismas.



## CAPITULO VI

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 6.1. Conclusiones

- Por la posición de crecimiento de los organismos como los corales y las algas, se ubica la Formación San Luis en un ambiente detrás del arrecife, el cual engloba el talud exterior de la plataforma, el arrecife orgánico, plano arrecifal o eje intermedio de la plataforma y la laguna interna o plataforma interna abierta, correspondientes a las facies 4, 5, 6, y 7 de Wilson (1975). En el cinturón 4 se ubicó la facies textural identificada como Brecha; en el cinturón 5 las facies clasificadas como “Pillows” o Framestone y Arrecife o Bindstone; en el cinturón 6 las facies texturales de Rudstone, Grainstone, Floatstone y Packstone y en el cinturón 7 las facies de Wackestone y Calcarenita.
- En la Formación San Luis hubo un aporte de sistemas fluvio–deltaico proveniente de algún macizo rocoso positivo durante el Oligoceno Tardío–Mioceno Temprano y una interdigitación con las formaciones Guarabal y Patiecitos.
- Las calizas arrecifales estudiadas de la Formación San Luis sufrieron una diagénesis intermedia identificada por la presencia de estilolitas de baja amplitud y microfracturas tanto en fragmentos fósiles, matriz y cemento; así como también el neomorfismo heteroaxial observado en los corales, braquiópodos, moluscos, foraminíferos y otros.
- Se determinó que la clasificación obtenida en campo tuvo un 10% de discrepancia con la realizada a través del microscopio óptico.

- Por la técnica de Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) no se obtuvieron los mejores resultados ya que, las muestras analizadas se encontraban muy recristalizadas, y no permitió identificar los componentes aloquímicos presentes.
- En las facies de Wackestone y Calcarenita el contenido del óxido de magnesio es menor al de las facies de Floatstone, Rudstone, Arrecife o Bindstone y “Pillows” o Framestone por el contenido de fragmentos de algas coralinas y restos de equinodermos, y esto se debe a su ambiente de formación.
- Los valores de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , Zn,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{TiO}_2$  y Ni, confirman el aporte de material siliciclástico el cual fue observado en el análisis petrográfico.
- Se observó un proceso de piritización en la matriz y algunos fragmentos fósiles producto de la reacción de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  con la materia orgánica presente en las muestras.
- La muestra SL-108 presentó en todos sus componentes valores anómalos fuertes, por lo cual podríamos decir que ésta tuvo un mal tratamiento en la fase previa al análisis químico o se encontraba altamente meteorizada.
- Por las técnicas de Fluorescencia de rayos X y Absorción atómica no se pudieron obtener los valores de Sr, Ba y  $\text{P}_2\text{O}_5$ , debido a que los límites de detección son más altos que la cantidad de elemento presente en la muestra.
- La caracterización geoquímica realizada para la Formación San Luis es una innovación que se realizó para obtener una mejor comprensión sobre la depositación de ésta, ya que antes no se había realizado una descripción de este tipo.

- En el análisis de cajas graficas por facies cabe recalcar que para el Wackestone, Floatstone y Pillows solo se tuvieron dos datos como población para cada una de ellas, lo cual podría estar dando un resultado poco confiable al momento de interpretar las mismas.
- Las 8 facies descritas por medio del análisis petrográfico pudieron ser corroboradas mediante la función discriminante en base a la composición química de cada una de las muestras estudiadas, teniendo un porcentaje de acierto de 90,91. Dicha función podrá ser usadas posteriormente para clasificar nuevas muestras correspondientes a la sección inferior de la Formación San Luis.
- Con el modelo presentado en el Capitulo IV de la distribución de los componentes pertenecientes a las facies descritas y ubicadas en el modelo de Wilson (1975) por medio de los datos químicos obtenidos en el Capitulo V, se generó un modelo final agrupando ambos estudios el cual se encuentra en el Anexo 3.
- La columna estratigráfica realizada contiene toda la sección estudiada en el trabajo de campo comprendiendo las formaciones Guarabal, San Luis y Patiecitos, representando en ella una nueva clasificación de facies basándose en las técnicas aplicadas para este trabajo, es un gran aporte para los estudios que comprenden la zona.
- La actualización cartográfica realizada basada en los datos tomados en campo y lo extraído de SANDIA (1981), es de gran importancia y aporte, ya que, se pudo corroborar y ampliar la información que se tenía para la zona de estudio. En base a está información se actualizaron los limites entre las formaciones San Luis-Patiecitos y Guarabal-San Luis expuesto por SANDIA (1981) para la zona de estudio.

## 6.2. Recomendaciones

- Hacer un estudio mas amplio de la Formación San Luis, respecto a todas las zonas que la comprenden, para ser incluidas en la clasificación de facies propuestas en este trabajo.
- Realizar el estudio de Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) a través de secciones finas pulidas, para así poder adquirir imágenes más óptimas que las obtenidas a través de un taco pulido.
- Para las muestras estudiadas sería de gran utilidad hacer un estudio por medio de la técnica de Espectroscopia Óptica con Plasma inductivamente acoplado (ICP-OES), y de esta manera determinar los elementos no obtenidos por Fluorescencia de rayos X y Absorción Atómica, debido a que sus límites de detección son más bajos.

**BIBLIOGRAFÍA****Abreviaturas:**

**AAPG:** American Association of Petroleum Geologists

**GEOS:** Revista Venezolana de Ciencias de La Tierra

**UCV-TEG:** Trabajo Especial de Grado, Departamento de Geología, Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela. Inédito.

**UCV-TA:** Trabajo de Ascenso, Departamento de Geología, Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela. Inédito.

**USB-TEG:** Trabajo Especial de Grado, Universidad Simón Bolívar. Inédito.

ARCHE, A. (1992). *Sedimentología*. Vol ii. Consejo superior de investigaciones científicas, Madrid, 543 p.

AUDEMARD, F. (1995). *La cuenca terciaria de Falcón, Venezuela noroccidental, síntesis estratigráfica génesis e inversión tectónica*. Ponencia presentada en el IX congreso latinoamericano de geología, Caracas

ARELLANO, R Y UMÉREZ, J. (2004). *Interpretación estructural y restauración de dos secciones del flanco norte de la Sierra de San Luis ubicadas entre el Río Mitare y la carretera Coro-Cruz de Taratara*, Estado Falcón. UCV - TEG.

BARITTO T., IVÁN J. 2003. *Caracterización química de muestras de sedimentos superficiales y de núcleos de la fachada atlántica venezolana*. UCV-TEG.

BOESI, T.; GODDARD, D. (1991). *A new geologic model related to the distribution of hydrocarbon source rocks in the Falcón basin, northwestern Venezuela*. AAPG memoir, 52, p.303-319

CASTRO, E Y PASTOR, P (1981). *Geología de una región al sur del Embalse El Isiro, Distrito Miranda, estado Falcón*. TEG-UCV.

DÍAZ DE GAMERO, M. (1976). *Estratigrafía y micropaleontología del Oligoceno y Mioceno inferior del centro de la cuenca de Falcón, Venezuela*. UCV-TA.

- DÍAZ DE GAMERO, M. (1977). *Estratigrafía y micropaleontología del Oligoceno y Mioceno inferior del centro de la cuenca de Falcón Venezuela*, GEOS 22: 2-50
- DÍAZ DE GAMERO, M.L. (1989). *El mioceno medio y temprano de Falcón Septentrional*. GEOS (29): 25-35.
- EMBRY, AF, AND KLOVAN, JE, (1971). *A Late Devonian reef tract on Northeastern Banks Island, NWT*: Canadian Petroleum Geology Bulletin, v. 19, p. 730-781
- FUENTES. X ET AL. (1998). *Bioquímica clínica y patología molecular*. Barcelona, ed. Reverté, 604 p.
- GONZALES, C. (2009). Universidad de Salamanca: *espectrofotometría de absorción atómica*. [En línea] [http://ocw.usal.es/ciencias-experimentales/analisis-aplicado-a-la-ingenieria-quimica/contenidos/course\\_files/tema\\_5.pdf](http://ocw.usal.es/ciencias-experimentales/analisis-aplicado-a-la-ingenieria-quimica/contenidos/course_files/tema_5.pdf). Última modificación 09/03/2009 14:09
- GONZÁLEZ DE JUANA, C.; ITURRALDE, J & PICARD, X. (1980). *Geología de Venezuela y de sus cuencas petrolíferas*. Caracas, editorial Foninves, ii, 624p.
- GONZÁLEZ, P. (2009). *Control sedimentológico y análisis de facies litológicas de las formaciones Socorro y Caujarao, Campo la Vela, Estado Falcón*. UCV-TEG.
- KITANIDIS, P. (1997). *Introduction to geostatistics: applications in hydrogeology*. New York, Cambridge University Press. 249 p.
- KRUMBEIN, C & GARRELS, M. (1952). *Origin and classification of chemical sediments in terms of Ph and oxidation-reduction potentials*. J.Geol., 60, 1-33.
- LEAL, F. & RIVERO, O. (2004). *Estudio de litofacies y quimioestratigrafía de la sección superior de la formación el paraíso como herramienta para determinar posibles características de potencialidad generadora y/o almacenadora de hidrocarburos en la sección geológica del Río Paraíso*. UCV-TEG.
- MACELLARI, C. (1995). *Cenozoic sedimentation and tectonics of the southwestern caribbean pull-apart basin, venezuela and colombia*, in a. J. Tankard, R. Suárez S., and H.J. Welsink, *petroleum basins of south america*: AAPG memoir (62): 757- 780.
- MARTÍNEZ D., GIL O., BARON A. *Espectrometría de fluorescencia de rayos X*. Revista colombiana de física., vol. 38, no. 2. 2006 790. Disponible: [http://calima.univalle.edu.co/revista/vol38\\_2/articulos/pdf/3802790.pdf](http://calima.univalle.edu.co/revista/vol38_2/articulos/pdf/3802790.pdf). (Consulta 2012, agosto 15).



- MÉNDEZ, J (2.009). *Carbonatos. Origen y sedimentación. En imprenta, volumen 1, instituto de ciencias de la tierra.* Universidad Central de Venezuela.
- MENÉNDEZ, S (2005). *Los primeros organismos bioconstructores de la historia de la vida en la tierra: esos grandes desconocidos.* Enseñanza de las Ciencias de la Tierra, Madrid. 127-137 pp.
- MONTAÑO, M. (2007). *Modelo flexural de la cuenca de falcón con espesor elástico efectivo constante y variable espacialmente.* USB-TEG.
- MUESSIG, K. (1978). *The central falcón igneus suite, venezuela; alkaline basaltic intrusions of Oligocene- Miocene age.* 8va. Conferencia geológica del caribe. Antillas Holandesas.
- MUESSIG, K. (1984). *Structure and cenozoic tectonics of the falcón basin, venezuela and adyacent areas, in w. E. Bonini, R. B. Hargraves and Shagam, Eds. The caribbean-south american plate boundary and regional tectonics: GSA memoir (162): 217-230.*
- NÚÑEZ L., O.G (1982). *Geología sedimentaria de una zona ubicada al sur de la Sierra San Luis Distrito Bolívar- Estado Falcón.* UCV-TEG
- OSTOS, M. (1990). *Evolución tectónica del margen sur-central del caribe, basado en datos geoquímicos.* GEOS #30. P:1-294.
- PESTMAN, P., ET AL, (1998). *Marco tectono-estratigráfico y paleogeográfico de la cuenca de maracaibo y áreas vecinas durante el paleógeno.* Boletín de la sociedad Venezolano de Geólogos, v. 23, p.28-45.
- ROLLINSON H. (1993). *Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation.* Longman scientific & technical, New York, 352 p.
- SANDIA, A (1981). *Geología sedimentaria de una sección oligomiocena al norte de la serranía de San Luis, Distrito Miranda y Bolívar, Estado. Falcón.* UCV-TEG.
- SILVA, M (2005). *Revisión, compilación y actualización geológica (litoestratigráfica) de una zona comprendida entre las coordenadas utm: n 1.253.000- n 1.216.000 y e 319.000 – e 445.000, Estado Falcón.* UCV-TEG.
- SKOOG, D ET AL. (2001). *Fundamentos de química analítica.* Barcelona, ed. Reverté, 604 p.

SKOOG, D ET AL. (2008). *Principios de análisis instrumental*. México, Cengage learning, 1038 p.

SOLORZANO, V (2005). *Estratigrafía de la formación Querecual, isla Chimana Grande, Estado Anzoátegui*. UCV-TEG.

TUCKER, E & WRIGHT, P (2001). *Carbonate sedimentology*. Blackweel. Scientific Publication. II Edición. Oxford.

WALTON, H & JORGE REYES. (2005). *Análisis químico e instrumental moderno*. Barcelona, ed. Reverté, 391 p.

WILSON, J. L. (1975). *Carbonate facies in Geologic History*. Springer-Verlag. 471 p.

ZAPATA, E. (1983). *Manual de petrografía y diagénesis de rocas carbonáticas*. En: GEOS # 28, 3-139.

### Referencias electrónicas

Universidad de Alicante: espectroscopia de emisión y absorción atómica. [En línea]. <http://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/8252/4/t7abasc.pdf>. Consultada el 6 de marzo de 2012.

Universidad de Salamanca. Léxico estratigráfico. [En línea] <http://www.pdv.com/lexico>. Consultada el 6 de marzo de 2012.

Tecnológico de Monterrey. [En línea]

[http://www.mty.itesm.mx/dia/deptos/im/m00-862/Lecturas/SEM\\_ICP.pdf](http://www.mty.itesm.mx/dia/deptos/im/m00-862/Lecturas/SEM_ICP.pdf). Consultado el 6 de marzo de 2012.

Tecnológico de Monterrey. [En línea]

[http://www.ua.es/es/investigacion/sti/servicios/analisis\\_instrumental/analisis/icp\\_oes.html](http://www.ua.es/es/investigacion/sti/servicios/analisis_instrumental/analisis/icp_oes.html). Consultado el 6 de marzo de 2012.

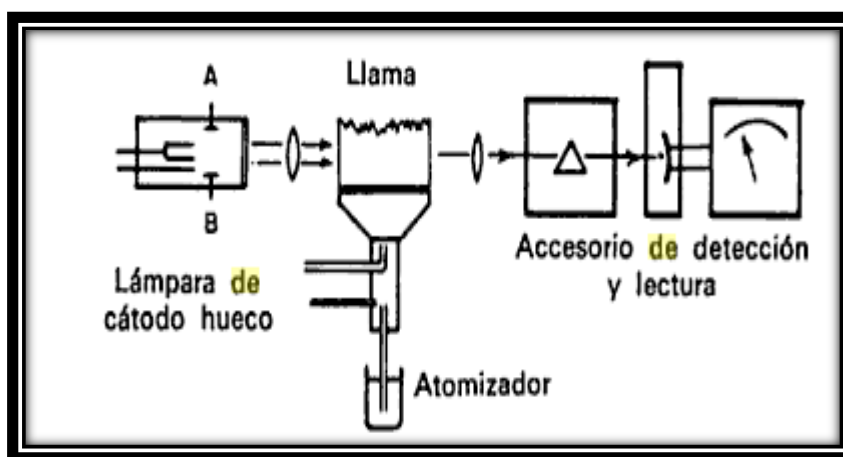
Universidad de Alicante. [En línea]

[http://www.ua.es/es/investigacion/sti/servicios/analisis\\_instrumental/microscopia/sem.html](http://www.ua.es/es/investigacion/sti/servicios/analisis_instrumental/microscopia/sem.html). Consultado el 6 de marzo de 2012.

## APÉNDICE 1

## 1.1. Espectrometría Absorción atómica

La absorción atómica es un método para la detección y determinación de elementos químicos, particularmente de elementos metálicos. Los compuestos, para su examen, se tienen que romper en los átomos que los constituyen. Ello se realiza por pulverización en una llama a alta temperatura, según el siguiente esquema de la figura 104.



**Figura 104.** Esquema básico de un espectrofotómetro de absorción atómica. Tomado de Walton y Reyes (2005).

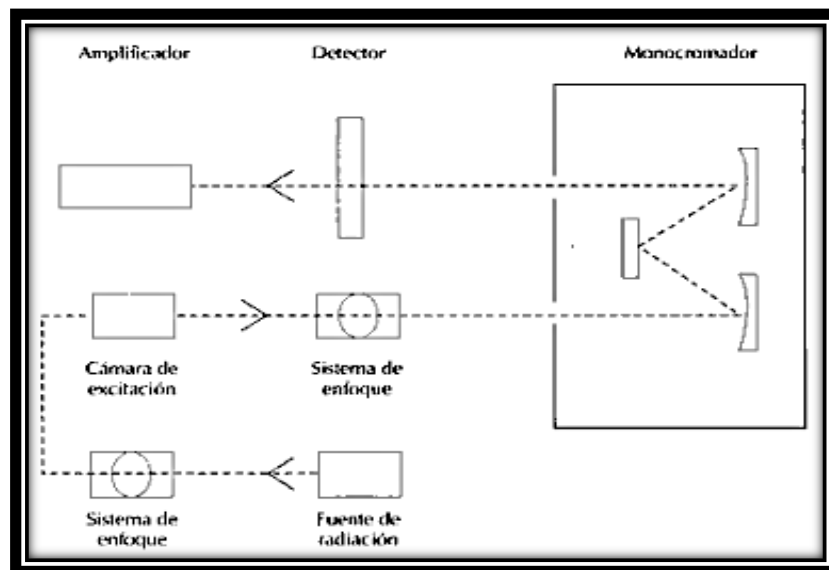
Un rayo luminoso de una cierta longitud de onda, producido por un tipo especial de lámpara, se dirige a lo largo del eje longitudinal de una llama plana y hacia un espectrofotómetro. Simultáneamente, la solución de la muestra es dispersada formando una niebla de gotitas muy finas que se evaporan en la llama dando inicialmente la sal seca y luego el vapor de la sal, el cual se disocia, por lo menos en parte, en átomos del elemento que se desea determinar. (WALTON Y REYES, 2005).

Los instrumentos para espectrometría de absorción atómica constan de una fuente de radiación, un soporte de muestra, un selector de longitud de onda, un detector y un

procesador de señal y lectura. El soporte de muestra es la celda del atomizador que contiene la muestra gaseosa atomizada. (SKOOG ET AL. 2008).

Los métodos de absorción son muy específicos debido a que las líneas de absorción atómicas son notablemente estrechas (0,002 a 0,005 nm) y porque las energías de transición electrónicas son únicas para cada elemento. (SKOOG ET AL., 2008).

- **Fuentes de radiación:** debe cumplir con las siguientes características:
  - ✓ Proporcionar una radiación de longitud de onda exacta. Teóricamente esta debe ser la de la longitud de onda de emisión mas fácilmente detectable o bien la más específica de aquel elemento cuya concentración se desea medir.
  - ✓ Proporcionar una radiación de ancho de banda adecuada. Es decir, el intervalo de longitudes de onda proporcionado por la fuente de radiación debe ser estrecho respecto a la amplitud de la banda de absorción del elemento a medir, para obtener una función de medida lineal.
  - ✓ Proporcionar una radiación de potencia radiante adecuada y constante.



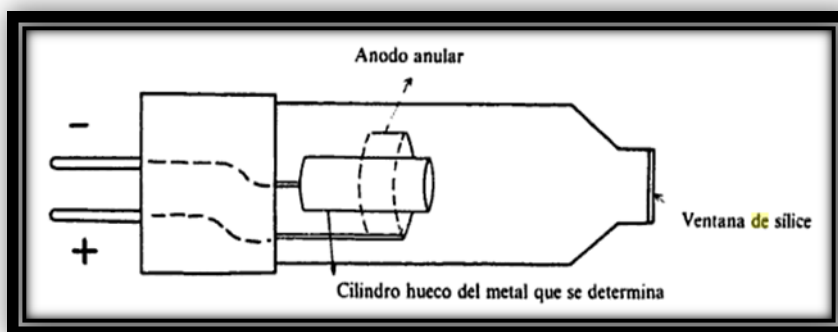
**Figura 105.** Esquema del trayecto por el haz óptico en la espectrometría de absorción atómica. Tomado de (Universidad de Alicante, 2008).

Existen varias fuentes de radiación, las cuales son:

- **Fuentes lineales o fuente de dispersión discontinua:** Son capaces de suministra una radiación electromagnética de una amplitud de banda muy pequeña, de manera que si fuese recogida por un detector aparentaría ser una línea espectral. La longitud de onda de la radiación es la que corresponde a una transición electrónica determinada, que desea medir. Debido a su elevada precisión, las fuentes de radiación de elección son las de tipo lineal , y pueden obtenerse mediante los dos tipo de lámpara que se describen a continuación: (FUENTES ET AL., 1998)

✓ **Lámparas de cátodo hueco**

La estructura de una lámpara de cátodo hueco se representa en la figura 106. El cátodo hueco y el filamento anódico van montados uno junto al otro en el interior de un tubo de vidrio en cuyo extremo terminal esta soldada una ventana de cuarzo fundido, siendo esta así debido a que casi todas las líneas espectrales útiles se hallan en el ultravioleta, además el tubo está lleno de argón o de neón a presión reducida. (WALTON Y REYES, 2005).



**Figura 106.** Lámpara de cátodo hueco. Tomado de Walton y Reyes (2005).

El cátodo está construido del metal cuyo espectro se desea obtener, o sirve para soportar una capa de ese metal. La ionización del gas inerte ocurre cuando una

diferencia de potencial del orden de 300V se aplica en los electrodos, lo cual genera una corriente de unos 5 a 15 mA cuando los iones y electrones migran a los electrodos. Si el voltaje es lo suficientemente grande, los cationes gaseosos adquieren suficiente energía cinética para disolver algunos de los átomos metálicos de la superficie del cátodo y producir una nube atómica en un proceso llamado chisporroteo. Una parte de los átomos metálicos desprendidos están en estados excitados y por tanto emiten su radiación característica cuando vuelven al estado basal. Para finalizar, los átomos metálicos se difunden de nuevo a la superficie del cátodo o a las paredes de vidrio del tubo y son re-depositados. (SKOOG ET AL. 2008).

El hecho de que los diferentes elementos tengan que ser determinados de uno en uno, hace que la absorción atómica sea una técnica de análisis cuantitativo, no siendo efectiva para la identificación de los elementos presentes en una muestra.

Ordinariamente, para cada elemento se utiliza una lámpara, si bien, se han comercializado lámparas de cátodo hueco multi-elementales. Estas lámparas se construyen con aleaciones de diferentes metales, procurando que tengan similares puntos de fusión y volatilidad, como por ejemplo, Ca/Mg, Ag/Au, Cu/Pb/Zn, Co/Cr/Cu/Fe/Mn/Ni.

La eficiencia de las lámparas de cátodo hueco depende de su forma y del voltaje de operación. Los voltajes altos y, por tanto, las corrientes altas, dan lugar a mayores intensidades.

Es importante darse cuenta de que no todas las líneas emitidas por la lámpara de cátodo hueco son absorbidas por los átomos presentes en la llama. Estos se hallan casi todos en su estado fundamental, es estado de mínima energía. Por tanto, solamente pueden ser absorbidas las líneas de emisión que correspondan a transiciones desde el estado fundamental. Los cuantos de luz que corresponden a transiciones de un estado excitado a otro, no serán absorbidos en la llama. Las líneas de emisión originadas por aquellas transiciones en las que interviene el estado fundamental de un átomo se denominan líneas de resonancia.

✓ Lámparas de descarga sin electrodos.

Consisten en un tubo de cuarzo herméticamente cerrado conteniendo unos pocos miligramos del elemento de interés y un gas inerte a baja presión. La activación se lleva a cabo mediante un campo intenso de radiofrecuencias (100 kHz – 100 MHz) o radiación de microondas (>100 MHz). Cuando opera, el gas noble se ioniza, y los iones producidos son acelerados por el campo de radiofrecuencia hasta que adquieren la energía suficiente para excitar a los átomos del metal. (UNIVERSIDAD DE SALAMANCA, 2005).

Son fuentes de espectros de líneas atómicas y proporcionan intensidades radiantes de por lo general uno o dos ordenes de magnitud mayores que las lámpara de cátodo hueco. Su rendimiento no es tan confiable como el de la lámpara de cátodo hueco, pero para elementos como el Se, As, Cd y Sb están lámparas de descarga sin electrodos para los mencionados elementos tienen mas intensidad que las lámparas de cátodo hueco y, por tanto, son bastantes útiles para identificar tales elementos (SKOOG ET AL., 2008).

➤ **Fuentes continuas**

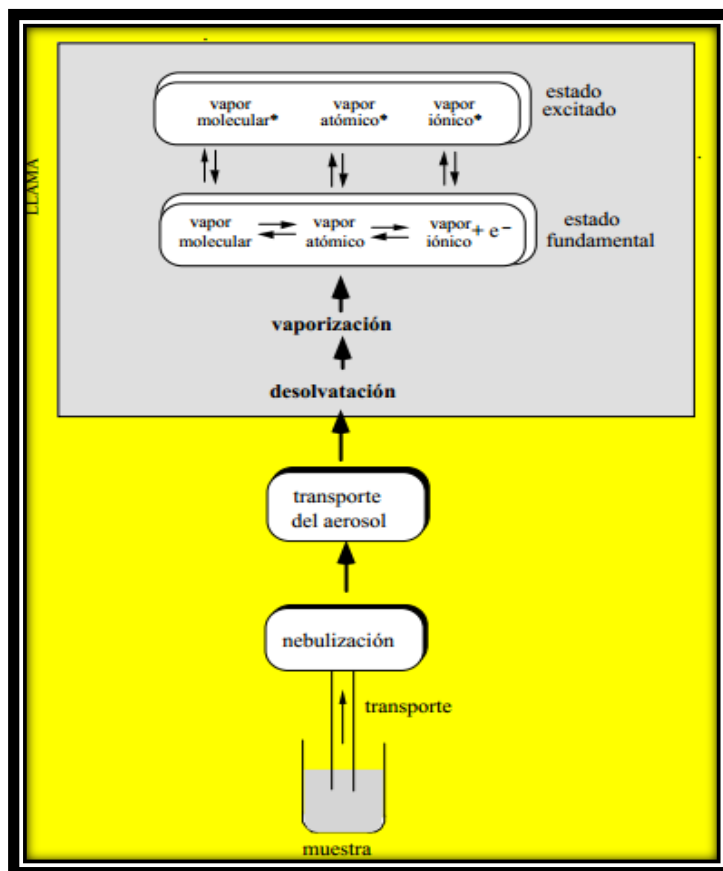
Las fuentes de radiación continuas producen una radiación que abarca un amplio intervalo de longitudes de onda, con potencias radiantes variables para cada longitud. Se utilizan en espectrometría de absorción atómica para corregir el ruido de fondo, tanto en caso de que se utilice una llama como fuente de excitación, como en caso de emplearse métodos electro- térmicos. La fuente de radiación continua debe ser capaz de producir un espectro que incluya tanto el ultravioleta como el visible. Suelen emplearse:

- ✓ Lámpara de descarga de deuterio
- ✓ Lámpara de descarga de alta presión. Habitualmente xenón o xenón y mercurio. (FUENTES ET AL, 1998)



- **Interferencias:** Existen dos tipos de interferencia en los métodos de absorción atómica, lo cuales son:
- ✓ Interferencias espectrales: se presentan cuando partículas procedentes de la atomización dispersan la radiación incidente de la fuente, o bien cuando la absorción o emisión de una especie interferente se solapa o esta tan cerca de la longitud de onda del analito que no puede separarlas el monocromador. Puede darse una interferencia de este tipo si la separación entre dos líneas es del orden de 0,01 nm. También puede darse debido a la presencia de productos moleculares de combustión, que presentan bandas anchas de absorción, o de partículas que dispersan la radiación. Ambos disminuyen la potencia de haz transmitido y originan errores por exceso en el análisis. (SKOOG ET AL. 2001).
  - ✓ Interferencias químicas: pueden producirse errores debidos a diferentes propiedades fisicoquímicas de la muestra y de las sustancias implicadas como patrones. La diferente viscosidad, densidad, etc., produce nebulizaciones y vaporizaciones distintas para cada disolución. La composición de las muestras y materiales de calibración deben ser lo mas similares posibles, para minimizar el error. (FUENTES ET AL, 1998).
  - ✓ Interferencias físicas: Efectos causados por las propiedades físicas de la muestra en disolución.
  - ✓ Interferencia por efecto de matriz: Debidas a la influencia que tiene el entorno que rodea a los átomos en estado fundamental que se pretende analizar.
  - ✓ Interferencias por absorción inespecíficas: Se presenta un aumento de la señal originado por la dispersión de las radiaciones de la lámpara.
  - ✓ Interferencias por ionización: Debida a que parte de los átomos pasan al estado excitado. Para evitar al máximo estas interferencias habrá que optimizar el equipo eligiendo las condiciones más adecuadas para cada elemento. (UNIVERSIDAD DE ALICANTE, 2008).

- **Atomizadores con llama:** Su función es convertir los átomos combinados de la muestra en átomos en estado fundamental, para ello es necesario suministrar a las muestras una cantidad de energía suficiente para disociar las moléculas, romper sus enlaces y llevar los átomos al estado fundamental (UNIVERSIDAD DE ALICANTE, 2008).



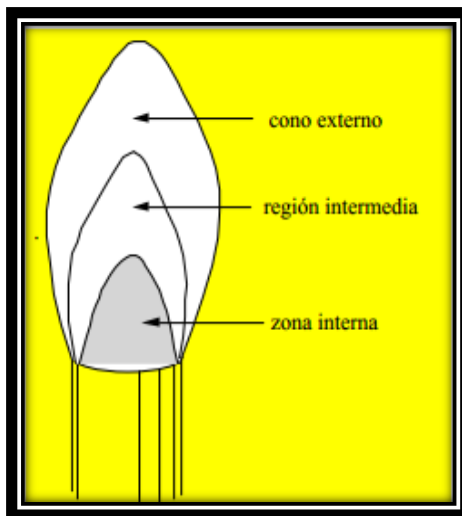
**Figura 107.** Componentes para obtener los átomos en estado fundamental. Tomado de (Universidad de Salamanca, 2005)

Los componentes necesarios para obtener los átomos en estado fundamental son:

- ✓ Nebulizador: cuya misión es convertir la muestra aspirada en una nube de tamaño de gota muy pequeño.
- ✓ Transporte del aerosol. Esta etapa tiene como finalidad asegurar que solamente lleguen hasta la llama las gotitas de tamaño adecuado. Esto se consigue mediante bolas de impacto, tabiques deflectores, etc, con los que se

pretende eliminar las gotitas de mayor tamaño producidas en la nebulización (Fig. 117). Antes de pasar a describir los procesos que tienen lugar en el interior de la llama, es necesario considerar algunas de sus propiedades más importantes.

- ✓ La llama es el medio de aporte de energía a la muestra. Entre las llamas se diferencia entre la de aire-acetileno y la de óxido nitroso-acetileno. Como puede observarse en la figura 108, en la llama se pueden distinguir tres zonas:
  - La zona interna: es la más próxima al mechero, de color azul y con temperatura relativamente baja.
  - La región intermedia: donde se produce la atomización.
  - Cono externo: Es la parte más fría de la llama.



**Figura 108.** Zonas de llama. Tomado de Universidad de Salamanca

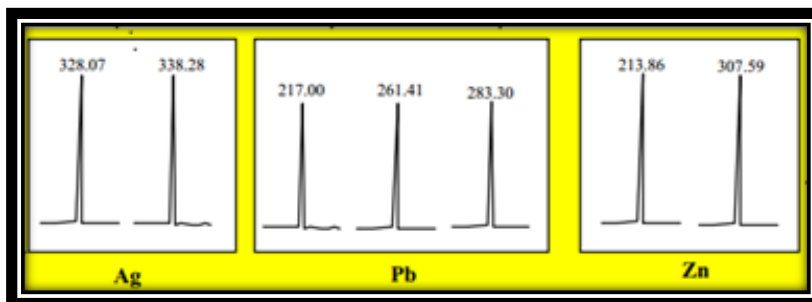
### ➤ Detectores

Miden la intensidad de la radiación antes y después de la absorción por la muestra. A partir de los valores obtenidos se podrá calcular la radiación absorbida. En los aparatos comerciales se emplean tubos fotomultiplicadores (UNIVERSIDAD DE ALICANTE, 2008).

### ➤ **Modulación de la fuente**

En una medida de absorción atómica es necesario discriminar entre la radiación de la lámpara de cátodo hueco o de descarga sin electrodos y la radiación procedente de la llama. Gran parte de esta última es eliminada por el monocromador, que se coloca entre la llama y el detector. (SKOOG ET AL., 2001)

La única finalidad del monocromador es aislar la línea de resonancia del elemento de interés. Para la mayor parte de los elementos, el problema suele ser sencillo, pues las diferentes líneas suelen estar bastante separadas, como se muestra en la figura 109, donde se representan las líneas más características de los elementos Ag, Pb y Zn. Ello hace que no sea necesario un monocromador de muy alta resolución, y, en consecuencia, no demasiado costoso, siendo éste uno de los factores que han contribuido a que la técnica sea muy utilizada en la práctica ordinaria del análisis. Las anchuras de rendija juegan un papel importante, al determinar la fracción del espectro que incide en el detector. La rendija deberá ser lo más estrecha posible, con objeto de reducir la cantidad de radiación emitida por la llama que llega al detector. Algunos instrumentos comerciales están provistos de dos tipos de rendijas, para usarlas con llama o con atomización electrotérmica respectivamente. (UNIVERSIDAD DE SALAMANCA, 2005)



**Figura 109.** Longitudes de onda de líneas de absorción. Tomado de Universidad de Salamanca.

La excitación térmica de una fracción de los átomos de analito en la llama produce radiación de la misma longitud de onda a la que se ajusta el monocromador y

puesto que esta radiación no se elimina, constituye una fuente potencial de interferencia. (SKOOG ET AL. 2001)

- **Sistema óptico:** Su función es conducir las radiaciones emitidas por la lámpara a través del sistema de obtención de átomos en estado fundamental y el monocromador hasta llegar al detector. El sistema óptico está formado por:
  - ✓ Espejos y lentes, que focalizan sobre la llama la mayor cantidad de energía emitida por la lámpara y la sitúan a la entrada del monocromador.
  - ✓ Láminas planoparalelas, que se utilizan para aislar los demás elementos del exterior.
  - ✓ Rendijas que se sitúan una a la entrada para obtener un haz paralelo y estrecho procedente de la lámpara y otra a la salida para seleccionar la longitud de onda adecuada eliminando el resto de las emisiones.

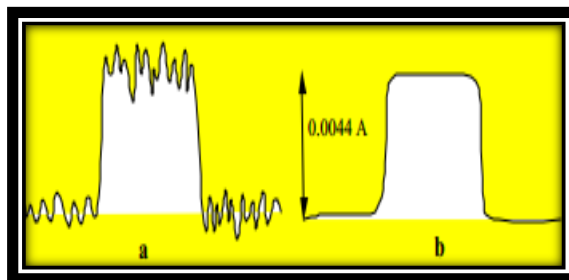
De acuerdo con el sistema óptico, los aparatos de absorción atómica pueden ser de doble haz y de haz simple. En los aparatos de doble haz parte de la radiación pasa a través de la muestra y otra parte va directamente al detector. Estos equipos presentan la ventaja de que las variaciones de la intensidad de la fuente de radiación son compensadas automáticamente. Sin embargo estos aparatos son más caros que los de haz simple (UNIVERSIDAD DE ALICANTE, 2008).

➤ **Aplicaciones:**

La espectroscopia de absorción atómica se ha usado para analizar trazas de muestras geológicas, biológicas, metalúrgicas, vítreas, cementos, aceites para maquinaria, sedimentos marinos, farmacéuticos y atmosféricos. Las muestras líquidas generalmente presentan pocos problemas de pretratamiento; entonces todas las muestras sólidas son primero disueltas. Las muestras gaseosas son casi siempre pretratadas extrayendo el analito por burbujeo del gas en una solución y analizando entonces esa solución, o absorbiendo los analitos en una superficie sólida y poniéndolo entonces en solución por lixiviación con los reactivos apropiados (UNIVERSIDAD DE ALICANTE, 2008).

Para caracterizar las medidas de absorción atómica suelen utilizarse los dos parámetros siguientes: sensibilidad y límite de detección. La sensibilidad se define como la concentración en solución del elemento a determinar que origina una absorbancia de 0.00444 (1% de absorción) unidades a la longitud de onda usada, respecto al disolvente. También puede considerarse como la pendiente del calibrado en su región lineal. Así, la sensibilidad es una medida del tamaño de la señal de absorción.

Por su parte, el límite de detección suele tomarse como la concentración de elemento que produce una señal dos o tres veces la raíz cuadrada del valor medio del ruido de fondo. En otros términos, es la más baja concentración que estadísticamente puede distinguirse del cero (blanco). La distinción entre estos términos se ilustra en la figura 110. Las señales mostradas presentan la misma sensibilidad, pero el límite de detección es más favorable en **b** (UNIVERSIDAD DE SALAMANCA, 2005).



**Figura 110.** Sensibilidad y límites de detección. Tomado de (Universidad de Salamanca, 2005)

### ➤ Métodos

Para el análisis de una muestra, lo primero que habrá que hacer será poner las condiciones específicas del elemento que vamos a analizar. Estas condiciones vienen especificadas por el fabricante.

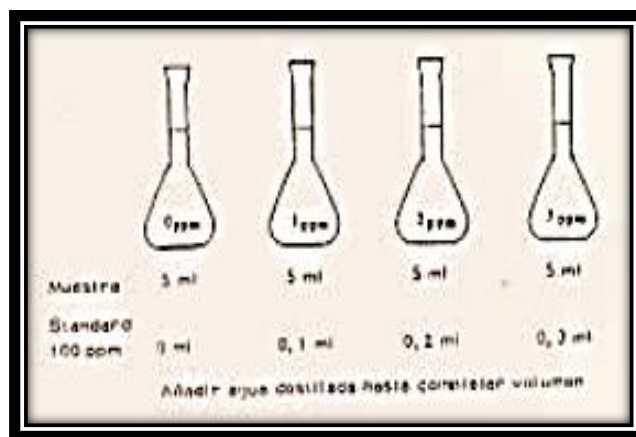
Una vez elegidas las condiciones de trabajo para el elemento en cuestión habrá que calibrar el aparato. Para ello se pueden seguir dos procedimientos, la realización de una curva de calibrado o bien el método de adición.

### ✓ Curva de calibrado

Se utilizan soluciones patrones, que contienen el elemento a determinar de concentraciones conocidas. Se representan la absorbancia de cada solución patrón frente a la concentración. Se procura trabajar en el intervalo lineal de la curva. Una vez obtenida la curva patrón, se atomiza la muestra problema y se mide la absorción de la misma, utilizando idénticas condiciones a las usadas cuando se preparó la curva patrón. De la medida de la absorbancia del problema se puede determinar su concentración a partir de la curva de calibrado por extrapolación.

### ✓ Método de adición

Este método se emplea cuando existen interferencias. El método consiste en añadir un volumen conocido de la muestra problema a cuatro matraces aforados (Fig. 111). Al primer matraz no se le añade nada. Al segundo se le añade por ejemplo 1 ppm. Al tercer matraz se le añade un volumen doble del mismo patrón, de forma que contenga una concentración añadida de 2 ppm. Y al cuarto matraz se le añade 3ppm

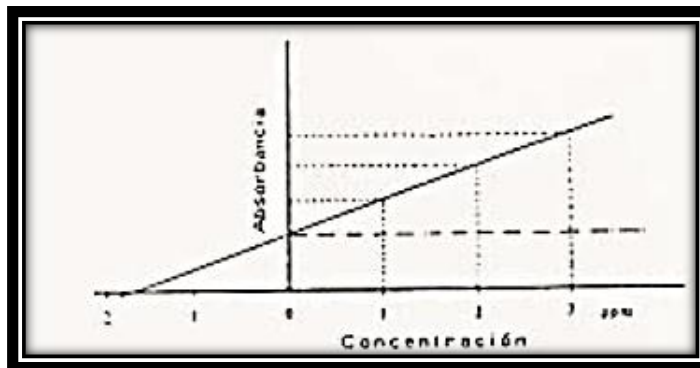


**Figura 111.** Método de adición. Tomado de (Universidad de Alicante, 2008).

Una vez hecho esto, se procede a realizar las medidas de absorbancia de cada matraz. El primer matraz dará una lectura, el segundo matraz dará la misma lectura que el anterior más la señal propia de 1 ppm. Extrapolando sobre el eje negativo de las X se encuentra el valor de la concentración de la muestra desconocida. Para que



este método sea válido se debe obtener una curva de calibrado perfectamente recta como se muestra en la figura 112.



**Figura 112.** Método de adición. Tomado de (Universidad de Alicante, 2008).

➤ **Ventajas**

- Puede analizar hasta 82 elementos de forma directa.
- Sus límites de detección son inferiores a la ppm.
- Tiene una precisión del orden del 1% del coeficiente de variación.
- La preparación de la muestra suele ser sencilla.
- Tiene relativamente pocas interferencias.
- Su manejo es sencillo.
- El precio es razonable.
- Existe abundante bibliografía.

➤ **Desventajas**

- Sólo pueden analizarse las muestras cuando están en disolución
- Tienen diferentes tipos de interferencias.
- Solo pueden analizar elementos de uno en uno.
- No se pueden analizar todos los elementos del Sistema Periódico.
- Por ser una técnica de absorción, sus curvas de calibrado sólo son lineales en un corto rango de concentración. (UNIVERSIDAD DE ALICANTE, 2008).

## 1.2. Fluorescencia de rayos X

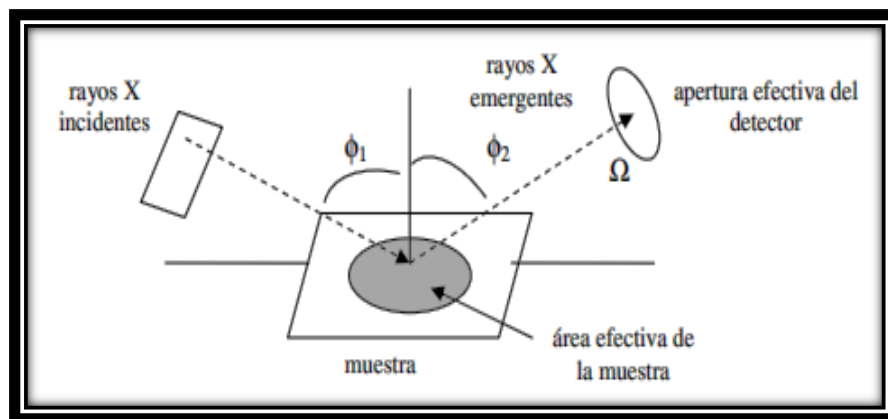
Según SKOOG (2008) la espectrometría de fluorescencia por rayos X es una de las herramientas más potentes para la rápida determinación cuantitativa de todos los elementos, excepto los más ligeros, en muestras complejas, con la adecuada corrección de los efectos de la matriz.



**Figura 113.** Equipo de Fluorescencia de Rayos X. Fotografía tomada por Andreina Fernández.

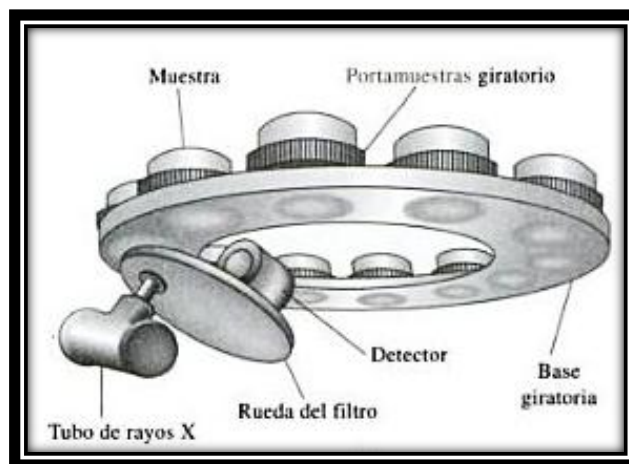
La fluorescencia de rayos X (FRX) es una técnica espectroscópica que utiliza la emisión secundaria o fluorescente de radiación X generada al excitar una muestra con una fuente de radiación X. La energía absorbida por los átomos de la muestra genera la producción de rayos X secundarios, ó de fluorescencia emitidos por la muestra. Estos rayos X secundarios tienen una intensidad proporcional a la concentración de cada elemento de la muestra, por ello, al cuantificar esta radiación se determina la cantidad de cada elemento presente en la muestra. Ello se debe a que la radiación X incidente o primaria expulsa electrones de capas interiores del átomo. Los electrones de capas más externas ocupan los lugares vacantes, el exceso energético resultante de esta transición se disipa en forma de fotones, radiación X fluorescente o secundaria, con una longitud de onda característica que depende del gradiente energético entre los orbitales electrónicos implicados y, una intensidad directamente relacionada con la concentración del elemento en la muestra. (MARTINEZ ET AL, 2006)

El bombardeo de los átomos con fotones de energía suficientemente alta hace que los electrones de las órbitas internas de los átomos salten al exterior. Este proceso se llama efecto fotoeléctrico y genera la formación de un ión positivo atómico. Los electrones de las orbitas externas de este ión se desplazan a ocupar la vacante en orbitas internas, así el exceso de energía se libera en forma de un fotón de rayos X secundario. De esta manera se inicia una serie de desplazamientos de electrones de las órbitas externas a las internas. Los detectores de rayos X recogen todos los fotones emitidos por muestra y analizan sus energías. La energía de fotones secundarios emitidos por la muestra es única para los átomos que la componen. Al ser energías de los distintos niveles electrónicos características para cada tipo de átomos, la radiación X emitida será característica para cada elemento, y en principio, no dependerá de la sustancia química en la que se encuentre, ya que, en general, estas radiaciones están originadas por transiciones entre los niveles electrónicos internos, cuyas energías no se ven afectadas por el tipo de enlace existente. Analizando la intensidad de diferentes líneas presentes en espectro de rayos X emitidos por muestra se puede identificar la composición atómica de la muestra. Existen tres tipos básicos de instrumentos de fluorescencia de rayos X: los dispersivos de longitud de onda, los dispersivos de energías y los no dispersivos. (MARTINEZ ET AL, 2006)



**Figura 114.** Geometría de excitación de la muestra y detección de la radiación característica. (MARTINEZ ET AL, 2006)

Los componentes básicos de un equipo de fluorescencia de rayos X se muestran en la figura 115, y son: una fuente productora de rayos X, que se hacen incidir sobre la muestra a analizar, un detector de la radiación dispersada, así como también un portamuestras y diversos componentes electrónicos para discriminar la energía.



**Figura 115.** Portamuestras giratorio. (MARTINEZ ET AL, 2006)

#### ➤ Fuente

La fuente productora de rayos X que normalmente se utiliza es el tubo de rayos X el cual consta básicamente de un recipiente a alto vacío en el que se encuentra un filamento de wolframio que al ser calentado eléctricamente emite un haz de electrones que se hace incidir sobre un ánodo (anticátodo) metálico (Cu, Mo, Ag, Fe, Co, etc). Como consecuencia de la interacción, y si la energía del haz es lo suficientemente grande, se produce la emisión de rayos X característicos del material que constituye el ánodo. Dicha energía depende del potencial de aceleración entre el ánodo y el filamento. En determinadas condiciones solo se produce un espectro continuo, originado por el frenado de los electrones al colisionar con los átomos del blanco. En cada colisión el electrón se desacelera, perdiendo energía que emite en forma de fotones. La energía de estos fotones varía de forma continua en un cierto intervalo.

➤ Detectores

Los detectores más utilizados para las radiaciones X utilizan sistemas de ionización de gases, contadores de centelleo o semiconductores.

El contador Geiger consiste en un tubo conteniendo un gas inerte (Ar) y un filamento central que actúa como ánodo a un potencial de 90 a 2500 V el cual penetra en el tubo y se produce la ionización del gas, originándose electrones, que emigran hacia el electrodo central, produciendo en su camino la ionización de nuevos átomos del gas noble, dando como resultado una avalancha de electrones que llega al filamento central, dando lugar a una corriente eléctrica fácilmente medible.

Los contadores proporcionales son similares a los Geiger; su principal diferencia es que contienen gases nobles pesados (Xe ó Kr), más fácilmente ionizables que el argón y, en consecuencia, pueden operar a voltajes inferiores.

El contador de centelleo se basa en la propiedad que poseen los rayos X de producir fotones cuando inciden sobre algunas sustancias, tales como yoduro sódico dopado con talio. Los fotones luminosos emitidos se transforman en impulsos eléctricos mediante un tubo fotomultiplicador asociado al detector.

Finalmente, puede utilizarse un sólido semiconductor como sistema de detección para los rayos X. En este detector, los electrones producidos por el bombardeo de rayos X se promocionan hasta las bandas de conducción, originando una corriente, proporcional a la energía de los rayos X incidentes.

La fluorescencia de rayos X puede aplicarse al análisis cualitativo y cuantitativo de una gran variedad de muestras tales como cenizas, minerales, materiales cerámicos, metales y aleaciones. Las muestras pueden ser sólidas o estar disueltas. En este caso los disolventes no deben contener átomos pesados. Cuando se trate de sólidos suele ser aconsejable pulverizar la muestra y los patrones hasta conseguir el mismo tamaño. Asimismo, es conveniente prensar las muestras pulverizadas, o bien, llevar a cabo una fusión con bórax.

El análisis cualitativo se basa en la identificación de los picos del espectro obtenido haciendo girar lentamente el soporte donde va colocado el cristal analizador. Conociendo el parámetro  $d$  del cristal analizador y el ángulo de incidencia de los rayos X, es posible obtener la longitud de onda de los rayos X.

Para el análisis cuantitativo, se elige un pico de máxima intensidad, y mínimo ruido de fondo y se cuentan los impulsos durante un tiempo suficientemente grande para conseguir una precisión satisfactoria. El calibrado se lleva a cabo utilizando muestras patrón de composición virtualmente igual a la del problema, lo cual no siempre es factible. Con frecuencia se recurre al método de adición estándar y, sobre todo, al del patrón interno.

Las ventajas indicadas BARITTO (2003) son:

- ✓ Una adecuada sensibilidad absoluta y relativa, las cuales la hacen comparable en su alcance con otras técnicas analíticas potentes.
- ✓ Gran versatilidad, ya que permite la determinación simultánea de un número considerable de elementos.
- ✓ Amplio rango de aplicación pues los diferentes métodos empleados permiten su aplicación en la determinación de la concentración química de más de 5 órdenes (ppm).
- ✓ Cantidades y manipulación mínima de la muestra para el análisis, lo que redundo en un apreciable beneficio de la garantía de eliminar fuentes de errores y contaminación de las muestras.
- ✓ Tiempos de análisis relativamente cortos (5 a 90 minutos por muestra)
- ✓ Costos relativamente bajos en comparación con otros métodos analíticos.

Una ventaja obvia de los sistemas dispersores de energía es la sencillez y ausencia de partes móviles en los componentes de excitación y detección del espectrómetro. Además, la ausencia de colimadores y de un cristal difractor, así como la cercanía entre el detector y la muestra, incrementa 100 veces o más la energía que llega al detector. (SKOOG, 2008)

Por otro lado entre las desventajas y limitaciones del equipo encontramos es difícil detectar un elemento que esté presente en menos de 100 ppm; existe una cierta problemática en el análisis de los elementos ligeros, por su baja sensibilidad debida a fenómenos de absorción. Como la penetración es baja, pueden influir efectos de microheterogeneidad, por el tamaño de partícula y textura de la superficie, lo que supone una variación de una muestra a otra.

### **Efectos de la matriz en el análisis químico de la muestra**

Los rayos X producidos en un proceso de fluorescencia se generan no solamente en los átomos de la superficie sino también en aquellos que se encuentran debajo de esta. Así, una parte del haz incidente y del haz fluorescente resultante atraviesan un espesor significativo de la muestra, en el que puede tener lugar la absorción y dispersión. El grado de atenuación de ambos haces depende del coeficiente de absorción másico del medio, el cual a su vez se determina a partir de los coeficientes de todos los elementos de la muestra. Por tanto los resultados calculados pueden ser más altos o bajos ya que la intensidad energética del elemento determinado está influenciada por la concentración y por los coeficientes de absorción másicos de la matriz. (SKOOG ET AL. 1992).

### **1.3. Microscopio Electrónico de Barrido**

El Microscopio Electrónico de Barrido (SEM) es un instrumento que permite la observación y caracterización superficial de materiales inorgánicos y orgánicos, entregando información morfológica del material analizado. A partir de él se producen distintos tipos de señal que se generan desde la muestra y se utilizan para



examinar muchas de sus características. Con él se pueden realizar estudios de los aspectos morfológicos de zonas microscópicas de los distintos materiales, además del procesamiento y análisis de las imágenes obtenidas. Las principales utilidades del SEM son la alta resolución ( $\sim 100 \text{ \AA}$ ), la gran profundidad de campo que le da apariencia tridimensional a las imágenes y la sencilla preparación de las muestras.

El microscopio electrónico de barrido puede estar equipado con diversos detectores, entre los que se pueden mencionar: un detector de electrones secundarios para obtener imágenes de alta resolución SEI (Secondary Electron Image), un detector de electrones retrodispersados que permite la obtención de imágenes de composición y topografía de la superficie BEI (Backscattered Electron Image), y un detector de energía dispersiva EDS (Energy Dispersive Spectrometer) permite coleccionar los Rayos X generados por la muestra y realizar diversos análisis e imágenes de distribución de elementos en superficies pulidas.

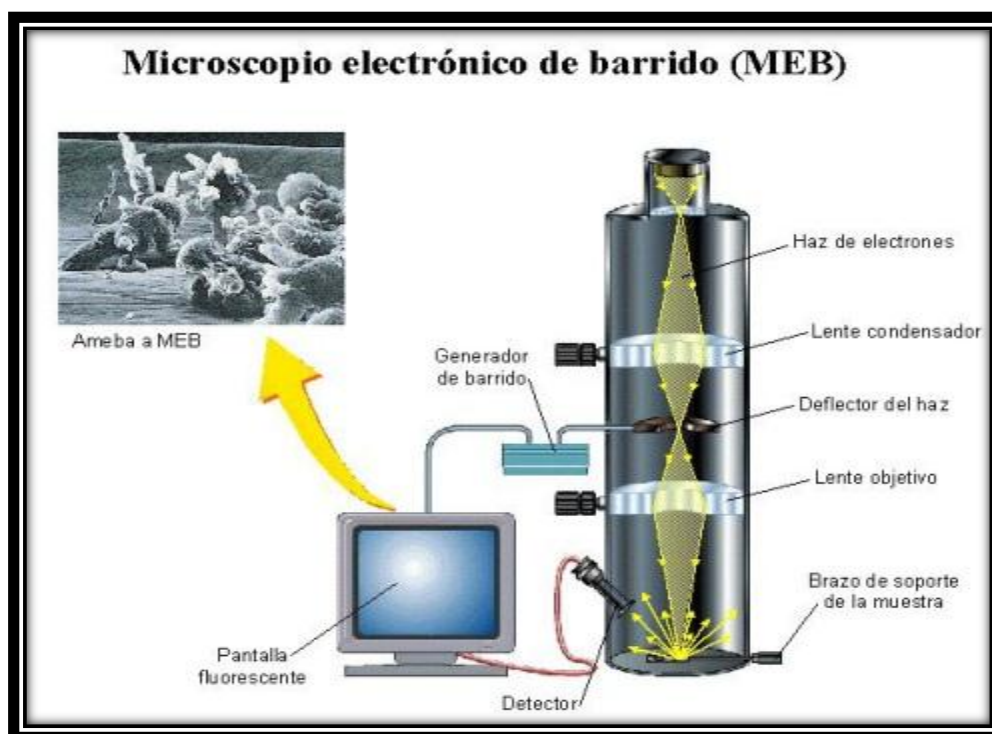
➤ **Partes de un Microscopio Electrónico de Barrido (SEM):**

Un MEB moderno consta esencialmente de las siguientes partes:

- ✓ Una unidad óptica-electrónica, que genera el haz que se desplaza sobre la muestra.
- ✓ Un portamuestra, con distintos grados de movimientos.
- ✓ Una unidad de detección de las señales que se originan en la muestra, seguida de un sistema de amplificación adecuado.
- ✓ Un sistema de visualización de las imágenes (tubo de rayos catódicos).
- ✓ Un sistema de vacío, un sistema de refrigeración y un sistema de suministro eléctrico.
- ✓ Un sistema de registro fotográfico, magnético o de video.
- ✓ Un sistema de procesamiento de la imagen con ayuda computacional (optativo). (Fig. 116).

### ➤ Fundamento de la técnica

Cuando un haz de electrones incide sobre la superficie de un sólido, tienen lugar varios fenómenos: re-emisión de una parte de la radiación incidente, emisión de luz, electrones secundarios y Auger, Rayos X, etc. Todas estas señales se pueden emplear para obtener información sobre la naturaleza de la muestra (morfología, composición, estructura cristalina, estructura electrónica, etc.). La técnica consiste, principalmente, en enviar un haz de electrones sobre la muestra y mediante un detector apropiado registrar el resultado de esta interacción. El haz se desplaza sobre la muestra realizando un barrido en las direcciones X e Y de tal modo que la posición en la que se encuentra el haz en cada momento coincide con la aparición de brillo, proporcionalmente a la señal emitida, en un determinado punto de una pantalla. Las imágenes que se obtienen en el Microscopio Electrónico de Barrido (SEM) corresponden a electrones secundarios o electrones retrodispersados emitidos tras la interacción con la muestra de un haz incidente de entre 5 y 30 keV.

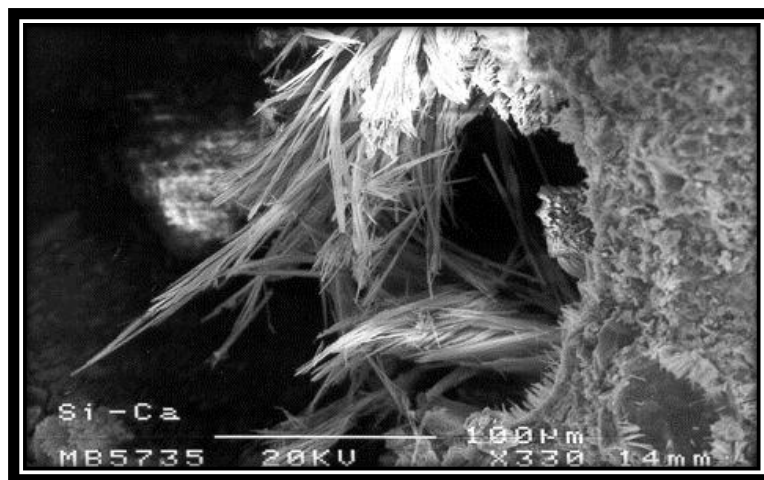


**Figura 116.** Esquema de un Microscopio Electrónico de Barrido.

Tomada de <http://www.ecured.cu/index.php/Archivo:Microscopio-barrido.jpg>

La señal de electrones secundarios se forma en una delgada capa superficial, del orden de 50 a 100 Å. Al ser grande el número de electrones emitido se puede establecer un buen contraste. Por otra parte, al ser electrones de baja energía, menos de 50 eV, pueden ser desviados fácilmente de su trayectoria emergente inicial, y se puede obtener información de zonas que no están a la vista del detector. Esta particularidad es fundamental para otorgar a esta señal la posibilidad de aportar información “en relieve”. La apariencia de la imagen es la que tendría una muestra que hubiese sido iluminada desde el detector y se estuviese observando desde el cañón de electrones. Con los electrones secundarios se obtiene una imagen de apariencia tridimensional de la muestra, tal como la que se observa en la figura 117.

En cuanto a la señal de electrones retrodispersados, su principal utilidad reside en que su emisión, que se debe a choques de tipo elástico y por tanto con energía del mismo orden que la de los electrones incidentes, depende fuertemente del número atómico de la muestra. Esto implica que dos partes de la muestra que tengan distinta composición se revelan con distinta intensidad aunque no exista ninguna diferencia de topografía entre ellas.



**Figura 117.** Imagen obtenida a partir de un detector de electrones secundarios, tomada de <http://www.uned.es/cristamine/mineral/metodos/sem.htm>

Los electrones retrodispersados salen de la muestra en mayor cantidad en las direcciones próximas a la de incidencia, por lo que su detección se hace mejor en las

proximidades del eje de incidencia. La intensidad de emisión de los electrones retrodispersados depende del número atómico medio de los átomos de la muestra, así los átomos más pesados producen mayor cantidad de electrones retrodispersados. Una imagen originada por los electrones retrodispersados revela diferencias en la composición química por diferencias de contraste (Fig. 118).



**Figura 118.** Imagen obtenida a partir de un detector de electrones retrodispersados,

Tomada de <http://www.uned.es/cristamine/mineral/metodos/sem.htm>

Finalmente, los Rayos X que se generan en una muestra sometida a bombardeo electrónico permiten identificar los elementos presentes y establecer su concentración. Cuando un haz electrónico suficientemente acelerado incide sobre la superficie de un sólido, se produce la ionización de los átomos presentes, esto es, la pérdida de electrones internos. En este estado un electrón de una capa más externa salta inmediatamente a la capa deficitaria, y rellena el hueco producido. Este salto implica una liberación de energía, cuyo valor es igual a la diferencia entre las energías que tenía cada electrón en su orbital correspondiente. Esta energía se manifiesta de dos formas: electrones Auger o Rayos X y es única para cada elemento. Cuando se representa la intensidad de esta radiación electromagnética frente a su energía se obtiene un espectro de Rayos X, constituido por una serie de picos, designados como líneas, de intensidad variable, a los que se denomina Rayos X característicos, que está superpuesto a un fondo continuo de menor intensidad (Rayos

X continuos). (UNIVERSIDAD DE ALICANTE: SERVICIOS TÉCNICOS DE INVESTIGACIÓN, 2010)

➤ **Requisitos y limitaciones de la técnica**

Es fundamental que las muestras que vayan a ser observadas en Microscopio Electrónico de Barrido (SEM) estén exentas de líquidos y además que sean conductoras.

✓ Secado de las muestras:

Las muestras que quieran ser investigadas mediante microscopía electrónica de barrido deben ser secadas antes de ser introducidas en el microscopio, de otro modo la baja presión en el mismo causará que el agua (y otros líquidos volátiles) se evapore saliendo violentamente del espécimen y alterando la estructura del mismo. Muestras con una rigidez inherente como las rocas se pueden secar al aire o en un desecador de vacío sin que su estructura sufra alteración alguna. Sin embargo, las estructuras blandas con un alto contenido en agua se deformarán si se dejan secar al aire ya que las fuerzas de tensión superficial asociadas a la salida del agua causarán daños estructurales. Para evitar los efectos dañinos que las fuerzas anteriormente mencionadas tienen en la estructura de los especímenes secados al aire, durante el proceso de secado debe pasarse el límite entre la fase “líquido-gas”. Entre los métodos que existen para conseguirlo se encuentra el método del punto crítico en el cual el líquido pasa directamente a la fase gas. De este modo las fuerzas de deformación se evitan debido a que el proceso de secado tiene lugar por encima del punto crítico del líquido, donde el límite entre la fase líquida y la fase gas no existe.

El punto crítico es aquel estado particular de un gas en el cual todavía puede sufrir licuefacción. Este estado viene determinado por la presión crítica y la temperatura crítica. Por encima de este punto el gas no puede experimentar licuefacción debido a que el límite entre la fase gaseosa y la fase líquida ha desaparecido: En este punto el estado líquido y el estado gas son igualmente densos. Éste es el punto crítico. El líquido pasa a la fase gas sin pasar por el límite de fases “líquido-gas”, y la muestra se

seca sin los efectos dañinos del secado en aire. Según los valores de presión y temperatura crítica del agua, 228.5 bar y 374 °C, si un espécimen contiene agua no puede ser secado mediante el método del punto crítico ya que los valores tan altos de presión y temperatura podrían destruirlo. Así la muestra debe ser transferida a un agente apropiado, llamado fluido transicional, tal como es el dióxido de carbono cuyos valores de punto crítico son considerablemente más ventajosos, 73.8 bar y 31 °C.

✓ Recubrimiento de las muestras no conductoras:

Cuando se desea visualizar una muestra en un Microscopio Electrónico de Barrido (SEM) ésta debe ser conductora ya que, de no ser así, se carga durante la irradiación por una acumulación de carga que desvía el haz electrónico y, como consecuencia de ello aparecen distorsiones en la imagen. Una solución a este problema es recubrir la muestra con una película conductora, de espesor comprendido entre 10 y 25 nm.

Las técnicas empleadas para mejorar la conductividad de las muestras para su estudio al Microscopio Electrónico de Barrido (SEM) son la evaporación térmica y el recubrimiento por sputtering. Ambas conducen a los mismos resultados pero los mecanismos son distintos.

La elección del material con el que se va a recubrir la muestra depende fundamentalmente del estudio que se va a realizar. Así, para la observación de imágenes de electrones secundarios el oro y el oro-paladio son los materiales que conducen a los mejores resultados; al ser elementos pesados, producen mayor emisión. Cuando lo que se pretende es realizar un estudio microanalítico es recomendable emplear carbono. El bajo número atómico de este elemento lo hace prácticamente transparente a los Rayos X emitidos por la muestra. También se emplean, a veces, aluminio, cromo, etc.

El depósito de películas metálicas se puede realizar tanto por evaporación térmica como por sputtering, pero cuando se recubre con carbono se utiliza habitualmente la evaporación térmica. (UNIVERSIDAD DE ALICANTE, 2010).

#### 1.4. Clasificación de Dunham, Embry y Clovan

EMBRY Y KLOVAN (1972) ampliaron la clasificación de Dunham, pero manteniendo el carácter textural y el balance entre micrita, esparita, el tiempo en el cual los constituyentes se agrupan, soporte de granos, etc. Los autores incluyen rocas como “floatstone” en donde mas del 10% de los granos son mayores de 2 mm y todos están soportados o flotando en el lodo o micrita, y “rudstone” donde mas del 10% de los granos son mayores de 2 mm y todos se soportan entre sí. En esta clasificación se introdujeron también términos como “bafflestone”, “bindstone” y “framestone” para las calizas tipo “boundstone”, en relación a si fueron procesos de aglutinamiento, incrustación y empaquetamiento, o de fábrica generada “in situ” respectivamente. (MÉNDEZ, 2009)

El aspecto más importante de la ampliación de la clasificación de Dunham por Embry y Klovan es la aplicación a determinadas facies. En el arrecife orgánico, arrecifes frangeantes o facies intramareales o de llanuras de marea con la presencia de estromatolitos se forman texturas tipo framestone. Los corales de formas ramosas que ayudan a aglutinar el sedimento y algas coralinas incrustantes que imprimen dureza al armazón y aglutinan granos y fragmentos, generan rocas del tipo bafflestone y bindstone. Igualmente en el mismo arrecife, en las zonas someras de los planos arrecifales y en las partes mas profundas como el arrecife proximal y el distal es importante diferenciar entre “floatstone” y “rudstone”. (MÉNDEZ, 2009)

En esta ampliación de la clasificación de Dunham realizada por Embry y Klovan, se mantienen términos de la clasificación inicial como lo son:

- ✓ Grainstone: Textura grano-soportada y sin matriz micrítica. El espacio intergranular puede estar ocupado por cemento.
- ✓ Packstone: Textura grano-soportada y con matriz micrítica. El espacio intergranular está ocupado por micrita.
- ✓ Wackestone: Textura matriz-soportada con más del 10% de granos.
- ✓ Mudstone: Textura matriz-soportada con menos del 10% de granos.





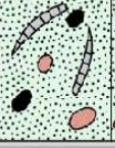



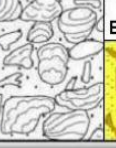
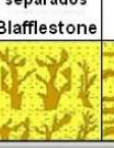
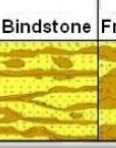
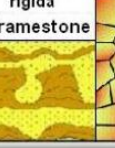
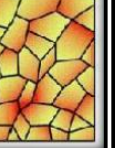
Textura deposicional reconocible										Textura deposicional no reconocible	
Componentes originales no unidos durante la sedimentación					Componentes orgánicamente unidos durante el depósito						
Con lodo calcáreo (micrita) [tamaño limo fino y arcilla]					> 10% granos > 2 mm					Boundstone (puede dividirse en 3 tipos de acuerdo con la forma de las estructuras orgánicas)	
Textura lodo-sostenida		Textura grano-sostenida		Textura sostenida por granos sin lodo calcáreo	Textura lodo-sostenida	Textura sostenida por granos > 2 mm		en grupos separados unidas formando una estructura rígida			
< 10% granos	> 10% granos										Cristalina
Mudstone	Wackestone	Packstone	Grainstone	Floatstone	Rudstone	Blaffestone	Bindstone	Framestone			
											

Figura 119. Clasificación de Embry y Klován (1972)

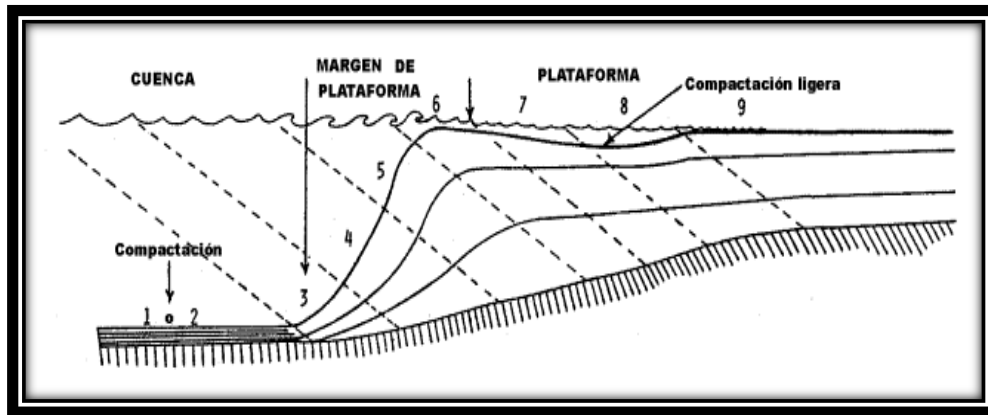
### 1.5. Facies estándar de Wilson

El término facies se refiere a las características litológicas y biológicas de un depósito sedimentario, definido por el ambiente de depósito.

Debido a que muchos depósitos existen simultáneamente, los sedimentos así depositados muestran un cambio de facies de lugar en lugar, por lo que varias facies pueden interdigitarse una con la otra. Ejemplo: una facies de playa puede interdigitarse hacia el continente con una facies de dunas costeras, y ésta a su vez pasar a una facies fluvial; mientras que hacia el mar, se interdigita con varias facies marinas someras, la cual puede culminar con una facies de aguas profundas.

Una facies dada se deposita sólo dentro del área ocupada por un ambiente de depósito específico, y muchas facies están distribuidas lateralmente en tiempo.

El modelo de facies estándar de Wilson (1970, en Wilson, 1975) resulta de una combinación de efectos de la pendiente, edad, energía del agua y clima, en donde las características del depósito también son afectadas por el aporte de clásticos. Este modelo define 9 facies en un perfil de plataforma con un margen y pendiente ligera (Fig. 120).



**Figura 120.** Distribución de las nueve facies principales en una plataforma carbonatada. Modificada de Wilson (1975).

1.- Facies de cuenca (fondoform): El agua es muy profunda para la producción y depósito de carbonatos, dependiendo de la cantidad del influjo de sedimentos finos argiláceos y material silíceo. Pueden darse condiciones euxínicas e hipersalinas, por lo que es difícil la desintegración de plancton.

2.- Facies de plataforma (deep undathem): El agua con una profundidad de decenas o aún cientos de metros generalmente es oxigenada y con salinidad marina normal. Las corrientes tienen buena circulación y son lo suficientemente profundas para encontrarse bajo el nivel de oleaje normal, pero con tormentas intermitentes que afectan los sedimentos del fondo.

3.- Facies de margen de cuenca: Se encuentra en el límite o al pie de la plataforma carbonatada de material conchífero derivado de la misma. Las condiciones de profundidad y base del oleaje, así como el nivel de oxígeno son muy similares a las de la facies 2.

4.- Facies de pendiente frontal de la plataforma carbonatada (clinoform): Generalmente la pendiente se localiza arriba del límite más bajo de agua oxigenada,

encima de la base del oleaje. Los detritos carbonatados se depositan comúnmente con una inclinación de casi 30 grados, es inestable y de tamaño variado. La estratificación presenta derrumbes, montículos, frentes en forma de cuña y bloques grandes.

5.- Facies de arrecifes de margen de plataforma (construcción orgánica): El carácter ecológico depende de la energía del agua, inclinación de la pendiente, productividad orgánica, cantidad de la construcción del armazón, uniones, entrapamientos, frecuencia de exposiciones subaéreas y cementación. Se distinguen tres márgenes de plataforma lineares:

Tipo I.- Formado por la pendiente de lodo carbonatado y acumulaciones de restos orgánicos.

Tipo II.- Se refiere a rampas de arrecifes en loma, formando armazones orgánicos en grupos aislados o capas incrustantes de organismos creciendo en la base del oleaje y estabilizando los restos de detritos orgánicos.

Tipo III.- Son armazones de bordes arrecifales como las asociaciones actuales de coral-alga con formas sésiles que crecen a través de la base del oleaje dentro de la zona de rompiente.

6.- Facies de arenas de barrera arenosa de borde de plataforma: Éstas toman las formas de bancos, playas, barras de marea de mar abierto en abanicos, cinturones o islas de dunas. La profundidad de tales arenas marginales varía de 5 a 10 metros. El ambiente es oxigenado pero no adecuado para la vida marina debido al cambio constante de sustrato.

7.- Facies marina de plataforma abierta (undadform): Este ambiente se localiza en estrechos, lagunas y bahías abiertas detrás del borde de plataforma externa. La profundidad del agua es generalmente somera, a veces solo algunos metros de profundidad. La salinidad es normal, a veces variable y con circulación moderada.

8.- Facies de plataforma de circulación restringida: Incluye la mayor parte de los sedimentos finos en lagunas muy someras y los sedimentos gruesos en canales de marea y playas locales. Todo el complejo corresponde al ambiente de planicies de mareas. Las condiciones son extremadamente variables y constituye un ambiente muy difícil para los organismos. Llegan a presentar aguas dulces, salinas e hipersalinas, con exposiciones subaéreas frecuentes y con condiciones reductoras y oxidantes; existe abundante vegetación tanto marina como de pantano. Los terrígenos de origen eólico pueden llegar a representar una porción importante en los depósitos.

9.- Facies de plataforma evaporítica: Ambiente de supramarea y de lagos en la plataforma marina. El clima se caracteriza por ser árido y con un intenso calor (áreas de sabkas y planicies de sal), por lo que las inundaciones marinas son muy esporádicas. El yeso y la anhidrita son muy comunes dentro de estos depósitos.

En el modelo de Wilson, ciertas condiciones pueden variar y un solo ejemplo difícilmente incluiría el total de las nueve facies antes mencionadas. Por ejemplo, el cinturón 1 y 2 dependerán del banco de carbonatos construido o la rampa que se eleve de aguas muy profundas de cuencas euxínicas, o que se levante por arriba de la plataforma con circulación abierta.

Lo mismo ocurre con el cinturón 3 y 4, lo cual está determinado por la inclinación de la pendiente, la profundidad del agua y la energía del agua en el margen superior. El cinturón 5 (arrecife orgánico) puede alternar lateralmente con la facies de arena carbonatada (facies 6), o también, ambos pueden estar presentes dependiendo de la combinación de las edades geológicas y la energía del agua. Las facies de Wilson no ha sido el único modelo reconocido. Las plataformas carbonatadas actuales contienen arenas carbonatadas hacia la costa, las cuales no son muy típicas en el registro litológico; sus modelos sedimentarios resultan de inundaciones recientes y muestran un ciclo de progradación sedimentaria.

## 1.6. Métodos estadísticos

La estadística es una ciencia que comprende la recopilación, tabulación, análisis e interpretación de los datos cuantitativos y cualitativos; este proceso incluye determinar los atributos o cualidades reales, al igual que realizar estimaciones y verificar hipótesis mediante las cuales se determinan valores probables o esperados. Mediante la estadística se intenta definir y controlar el grado de incertidumbre que surge de la inevitable variabilidad de los datos.

### ➤ Mediana

Es el valor de la variable tal que el número de observaciones menores que él es igual al número de observaciones mayores que él. Si el número de datos es par, se puede tomar la media aritmética de los dos valores centrales.

### ➤ Diagramas de cajas

Cuando un grupo de datos es analizado existe la necesidad de conocer el centro y dispersión de los valores con respecto al valor central, así como de la existencia de valores extremos (conocidos como anómalos), o de estudiar la distribución de los valores a lo largo del eje de medida. Los diagramas de cajas son utilizados para examinar la distribución de una variable, su centro, su dispersión y sus anómalos.

Estos diagramas representan un rectángulo, con líneas y puntos (Fig. 131), donde el tope y el fondo del mismo representan los percentiles 75 y 25 respectivamente y la mediana o percentil 50 corresponde a una línea dentro de la caja. El ancho de este es arbitrario mientras que el alto corresponde al rango intercuartil.

El valor adyacente superior es la mayor observación que es menor o igual que el percentil 75 más 1,5 veces el rango intercuartil. El valor adyacente inferior es la observación más pequeña que es mayor o igual al percentil 25 menos 1,5 veces el

rango intercuartil. Los valores adyacentes son representados como líneas en forma de T que se extienden desde cada límite de la caja.

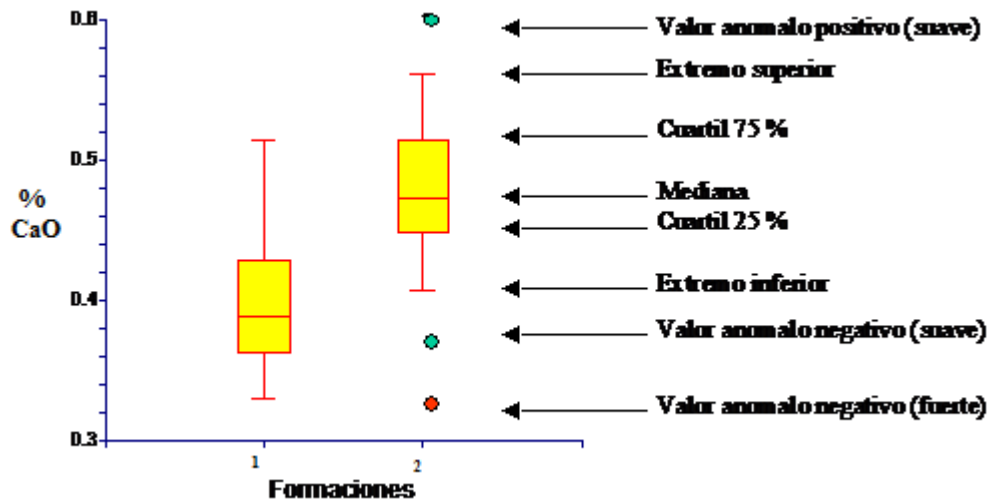


Figura 121. Ejemplo de diagrama de caja.

➤ Funciones discriminantes

El análisis de funciones discriminantes es una técnica estadística multivariante que consiste en el cálculo de funciones de clasificación, en base a variables medidas y para describir grupos de poblaciones que se han definido como distintos uno de otro. Los grupos se definen en base a tales variables y se utilizan de acuerdo a su contribución en la discriminación. Las funciones toman en consideración la dispersión o varianza de cada variable.

Según ROLLINSON (1993) en el análisis discriminante un grupo de muestras estándar son nombradas como pertenecientes a dos o más grupos. Las funciones discriminantes tienen la forma siguiente:

$$F_i = a_i x_1 + b_i x_2 + c_i x_3 \dots p_i x_p$$

Donde  $x_1, x_2 \dots x_p$  son las variables discriminantes (elementos mayoritarios o traza),  $a_i, b_i \dots p_i$  son los coeficientes de las funciones discriminantes y  $F_{ii}$  es el resultado final o función discriminante. La magnitud de los coeficientes de las funciones discriminantes asociados con las variables muestran la importancia relativa de las variables en la separación de los grupos a lo largo de la función discriminante.

➤ Gráficos de correlación

Los diagramas de dispersión o gráficos de correlación permiten estudiar la relación entre dos variables  $x$  e  $y$ . La variable  $x$  se coloca en el eje de la abscisas, la otra variable  $y$  en el eje de ordenadas y los pares  $(x,y)$  representan al dato conformando a su vez una nube de puntos. La forma de la nube de puntos nos informa sobre el tipo de relación existente entre las variables (KITANIDIS, 1997).

Los diagramas de dispersión de acuerdo a KITANIDIS (1997) se pueden utilizar como una forma de cuantificar el grado de relación lineal existente entre las variables al establecer el grado en que la nube de puntos se ajusta a una línea recta. El ajuste de una recta a una nube de puntos es a través de un índice numérico conocido como *coeficiente de correlación*, el cual permite establecer una cuantificación de la relación lineal existente entre las dos variables cuantitativas.





**APÉNDICE 3**  
**RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS QUÍMICOS**

**3.1. Tabla 8.** Datos obtenidos a través de la técnica de Absorción Atómica

MUESTRA	% CaO	% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> T	% MnO	% MgO	% Na <sub>2</sub> O	% K <sub>2</sub> O	Zn (ppm)	Ni (ppm)
85	46,65	1,0060	0,0059	0,8493	0,0437	0,0117	6,49	7,648
96	52,38	0,2688	0,0031	0,5332	0,0309	0,0067	4,301	7,168
101	47,53	0,5771	0,0038	0,7116	0,0443	0,0304	6,298	5,831
102	53,28	0,1423	0,0023	0,4196	0,0374	0,0096	6,073	7,693
105	46,18	1,1173	0,0100	0,8579	0,0541	0,0437	12,758	6,615
108	46,58	10,7221	0,0193	4,4689	0,1729	0,1560	11,808	8,798
110	45,18	1,7723	0,0089	0,7161	0,0498	0,0365	13,993	7,479
112	51,16	0,2494	0,0036	0,6833	0,0570	0,0109	4,415	5,887
113	52,12	0,2930	0,0042	0,6424	0,0432	0,0270	10,058	7,753
114	53,32	0,1464	0,0028	0,7281	0,0381	0,0068	7,725	6,098
119	52,84	0,2718	0,0024	0,6027	0,0462	0,0117	6,889	5,637
121	47,14	0,8700	0,0075	0,6888	0,0641	0,0328	6,262	9,045
122	50,84	0,3415	0,0037	0,2810	0,0460	0,0113	6,65	6,007
123	44,34	0,4935	0,0044	0,5790	0,0749	0,0382	5,68	6,420
124	51,03	0,5645	0,0037	0,7159	0,0743	0,0280	6,009	5,365
125	36,58	1,3807	0,0405	0,1099	0,0554	0,0431	9,388	1,174
126	47,72	1,4627	0,0158	0,7885	0,0527	0,0407	10,644	5,753
127	52,33	0,4912	0,0030	0,3085	0,0312	0,0259	5,046	5,046
128	52,10	1,1462	0,0053	0,7011	0,0448	0,0118	6,983	5,713
131	53,26	0,1433	0,0017	0,4341	0,0435	0,0053	4,82	5,449
132	54,50	0,0896	0,0015	0,4928	0,0641	0,0059	5,4	4,985
133	53,20	0,9016	0,0022	0,5210	0,0760	0,0099	6,794	5,353

**3.2. Tabla 9.** Datos obtenidos a través de la técnica de Fluorescencia de rayos X

MUESTRA	%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%TiO <sub>2</sub>	V (ppm)	%SiO <sub>2</sub>
85	1,27	0,01	20	13,4
96	1,04	0,01	20	8,00
101	2,32	0,01	20	15,2
102	2,40	0,01	21	7,73
105	3,31	0,01	57	15,2
108	2,35	0,01	20	15,1
110	3,61	0,01	20	17,5
112	2,07	0,01	20	11,3
113	1,14	0,01	20	8,68
114	4,80	0,01	25	7,74
119	1,19	0,01	20	8,46
121	4,51	0,04	31	18,6
122	1,49	0,01	20	10,6
123	5,82	0,14	108	22,1
124	1,50	0,01	20	11,0
125	3,26	0,06	20	27,6
126	1,83	0,01	43	13,7
127	1,49	0,01	20	9,26
128	1,11	0,01	20	9,49
131	1,00	0,01	25	8,3
132	0,39	0,01	20	7,98
133	1,75	0,01	20	8,76

APENDICE IV  
GRÁFICAS DE DIPERSIÓN

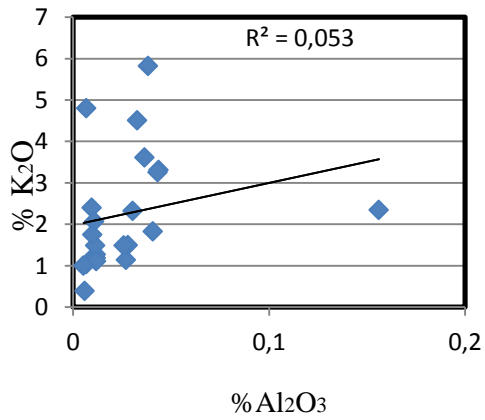


Figura 122. Relación  $\text{Al}_2\text{O}_3$  vs  $\text{K}_2\text{O}$

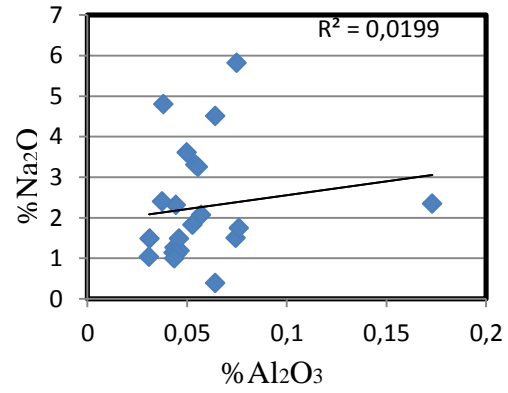


Figura 123. Relación  $\text{Al}_2\text{O}_3$  vs  $\text{Na}_2\text{O}$

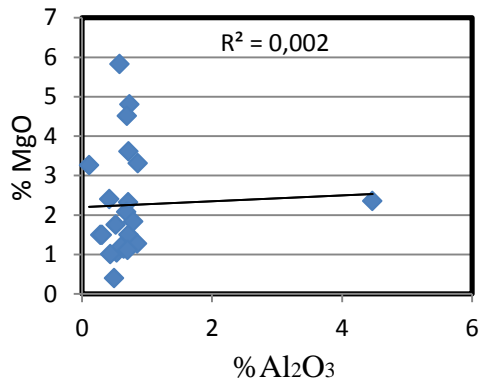


Figura 124. Relación  $\text{Al}_2\text{O}_3$  vs  $\text{MgO}$

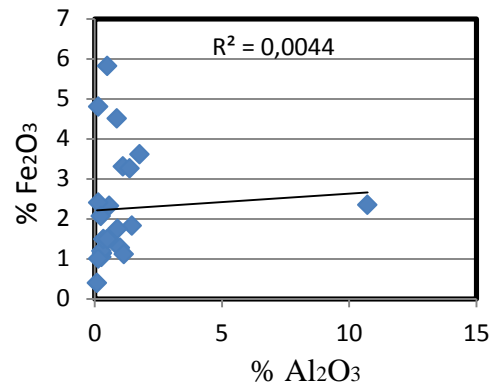
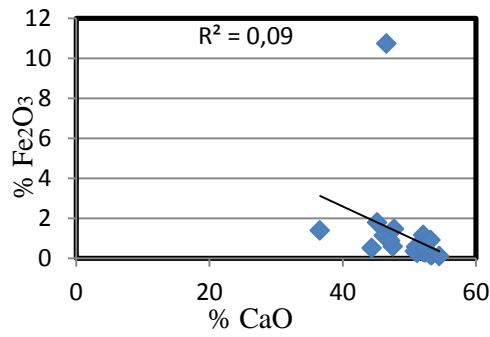
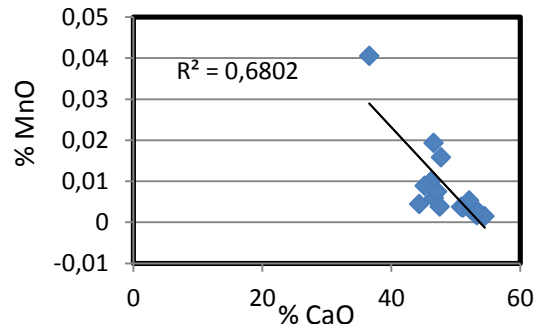


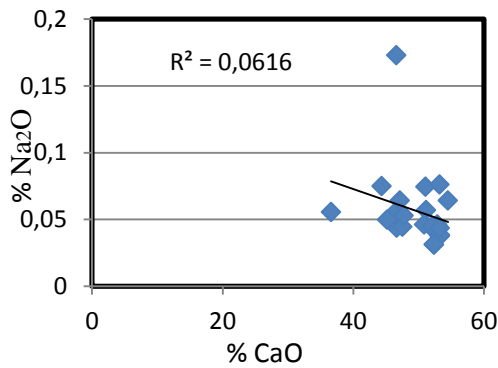
Figura 125. Relación  $\text{Al}_2\text{O}_3$  vs  $\text{Fe}_2\text{O}_3$



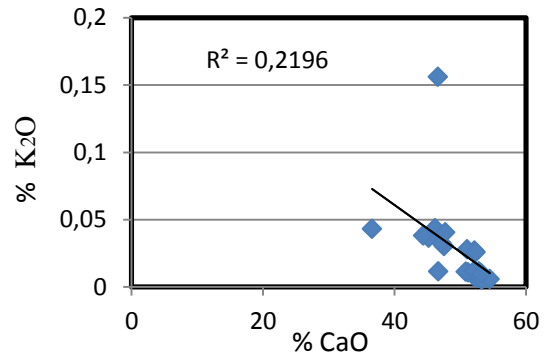
**Figura 126.** Relación CaO vs Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>



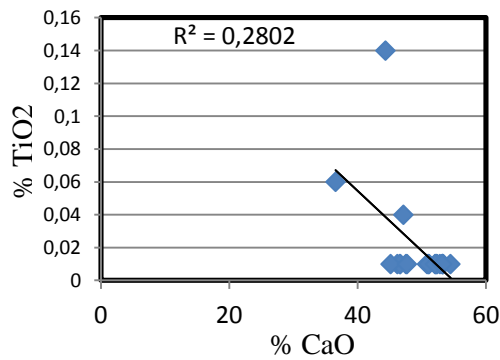
**Figura 127.** Relación CaO vs MnO



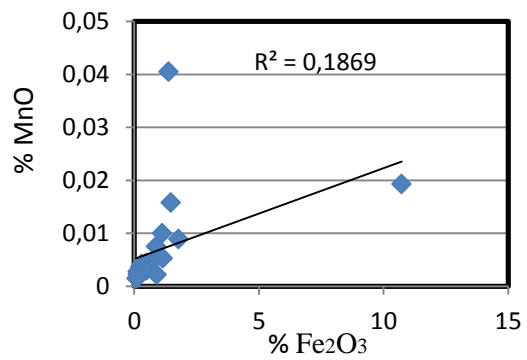
**Figura 128.** Relación CaO vs Na<sub>2</sub>O



**Figura 129.** Relación CaO vs K<sub>2</sub>O



**Figura 130.** Relación CaO vs TiO<sub>2</sub>



**Figura 131.** Relación Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> vs MnO

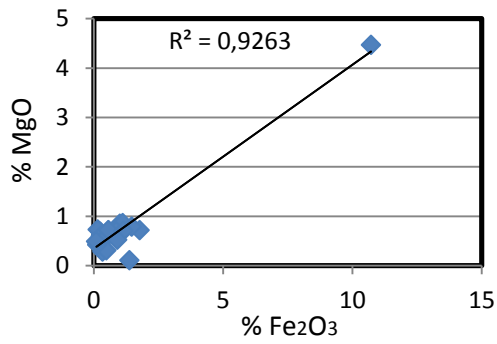


Figura 132. Relación Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> vs MgO

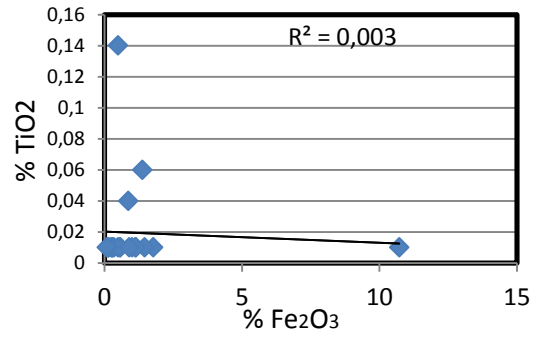


Figura 133. Relación Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> vs TiO<sub>2</sub>

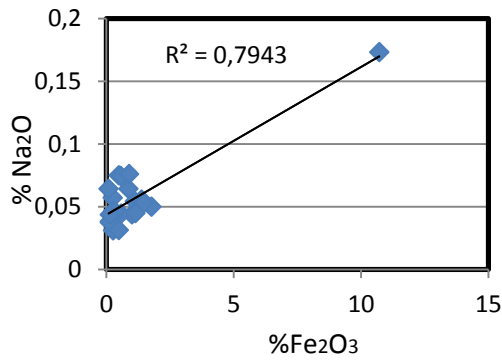


Figura 134. Relación Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> vs Na<sub>2</sub>O

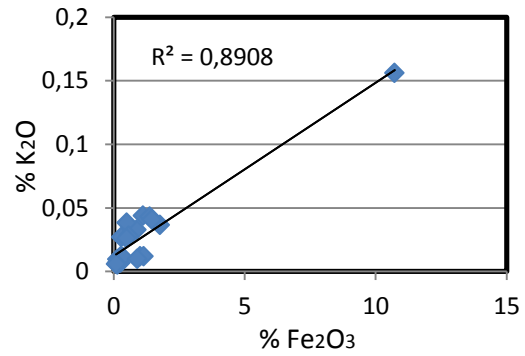


Figura 135. Relación Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> vs K<sub>2</sub>O

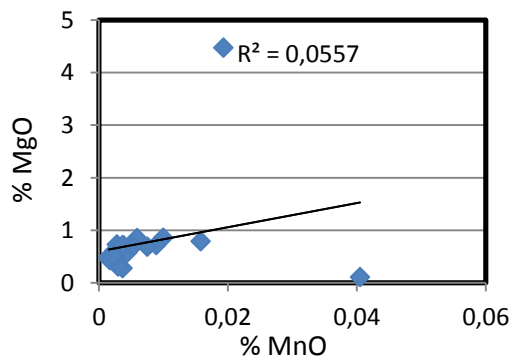


Figura 136. Relación MnO vs MgO

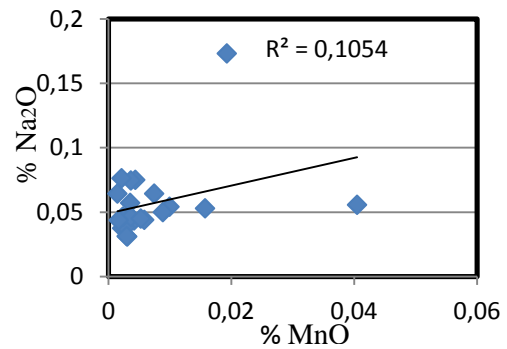
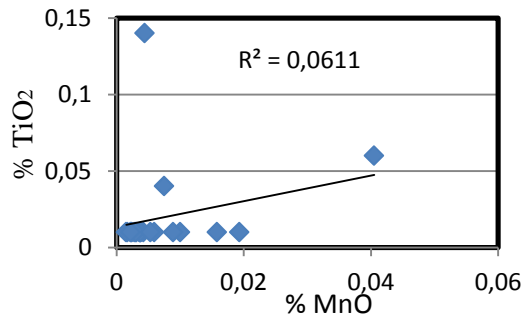
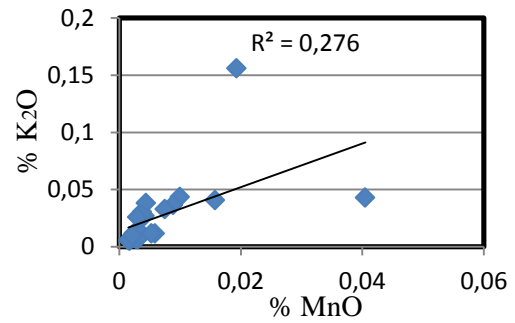


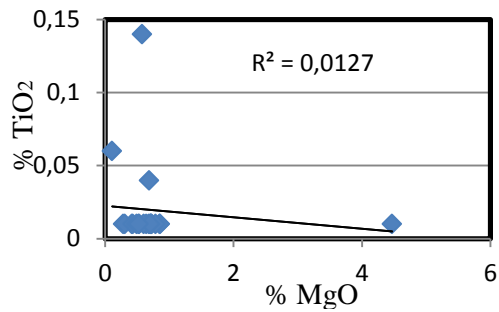
Figura 137. Relación MnO vs Na<sub>2</sub>O



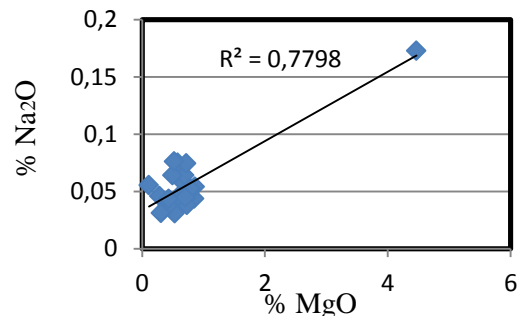
**Figura 138.** Relación MnO vs TiO<sub>2</sub>



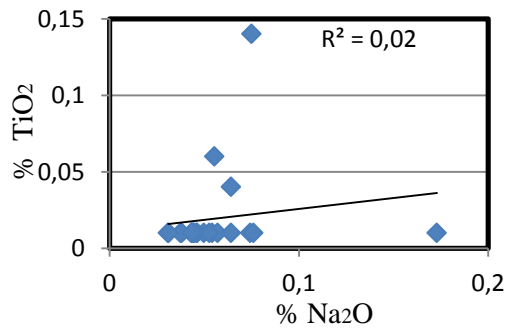
**Figura 139.** Relación MnO vs K<sub>2</sub>O



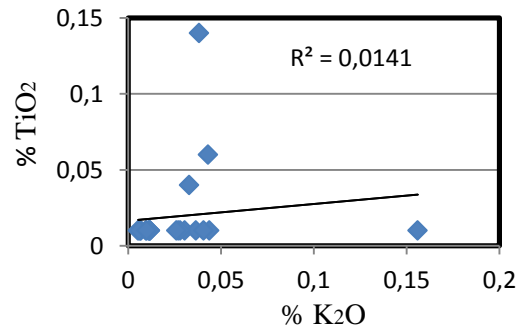
**Figura 140.** Relación MgO vs TiO<sub>2</sub>



**Figura 141.** Relación MgO vs Na<sub>2</sub>O

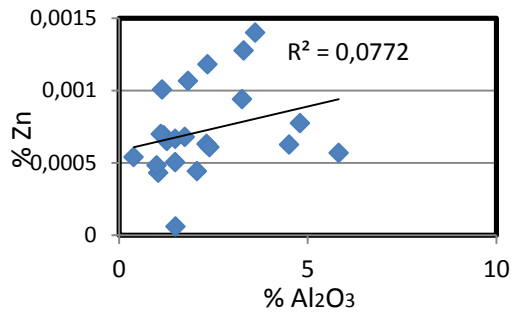


**Figura 142.** Relación Na<sub>2</sub>O vs TiO<sub>2</sub>

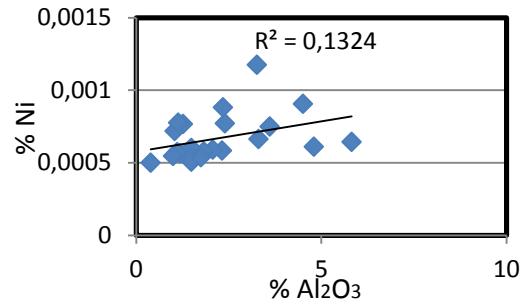


**Figura 143.** Relación K<sub>2</sub>O vs TiO<sub>2</sub>

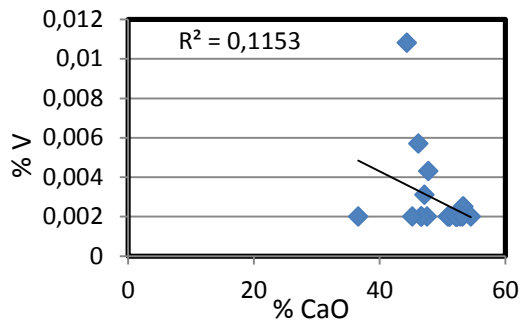




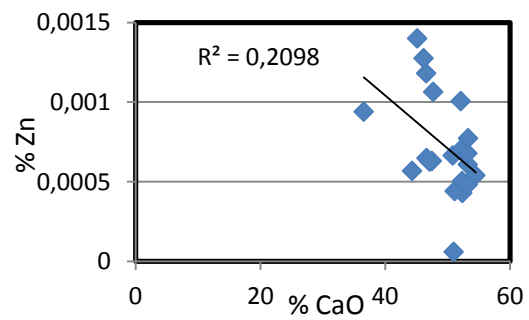
**Figura 144.** Relación  $\text{Al}_2\text{O}_3$  vs Zn



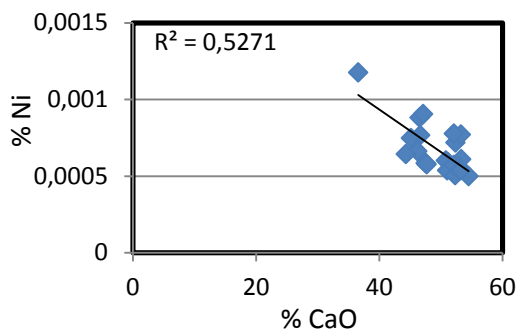
**Figura 145.** Relación  $\text{Al}_2\text{O}_3$  vs Ni



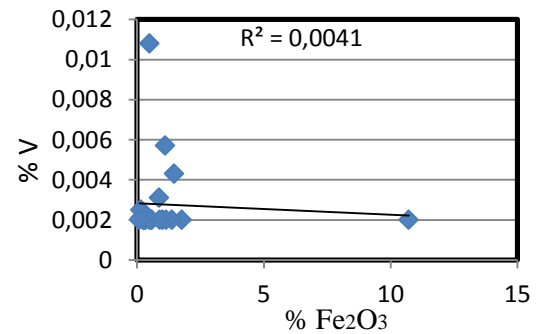
**Figura 146.** Relación CaO vs V



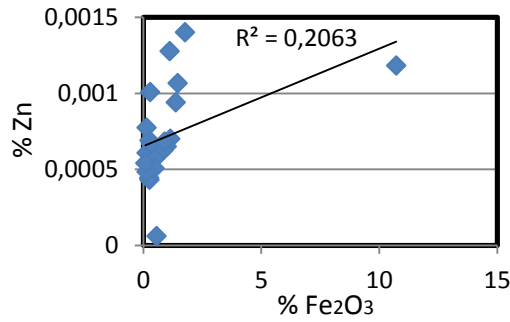
**Figura 147.** Relación CaO vs Zn



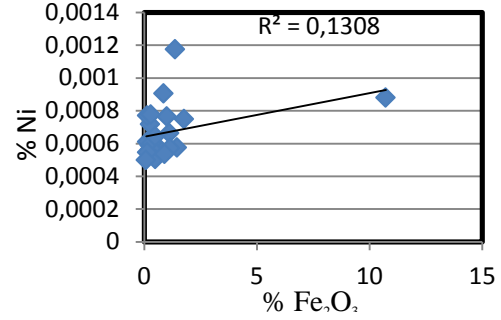
**Figura 148.** Relación CaO vs Ni



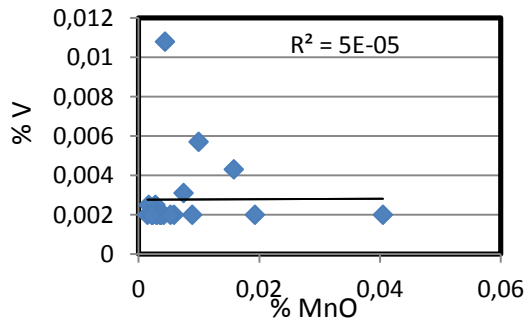
**Figura 149.** Relación  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  vs V



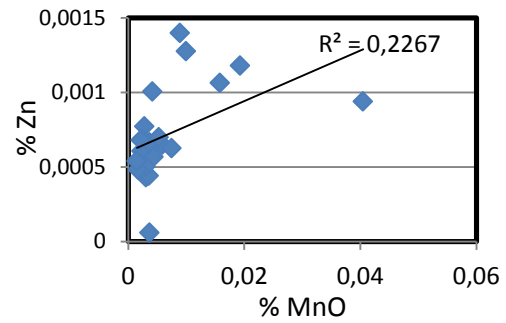
**Figura 150.** Relación Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> vs Zn



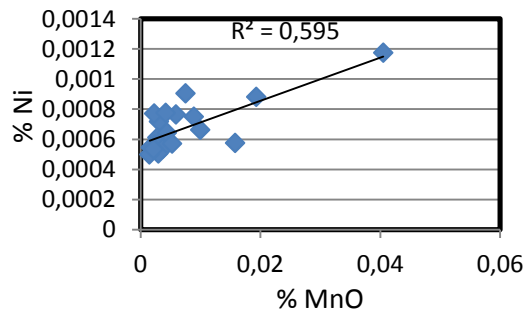
**Figura 151.** Relación Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> vs Ni



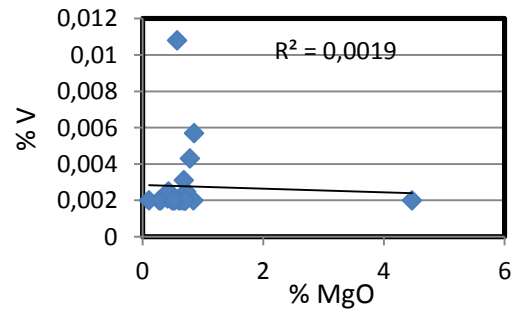
**Figura 152.** Relación MnO vs V



**Figura 153.** Relación MnO vs Zn



**Figura 154.** Relación MnO vs Ni



**Figura 155.** Relación MgO vs V

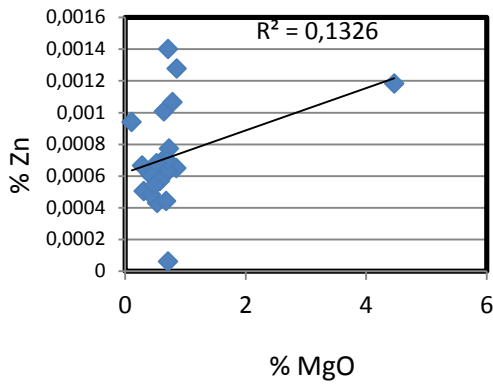


Figura 156. Relación MgO vs Zn

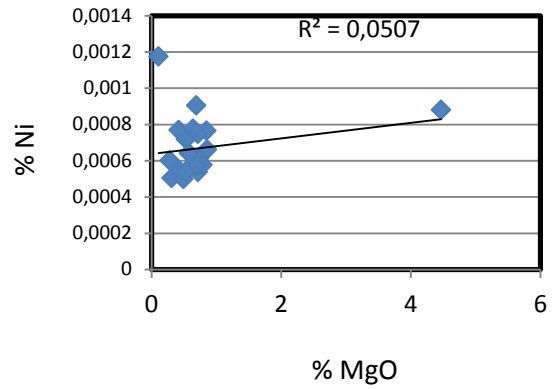


Figura 157. Relación MgO vs Ni

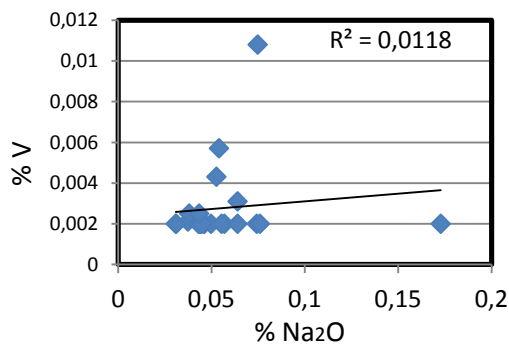


Figura 158. Relación MgO vs Zn

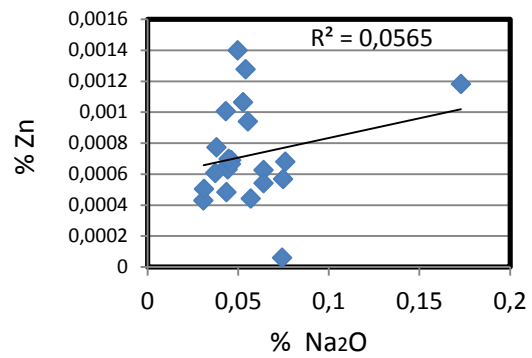


Figura 159. Relación Na2O vs Zn

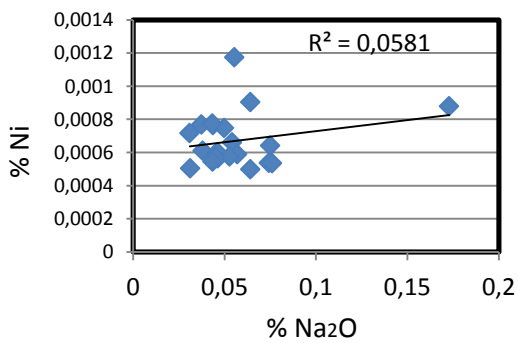


Figura 160. Relación Na2O vs Ni

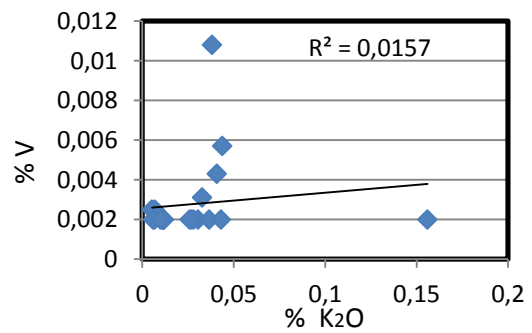


Figura 161. Relación K2O vs V

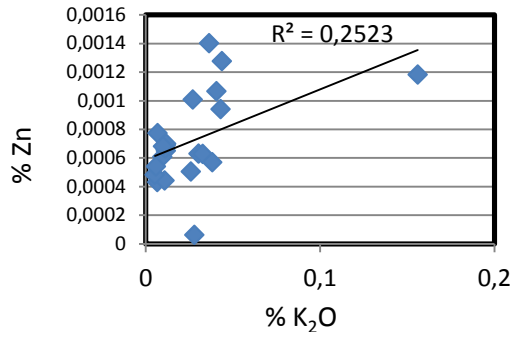


Figura 162. Relación K<sub>2</sub>O vs Zn

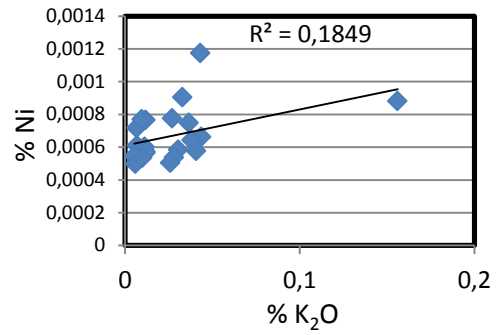


Figura 163. Relación K<sub>2</sub>O vs Ni

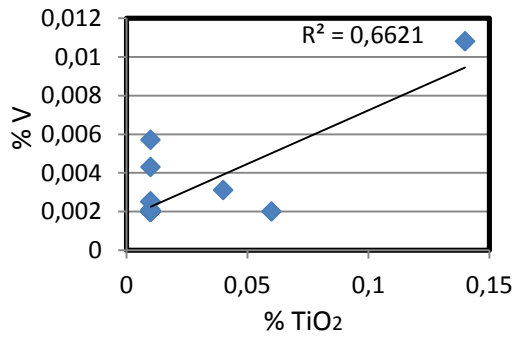


Figura 164. Relación TiO<sub>2</sub> vs V

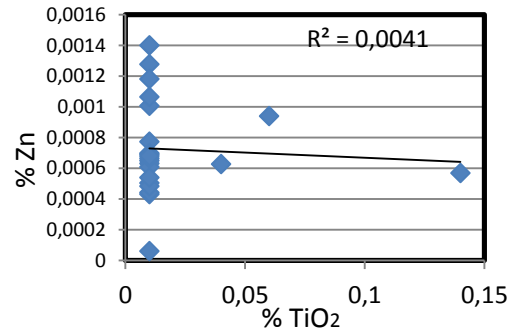


Figura 165. Relación TiO<sub>2</sub> vs Zn

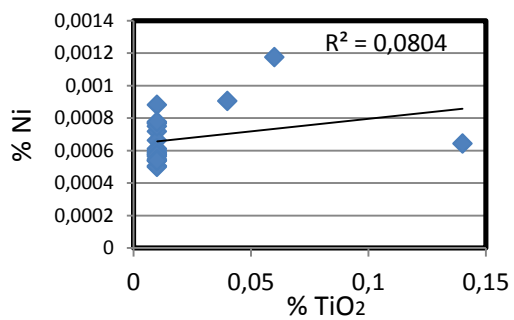


Figura 166. Relación TiO<sub>2</sub> vs Ni

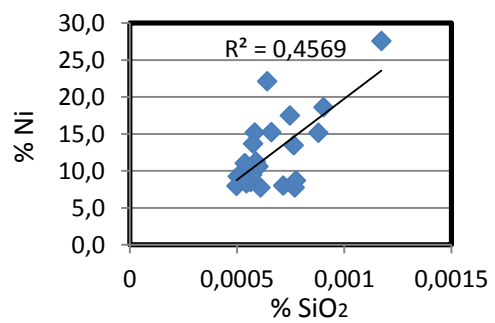
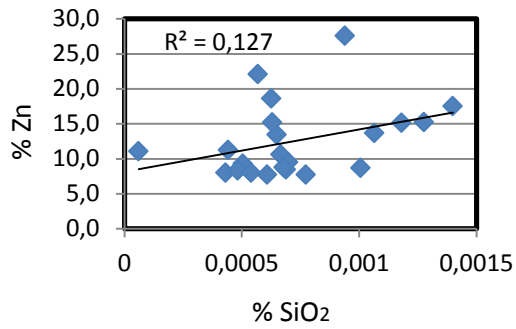
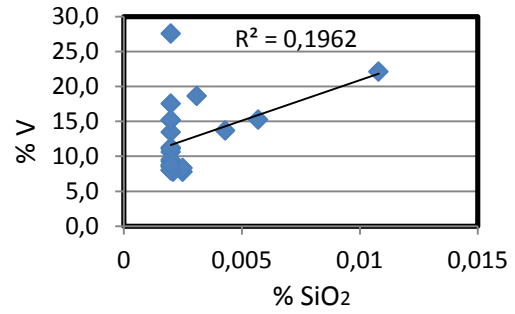


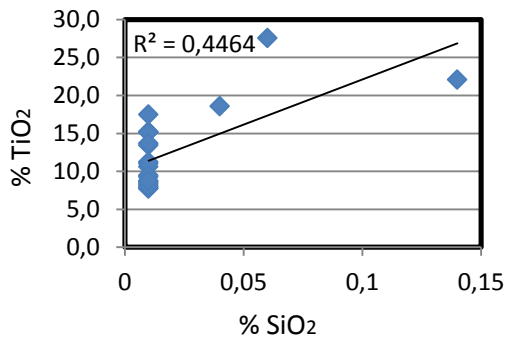
Figura 167. Relación SiO<sub>2</sub> vs Ni



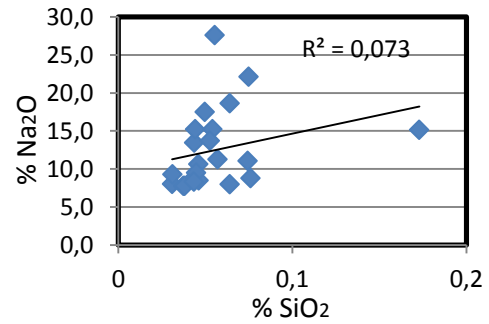
**Figura 168.** Relación SiO<sub>2</sub> vs Zn



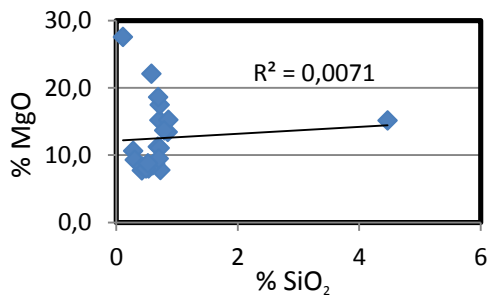
**Figura 169.** Relación SiO<sub>2</sub> vs V



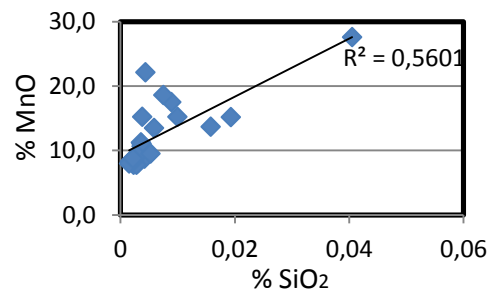
**Figura 170.** Relación SiO<sub>2</sub> vs TiO<sub>2</sub>



**Figura 171.** Relación SiO<sub>2</sub> vs Na<sub>2</sub>O



**Figura 172.** Relación SiO<sub>2</sub> vs MgO



**Figura 173.** Relación SiO<sub>2</sub> vs MnO

5.1. **Tabla 10.** Paradas y puntos GPS

ID	X	Y	Tipo
c1	419118	1240645	P1
c2	419178	1240529	P2
c3	419304	1240429	P3
c4	419350	1240175	P4
c5	419341	1240015	P5
c6	419262	1239963	P6
c7	419289	1239715	P7
c8	419266	1239573	P8
c9	419235	1239432	P9
c10	419164	1239178	P10
c11	419192	1239124	P11
c12	419332	1238648	P12
c13	419318	1238600	P13
c14	419084	1238505	P14
c15	418990	1238506	P15
c16	418901	1238534	P16
c17	418992	1238263	P17
c18	419129	1238150	P18
c19	419002	1238171	P19
c20	419349	1238202	P20
c21	419612	1238253	P21
c22	420036	1238197	P22
c23	420829	1238025	P23
c24	421344	1237964	P24
c25	420870	1237191	P25
c26	420678	1236916	P26
c26.	420393	1236428	P26.
c27	420138	1236599	P27
c28	419922	1236668	P28
c29	419697	1236671	P29
c30	419627	1236366	P30
c31	419958	1236143	P31
c32	419990	1235988	P32
c33	419952	1235705	P33
c34	419857	1235170	P34
c35	419933	1233973	P35

**ANEXO 1:**  
**COLUMNA ESTRATRIGRÁFICA**

**ANEXO 2:**  
**MAPA GEOLÓGICO A ESCALA 1:12.500**



**ANEXO 3:**  
**MODELO DE DISTRIBUCIÓN DE FACIES**