

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA DE LOS CARBONATOS LODOSOS DE
LA FORMACIÓN LA LUNA, EN LAS SECCIONES DE FLOR DE PATRIA Y
SAN PEDRO DEL RÍO, ESTADOS TRUJILLO Y TÁCHIRA
RESPECTIVAMENTE**

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Egleé Zapata.

TUTOR INDUSTRIAL: Prof. María Antonieta Lorente.

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de
Venezuela para optar al Título de
Ingeniero Geólogo
Por los Bachilleres:
Discepola M., Paolo
Rodríguez M., Darwing A.

Caracas, marzo de 2002.

Caracas, marzo de 2002

Los abajo firmantes, miembros del jurado designado por el Consejo de Escuela de Geología, Minas y Geofísica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por los bachilleres Paolo Discepola y Darwing Rodríguez, titulado:

“Caracterización geoquímica de los carbonatos lodosos de la Formación La Luna, en las secciones de Flor de Patria y San Pedro del Río, estados Trujillo y Táchira respectivamente”

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

Prof. Sebastián Grande
Jurado

Prof. Celia Bejarano
Jurado

Prof. Egleé Zapata
Tutor

Prof. María Antonieta Lorente
Tutor

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	1
INTRODUCCIÓN.....	3
Objetivos Generales.....	5
Objetivos Específicos.....	5
Trabajos Previos.....	7
Agradecimientos y Dedicatoria.....	10
Ubicación del Área de Estudio.....	11
METODOLOGÍA.....	13
Etapa de Campo.....	13
Etapa de Laboratorio.....	15
Etapa de Oficina.....	26
MARCO TEÓRICO.....	27
Geoquímica.....	29
Quimioestratigrafía.....	32
Elementos Mayoritarios y Minoritarios.....	32
Elementos Traza.....	33
Factores que Controlan la Distribución de los Elementos Químicos en el Medio Sedimentario.....	35

Características Geoquímicas de los Principales Elementos Formadores de Rocas.....	39
Contenido y Variaciones del Carbonato de Calcio (CaCO ₃).....	53
Carbono Orgánico Total (COT).....	54
Contenido de Materia Orgánica.....	55
Isótopos.....	56
Eventos Estratigráficos.....	63
GEOLOGÍA REGIONAL.....	68
Características Generales de la Región.....	68
Características de la Cuenca Cretácica en el Occidente de Venezuela.....	75
Litoestratigrafía del Cretácico en el Occidente de Venezuela.....	77
Características Estratigráficas del Cretácico del Occidente de Venezuela.....	87
GEOLOGÍA LOCAL.....	99
Sección de Flor de Patria.....	99
Sección de San Pedro del Río.....	110
Edad de la Formación La Luna en las secciones de Flor de Patria y San Pedro del Río.....	120

GEOQUÍMICA ORGÁNICA.....	125
Carbono Orgánico Total (COT).....	125
Contenido de Carbonato de Calcio (%CaCO ₃).....	134
Presión de Dióxido de Carbono (CO ₂).....	145
Isótopos Estables de Oxígeno ($\delta^{18}\text{O}$) y Carbono ($\delta^{13}\text{C}$).....	149
GEOQUÍMICA INORGÁNICA.....	163
Descripción de los Elementos a Utilizar.....	163
Características de la Roca Fuente.....	169
Indicadores de Condiciones Anóxicas.....	179
Indicadores de Aporte Clástico.....	204
Indicadores de Productividad Orgánica.....	223
RESULTADOS.....	236
MODELO PALEOAMBIENTAL Y PALEOCLIMATICO DE LA CUENCA DE MARACAIBO DURANTE EL CRETÁCICO TARDÍO.....	246
CONCLUSIONES.....	257
BIBLIOGRAFÍA.....	263

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 01, Ubicación de la Cuenca de Maracaibo.....	11
Figura 02, Ubicación de las Secciones en Estudio.....	12
Figura 03, Tubo de Reacción, tomado de Henríquez H. (Inédito).....	22
Figura 04, Línea de Alto y Bajo Vacío.....	23
Figura 05, Línea de Destilación, tomado de Henríquez H. (Inédito).....	24
Figura 06, Espectrómetro de Masa de Relaciones Isotópicas.....	25
Figura 07, Distribución de los Iones más comunes en el gráfico Z vs. r, tomado y modificado de Alberdi & Martínez (1999).....	36
Figura 08, Diagrama <i>pH</i> vs. <i>Eh</i> de estabilidad de algunos de los minerales más comunes, tomado y modificado de Alberdi & Martínez (1999).....	37
Figura 09, Esquema de la Composición Aproximada de las Rocas en cuanto a su contenido de Materia Orgánica.....	54
Figura 10, Factores que controlan la preservación de Materia Orgánica.....	55
Figura 11, Algunos factores que influyen en los cambios de los valores de $\delta^{18}\text{O}$	61
Figura 12, Algunos de los factores que controlan los valores de $\delta^{13}\text{C}$	63
Figura 13, Evolución Geotectónica de Venezuela, tomado y modificado de Parnaud <i>et al</i> ; (1995).....	74
Figura 14, Subcuencas del Occidente de Venezuela durante el Cretácico, tomado y modificado de García Jarpa <i>et al</i> ; (1980).....	76

Figura 15, Cuadro de Correlación del Occidente de Venezuela, tomado y modificado del Código Estratigráfico de las Cuencas Petroleras Venezolanas.....	77
Figura 16, Corte Esquemático mostrando la depositación de los sedimentos durante el Barremiense, tomado y modificado de Villamil & Pindell (1998).....	89
Figura 17, Corte Esquemático mostrando la forma de sedimentación durante el Aptiense, tomado y modificado de Villamil y Pindell (1998).....	90
Figura 18, Corte Esquemático de la depositación durante el Albiense Medio – Tardío, tomado y modificado de Villamil & Pindell (1998).....	92
Figura 19, Corte Esquemático de la depositación en la subcuenca de Uribante durante el Cenomaniense, tomado y modificado de Villamil & Pindell (1998)..	93
Figura 20, Corte Esquemático de la depositación durante el Turoniense – Coniaciense, tomado y modificado de Villamil & Pindell (1998).....	95
Figura 21, Corte Esquemático de la depositación durante el Santoniense – Campaniense, tomado de Villamil & Pindell (1998).....	96
Figura 22, Corte Esquemático demostrando el estilo de depositación durante el Maastrichtiense, tomado y modificado de Villamil & Pindell (1998).....	98
Figura 23, Ubicación Geográfica de la Sección de Flor de Patria.....	100
Figura 24, Vista de la sección de Flor de Patria.....	101
Figura 25, Vista de las intercalaciones de Lutitas calcáreas y Calizas presentes en la sección de Flor de Patria.....	103

Figura 26, Lutitas calcáreas presentes en la sección de Flor de Patria de la Formación La Luna.....	104
Figura 27, Detalle de las Concreciones calcáreas alongadas existentes en la sección de Flor de Patria.....	104
Figura 28, Forma del Pliegue Sinclinal donde se encuentra la sección de Flor de Patria.....	106
Figura 29, Mapa Geológico de la zona de estudio, Mapa E – 4 – D realizado por la CREOLE PETROLEUM CORPORATION en el año 1967, tomado y modificado de Madrid I., (2001).....	107
Figura 30, Corte Esquemático del Graben Asimétrico interpretado en la sección de Flor de Patria, tomado y modificado de Madrid I., (2001).....	108
Figura 31, Ubicación Geográfica de la sección de San Pedro del Río.....	111
Figura 32, Vista de parte de la Litología aflorante en la sección de San Pedro del Río.....	112
Figura 33, Detalle de las Concreciones presentes en la sección de San Pedro del Río.....	112
Figura 34, Detalle de la Unidad de Lutitas Calcáreas de la sección de San Pedro del Río.....	113
Figura 35, Detalle de la Litología presente en la Unidad de Transición en la sección de San Pedro del Río.....	114
Figura 36, Detalle de las capas de Chert presentes en la Subunidad de Calizas Silicificadas de la sección de San Pedro del Río.....	115
Figura 37, Región de la Depresión del Táchira.....	116

Figura 38, Detalle del Mapa Geológico del Área de San Pedro del Río, HOJA N° 5739 , realizado por el Ministerio de Energía y Minas.....	119
Figura 39, Comportamiento del % COT en la sección de Flor de Patria.....	126
Figura 40, Comportamiento del %COT en la sección de San Pedro del Río..	131
Figura 41, Comparación de las gráficas de % CaCO ₃ y % COT para la sección de Flor de Patria.....	135
Figura 42, Comportamiento de % CaCO ₃ para la sección de Flor de Patria...	136
Figura 43, Factores que controlan la producción de CaCO ₃	138
Figura 44, Comportamiento de la gráfica de %CaCO ₃ , en la sección de San Pedro del Río.....	140
Figura 45, Comparación de la gráficas de %CaCO ₃ y %COT para la sección de San Pedro del Río.....	142
Figura 46, Gráfica de Comportamiento Normalizado del %CaCO ₃ en la sección de San Pedro del Río.....	143
Figura 47, Representación gráfica de las Presiones de CO ₂ en la sección de Flor de Patria.....	147
Figura 48, Comparación de los valores de CO ₂ y CaCO ₃ para la sección de Flor de Patria.....	147
Figura 49, Comportamiento de las Relaciones Isotópicas de Oxígeno y Carbono para la sección de Flor de Patria.....	150
Figura 50, Ciclo de Acumulación de los Isótopos de Carbono, tomado y modificado de Stanley S. (1999).....	152

Figura 51, Abundancia de Foraminíferos Plánticos y Bénticos en la sección de Flor de Patria.....	153
Figura 52, Efectos de la Evaporación sobre la acumulación de Isótopos de Oxígeno, tomado y modificado de Stanley S. (1999).....	154
Figura 53, Comportamiento de las relaciones Isotópicas de Oxígeno y Carbono en la sección de San Pedro del Río.....	158
Figura 54, Comparación entre el comportamiento del %CaCO ₃ ; %COT y isótopos de Carbono y Oxígeno en la sección de San Pedro del Río.....	159
Figura 55, Contenido de Foraminíferos Bénticos para la sección de San Pedro del Río.....	161
Figura 56, Relación Na/Fe para la sección de Flor de Patria.....	171
Figura 57, Relación Na/Fe para la sección de San Pedro del Río.....	172
Figura 58, Gráfica de la relación K/Al para la sección de Flor de Patria.....	174
Figura 59, Gráfica de la relación K/Al para la sección de San Pedro del Río.....	175
Figura 60, Gráfica Log (Al/K) vs. Log (Al/Si) para la sec. de Flor de Patria....	177
Figura 61, Gráfica de los Log (Al/Si) vs. Log (Al/K) para la sección de San Pedro del Río.....	178
Figura 62, Gráficas del comportamiento de Cr, Rb, Cu, Zn, en la sección de Flor de Patria.....	182
Figura 63, Gráfica del comportamiento de Ni, V y Fe en la sección de Flor de Patria.....	182
Figura 64, Gráficas de las “Subunidades Geoquímicas” definidas para la sección de Flor de Patria.....	185

Figura 65, Gráfica de las “Subunidades Geoquímicas” definidas para la sección de Flor de Patria.....	185
Figura 66; Gráfica de la relación Fe/Mn para la sección de Flor de Patria.....	189
Figura 67, Formula para el calculo del Índice de Piritización (DOP).....	191
Figura 68, Gráfica de la relación $V/(V+Ni)$ para la sección de Flor de Patria..	192
Figura 69, Comportamiento de las gráficas de %Fe, %Zn y %Ni para la sección de San Pedro del Río.....	194
Figura 70, Comportamiento de las gráficas de % V, % Cu, y % Rb para la sección de San Pedro del Río.....	194
Figura 71, Gráfica de las “Subunidades Geoquímicas” definidas para la sección de San Pedro del Río”.....	198
Figura 72, Gráfica de la “Subunidades Geoquímicas” definidas para la sección de San Pedro del Río.....	198
Figura 73, Gráfica de la relación Fe / Mn para la sección de San Pedro del Río.....	201
Figura 74, Gráfica de la Relación $V/(V+Ni)$ para la sección de San Pedro del Río.....	202
Figura 75, Gráfica de la relación Si/Al en la sección de Flor de Patria.....	206
Figura 76, Gráfica del comportamiento del K, Na y Al para la sección de Flor de Patria.....	207
Figura 77, Gráfica del comportamiento del Ca, Si y Ti en la sección de Flor de Patria.....	208

Figura 78, Comparación entre indicadores de Condiciones Anóxicas y Aporte Clástico para la sección de Flor de Patria.....	209
Figura 79, Comparación del comportamiento del Fe, Al y Ti para la sección de Flor de Patria.....	211
Figura 80, Gráfica de la relación Ti/Al para la sección de Flor de Patria.....	212
Figura 81, Comparación del comportamiento de K y Na para la sección de Flor de Patria.....	213
Figura 82, Comparación del comportamiento del CaCO ₃ , Ca y Si para la sección de Flor de Patria.....	214
Figura 83, Comparación del comportamiento de la gráficas de Ca y Si para la sección de San Pedro del Río.....	216
Figura 84, Comparación del comportamiento de las gráficas de Si y Ni para la sección de San Pedro del Río.....	217
Figura 85, Comparación del comportamiento de las gráficas de Si, Na, Ti y Al para la sección de San Pedro del Río.....	219
Figura 86, Comparación del comportamiento de las gráficas de Fe, K y Al para la sección de San Pedro del Río.....	220
Figura 87, Relación Ti/Al para la sección de San Pedro del Río.....	222
Figura 88, Comparación del comportamiento de P y Ba para la sección de Flor de Patria.....	225
Figura 89, Comparación del comportamiento del Si y CaCO ₃ para la sección de Flor de Patria.....	227

Figura 90, Comparación de las cantidades de Foraminíferos Plásticos y Bénticos con el contenido de P y Ba en la sección de Flor de Patria.....	228
Figura 91, Comparación del comportamiento de las gráficas de Ba y P para la sección de San Pedro del Río.....	229
Figura 92, Comparación del comportamiento de las gráficas de Ba y Si para la sección de San Pedro del Río.....	230
Figura 93, Comparación de los contenidos de Foraminíferos Bénticos, %Ba y %Si para la sección de San Pedro del Río.....	231
Figura 94, Comparación entre los perfiles de Fe, Al, Ti y P en la sección de San Pedro del Río.....	232
Figura 95, Contenido de Foraminíferos Plánticos en la sección de San Pedro del Río.....	235
Figura 96, Ubicación relativa de las secciones estudiadas, tomado y modificado de García Jarpa <i>et al</i> ; (1980).....	236
Figura 97, Comparación de las temperaturas presentadas en el presente y durante el Cretácico, tomado y modificado de Jarvis I. (2000).....	246
Figura 98, Forma Idealizada de una Cuenca Anóxica Asimétrica del tipo “Mar Negro”, tomado y modificado de Arthur & Schlanger (1979).....	248
Figura 99, Clasificación Geoquímica de los Medios Sedimentarios, tomado y modificado de Berner J. (1981).....	250
Figura 100, Carta de Cambios del Nivel del Mar y de Eventos Anóxicos, tomada de Arthur & Schlanger; (1979).....	252

Figura 101, Algunas de las Variables que influyen durante los procesos de Anoxia Oceánica, tomado y modificado de Jarvis I. (2000).....	253
Figura 102, Procesos Geoquímicos que intervienen dentro de un evento Transgresivo Anóxico para que se produzca la preservación de la Materia Orgánica, tomado y modificado de Jarvis I. (2000).....	254
Figura 103, Procesos Geoquímicos que intervienen dentro de un Evento Regresivo, tomado y modificado de Jarvis I. (2000).....	255
Figura 104, Ubicación de las “Black Shales” alrededor del mundo durante el Cretácico Tardío, tomado y modificado de Stanley S. (1999).....	256

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 01, Trabajos previos para el occidente de Venezuela durante el Cretácico.	09
Tabla 02, Composición Típica de algunas rocas sedimentarias; tomado y modificado de Alberdi & Martínez (1999).....	29
Tabla 03, Abundancia de Oxígeno en algunas rocas Sedimentarias; tomado Y modificado de A.A. Beus (1976).....	41
Tabla 04, Abundancia de Sílice en algunas rocas Sedimentarias, tomado y modificado de A.A. Beus (1976).....	42

Tabla 05, Abundancia del Aluminio en algunas rocas Sedimentarias; tomado y modificado de A.A. Beus (1976).....	43
Tabla 06, Abundancia de Hierro en algunas rocas Sedimentarias; tomado y modificado de A.A. Beus (1976).....	45
Tabla 07, Abundancia de Magnesio en algunas rocas Sedimentarias; tomado y modificado de A.A. Beus (1976).....	46
Tabla 08, Abundancia de Calcio en algunas rocas Sedimentarias; tomado y modificado de A.A. Beus (1976).....	47
Tabla 09, Abundancia de Sodio en algunas rocas Sedimentarias; tomado y modificado de A.A. Beus (1976).....	48
Tabla 10, Abundancia de Potasio en algunas rocas Sedimentarias; tomado y modificado de A.A. Beus (1976).....	49
Tabla 11, Abundancia de Titanio en algunas rocas Sedimentarias; tomado y modificado de A.A. Beus (1976).....	50
Tabla 12, Abundancia de Manganeso en algunas rocas Sedimentarias; tomado y modificado de A.A. Beus (1976).....	51
Tabla 13, Abundancia de Fósforo en algunas rocas Sedimentarias; tomado y modificado de A.A. Beus (1976).....	52
Tabla 14, Características de la Formación Río Negro, tomada y modificada de García Jarpa <i>et al</i> (1980).....	78
Tabla 15, Características de la Formación Apón, tomado y modificado de García Jarpa <i>et al</i> (1980).....	79

Tabla 16, Características de la Formación Lisure, tomado y modificado de García Jarpa <i>et al</i> (1980).....	80
Tabla 17, Características de la Formación Maraca, tomado y Modificado de García Jarpa <i>et al</i> (1980).....	80
Tabla 18, Características de la Formación Aguardiente, tomado y modificado de García Jarpa <i>et al</i> (1980).....	81
Tabla 19, Características de la Formación Capacho, tomada y modificada de García Jarpa <i>et al</i> (1980).....	82
Tabla 20, Características de la Formación Peñas Altas, tomado y modificado de García Jarpa <i>et al</i> (1980).....	83
Tabla 21, características de la Formación La Luna, tomado y modificado de García Jarpa <i>et al</i> (1980).....	84
Tabla 22, Características de la Formación Colón, tomado y modificado de García Jarpa <i>et al</i> (1980).....	85
Tabla 23, Características de la Formación Mito Juan, tomado y modificado de García Jarpa <i>et al</i> (1980).....	85
Tabla 24, Carta Faunal local de la Formación La Luna en la sección de Flor de Patria, tomada y modificada de Madrid I. (2001).....	123
Tabla 25, Carta Faunal de Local de la Formación La Luna en la sección de San Pedro del Río.....	124
Tabla 26, Parámetros que describen el potencial generador de hidrocarburos de una roca madre, tomado y modificado de Peters K. E. (1986).....	125

Tabla 27, Parámetros que describen el potencial generador de hidrocarburos de un roca madre, tomado y modificado de Peters K.E. (1986).....	130
Tabla 28, Estándar de Concentraciones de Elementos Químicos.....	165
Tabla 29, Comparación de la concentración de los Estándares y las concentraciones obtenidas para la sección de Flor de Patria.....	166
Tabla 30, Comparación de la concentración de los Estándares y las concentraciones obtenidas para la sección de San Pedro del Río.....	167
Tabla 31, Concentraciones promedio de Elementos para el Intervalo I, en la sección de Flor de Patria.....	181
Tabla 32, Concentraciones promedio de Elementos para el Intervalo II, en la sección de Flor de Patria.....	183
Tabla 33, Concentraciones promedio de Elementos para el Intervalo I, en la sección de San Pedro del Río.....	195
Tabla 34, Concentraciones promedio de Elementos para el Intervalo II, en la sección de San Pedro del Río.....	196
Tabla 35, Comparación de los contenidos promedio de elementos para los intervalos definidos en la sección de San Pedro del Río.....	197
Tabla 36, Comparación de los contenidos promedio de Ba para la sección de Flor de Patria.....	224

CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA DE LOS CARBONATOS LODOSOS DE LA FORMACIÓN LA LUNA, EN LAS SECCIONES DE FLOR DE PATRIA Y SAN PEDRO DEL RÍO, ESTADOS TRUJILLO Y TÁCHIRA RESPECTIVAMENTE

Discepola M., Paolo y Rodríguez M., Darwing A.

Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Geología, Mina y Geofísica; Departamento de Geología

RESUMEN: este trabajo consiste en el estudio de dos secciones de la Formación La Luna del Occidente de Venezuela, en los estados Táchira y Trujillo, mediante el uso de diversas variables geoquímicas tales como; contenido de carbono orgánico total (%COT), contenido de carbonato de calcio (%CaCO₃), isótopos estables de oxígeno y carbono ($\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^{13}\text{C}$) junto con las concentraciones de ciertos elementos mayoritarios, minoritarios y traza, tales como: cobre (Cu), hierro (Fe), zinc (Zn), vanadio (V), níquel (Ni), aluminio (Al), titanio (Ti), fósforo (P), bario (Ba) y silicio (Si) entre otros, para establecer las distintas condiciones químicas y ambientales que marcaron la depositación de los sedimentos que conforman ambas secciones.

A partir de estos análisis, se pudo reconocer un intervalo (Coniaciense tardío – Santoniense temprano), de alto contenido de elementos como Cu, V, Ni, Fe y Zn entre otros, característicos de medios anóxicos sulfídicos, los cuales tienen altas condiciones de salinidad evidenciada por bajos valores de $\delta^{18}\text{O}$, al igual que la existencia de una escasa fauna béntica, siendo esto un indicio de poca actividad orgánica favorecida por la escasez de oxígeno en el medio, esto se puede determinar por bajos contenidos de P y Ba dentro de este intervalo, tales factores propician la preservación de gran cantidad de materia orgánica (altos contenidos de COT).

El segundo intervalo (Santoniense temprano – Santoniense tardío), dentro del cual se reporta una disminución gradual de los contenidos de elementos como Cu, V, Ni Zn y Fe, evidenciando esto una reducción de las condiciones anóxicas, de igual forma, hay un aumento del contenido de elementos tales como P, Ba, Si, los cuales dan indicios de alta de la productividad orgánica, la cual esta favorecida por el un aumento del contenido de oxígeno en las aguas de fondo. La tendencia anteriormente descrita no es constante dentro de este intervalo, ya que se reportan períodos cíclicos de buena

oxigenación y alto aporte de nutrientes, los cuales son definidos como SGS (subunidad geoquímica silicificada), estos cortos períodos producen un aumento de la productividad orgánica, generando disminuciones dramáticas del contenido de COT, proponiéndose como causa de la existencia de estos períodos la acción de las corrientes “*upwelling*”, junto con períodos de fuerte actividad volcánica que genera aumentos del aporte de elementos tales como Si y Ti dentro de la cuenca. La afectación de estos dos factores denota el inicio de cambios de carácter gradual tanto tectónicos como climáticos que afectaron todos los patrones sedimentarios acontecidos en la cuenca a partir del Santoniense temprano.

Mediante el estudio de los distintos modelos paleogeográficos planteados, se establece como la cuenca Cretácica del occidente de Venezuela se desarrolló en un margen pasivo con subsidencia de tipo termal, esta cuenca presenta un fondo marino irregular junto con antiguas zonas de expansión o surcos paralelos entre sí, las cuales constituyen áreas más deprimidas y donde se depositaron la mayor cantidad de sedimentos, estas áreas están limitadas por accidentes topográficos que actuaron como barreras que impidieron la normal circulación de las aguas dentro de la cuenca, estas áreas son definidas como subcuencas de Machiques, Uribante y Lara – Trujillo.

Debido a las condiciones restringidas que presentan las subcuencas, estas presentaron poco intercambio con aguas superficiales, lo provocó disminución del contenido de oxígeno típico de una cuenca anóxica. Por lo tanto, las características de estas subcuencas coincidieron con el modelo de cuenca anóxica cerrada comúnmente llamada cuenca tipo “Mar Negro”.

INTRODUCCIÓN

El proyecto comprende la evaluación geoquímica de los carbonatos lodosos de la Formación La Luna en las secciones de San Pedro del Río y Flor de Patria, en los estados Táchira y Trujillo, respectivamente.

El estudio establece la determinación de parámetros geoquímicos tales como: Carbono Orgánico Total (COT), elementos traza (Al, Fe, Mn, Ca, Ba, Mo, Cu, V, Zn, entre otros), de las muestras recolectadas en campo.

La zona de estudio presenta afloramientos de rocas reportadas en la literatura geológica como pertenecientes a la Formación La Luna en el Occidente del territorio nacional.

El principal objetivo de la investigación es analizar las rocas de esta Formación a través de métodos geoquímicos. Estudios geoquímicos realizados anteriormente en la Formación La Luna han tenido fines petroleros, específicamente en determinar el potencial generador de hidrocarburos de las rocas de dicha formación, por medio de la determinación de la madurez termal alcanzada por la materia orgánica durante los procesos diagenéticos que afectaron a tales rocas.

Sin embargo, los nuevos enfoques que presentan los parámetros geoquímicos se relacionan con correlaciones estratigráficas, con el objeto de determinar condiciones paleogeográficas prevaletientes durante la depositación de los sedimentos que pasaron a conformar los carbonatos lodosos de la Formación La Luna durante el Cretácico.

El tipo de investigación que se realizó es evaluativo, el cual presenta un diseño de campo y experimental conformado por cuatro etapas: la primera se refiere a la recopilación y revisión bibliográfica, al igual que a la planificación de las actividades a realizar, la segunda etapa comprende el desarrollo del campo en el área de estudio, la tercera etapa abarca las actividades de laboratorio para determinar los parámetros geoquímicos, finalmente, la cuarta etapa integra los análisis de los parámetros geoquímicos con la información litológica y bioestratigráfica predeterminada.

OBJETIVOS

Objetivo General:

- Evaluar geoquímicamente los carbonatos lodosos de la Formación La Luna en las secciones de San Pedro del Río y Flor de Patria, en los Estados Táchira y Trujillo.

Objetivos Específicos:

- Realizar un levantamiento geológico de las secciones San Pedro del Río describiendo su litología, estratigrafía, contenido fosilífero, estructuras sedimentarias y deformaciones apreciadas.
- Determinar, geoquímicamente, el contenido de Carbono Orgánico Total (COT) de las muestras recolectadas en el área de estudio.
- Determinar, geoquímicamente, el contenido de Carbonato de Calcio (CaCO_3) de las muestras recolectadas en el área de estudio.
- Analizar el comportamiento geoquímico de Elementos Traza (Al, Fe, Mn, Ca, Ba, Cu, V, Zn, Si, K, P, Cr y otros), en cada una de las secciones analizadas.

- Cotejar el comportamiento geoquímico de las muestras de cada afloramiento con la información litológica y bioestratigráfica obtenida por análisis petrográficos realizados en trabajos anteriores, para así establecer y calibrar las secciones para de esta manera establecer patrones de correlación.
- Establecer una correlación entre ambas secciones en base a elementos geoquímicos estudiados, que ayude a definir un marco paleoambiental y paleogeográfico de la cuenca de Maracaibo.

TRABAJOS PREVIOS

AÑO	AUTOR	RESEÑA
1937	Hedberg & Sass	Resumen de las formaciones geológicas de la cuenca Occidental de Venezuela.
1946	Liddle	Se describe en detalle la sección tipo de la Fm. La Luna, incluso su fauna característica y la distinción de algunas facies.
1946	Sutton	Indica el espesor de la Fm La Luna en una variedad de afloramientos en la cuenca de Maracaibo.
1954	Rod & Maync	Muestran la estratigrafía del Cretácico, a través de columnas litoestratigráficas y correlaciones de las principales localidades
1956	Renz	Estudio sobre el Cretácico en el oeste de Venezuela y la Guajira Colombiana.
1959	Renz	Se reconocen tres Miembros: La Aguada, Chejendé y Timbetes, en los estados Lara y Trujillo, de la misma manera se introduce el Miembro Ftanita de Táchira, Edo. Táchira.
1963	Ford & Houbolt	Estudio detallado de las microfacies de unidades litológicas del Cretácico de Venezuela occidental.
1976	Marcucci	Estudio detallado de las Ftanitas de Cretácico Superior de Venezuela.
1980	Jenkyns	Ambientes anóxicos del Cretácico. Ubica la Fm La Luna dentro de la facies pelágica epírica o mares continentales.
1981	Vierma	Realiza un estudio geoquímico de la Fm La Luna en su sección tipo en el Edo. Zulia.
1982	Jordan & Scherer	Realizan un estudio acerca del grado de madurez, origen y distribución del kerógeno de la Fm La Luna en su sección tipo.
1982	Beltrán	Presenta una columna litoestratigráfica de una sección de la Fm La Luna en el caserío La Aguada de Los Chivos, Barbacoas, Edo Lara
1984	Vierma	Realizo correlación a partir de datos geoquímicos, isotópicos y biomarcadores de crudos y rocas madres en la cuenca de Maracaibo
1985	Talukdar <i>et al</i>	Estudio geoquímico de las Formaciones La Luna y Querecual
1985	Cabrera <i>et al</i>	Estudio del potencial generador de petróleo de las rocas de la Fm La Luna mediante el método de hidropirólisis
1987	Jordan & Scherer	Estudio de la materia orgánica en la sección tipo de la Fm La Luna

1987	Macellari & De Vries	Estudio sobre las corrientes de surgencia en el Cretácico Superior y la sedimentación anóxica en el noroeste de Sudamérica.
1988	Boesi et al	Estudio estratigráfico del flanco Norandino en el sector Lobatera – El Vigía
1989	Méndez	Estudio de la Fm La Luna donde se propone un ambiente de sedimentación anóxico somero.
1989	Tribovillard	Estudio sedimentológico y geoquímico de la Fm La Luna en los andes venezolanos, en las secciones de Chejendé-Mitón-Cuicas-Cerro Gordo, Edo Trujillo, Carora y Barbacoas-Humocaro Bajo, Edo Lara.
1990	Andara	Estudio Geoquímico y evidencias de migración primaria sobre las rocas madres de las Fm La Luna y Apón en el pozo en el campo La Villa Edo Zulia
1991	Svrda <i>et al</i>	Se establecen biofacies típicas de zonas anóxicas dentro de la cuenca occidental de Venezuela
1991	Tribovillard et al	Estudio de la Fm La Luna en los andes venezolanos, donde se propone un ambiente de sedimentación de condiciones anóxicas y corrientes ascendentes a lo largo de la costa noroeste de Sudamérica.
1993	Savian	Establece litomicrofacies de la Fm La Luna a través de un análisis estadístico basado en correlaciones factorial y multivariadas.
1993	Stoufer	Establece la distribución regional del Carbono Orgánico Total (COT) y fósforo de la Fm La Luna en la cuenca de Maracaibo.
1994	Baptista	Establece el ambiente de la Fm La Luna en base a foraminíferos, de igual manera establece litomicrofacies que se integran con parámetros geoquímicos para evaluar el potencial generador de hidrocarburos.
1995	Romero & Galea	Estudio de las microfacies existentes de la Fm La Luna en el Occidente de Venezuela.
1997	Cooney & Lorente	Estudio sobre las implicaciones sobre la estratigrafía del occidente de Venezuela debido a un evento tectónico en el Cretácico Sup.
1999	Alberdi & Tocco	Se realiza un estudio de geoquímica orgánica e inorgánica de la Formación La Luna para definir sus características paleoambiental al igual que su potencial generador de hidrocarburos
1999	Crespo <i>et al.</i>	Se elabora una comparación de las características bioestratigráficas y quimioestratigráficas de la Formación La Luna dentro de la cuenca de Maracaibo para establecer parámetros de correlación entre ambas herramientas
1999	Davis <i>et al</i>	Se estudian los factores paleoambientales que propiciaron la anómala acumulación

		de materia orgánica y elementos trazas dentro de la formación La Luna
2000	Erlich et al	Estudio Geoquímico y Paleoambiental para determinar los ambientes depositacionales en el occidente de Venezuela durante el Cretácico Superior
2000	Jarvis	Estudio Geoquímico y Paleoambiental para determinar los cambios y establecer correlaciones en la secciones Cretácicas de alcance global
2000	Briceño & Callejón	Se realizó un estudio Quimioestratigráfico de la Formación. La Luna y sus equivalentes laterales para poder establecer ciertas características ambientales durante la depositación de estos sedimentos y poder establecer sus variaciones laterales
2000	Alberdi & Tocco	Se analizan desde el punto de vista geoquímico datos de pozos ubicados dentro de la cuenca de Maracaibo para analizar las características que controlaron el ambiente de depositación de las rocas madres y que favorecieron la preservación de grandes cantidades de materia orgánica.
2000	Zapata <i>et al</i>	Se analiza la Formación La Luna desde el punto de vista isotópico para lograr establecer ciertos cambios climáticos que pudieron afectarla y sus repercusiones sobre la depositación de los sedimentos, al igual que lograr establecer una correlación entre ambas secciones a partir de tales parámetros.
2001	Madrid I	Se estudia la Formación La Luna en la sección de Flor de Patria mediante métodos petrográficos, bioestratigráficos y quimioestratigráfico, para de esta manera establecer las características de depositación de esta formación relacionándola con su abundancia de vida y sus características litoestratigráficas.

Tabla 01, Cuadro esquemático de trabajos previos para el cretácico en el occidente de Venezuela.

AGRADECIMIENTOS

INSTITUCIONALES:

- A la Universidad Central de Venezuela, por brindarnos la oportunidad de una excelente formación como profesionales, tanto académicamente como éticamente.

- A PDVSA, por ofrecernos el apoyo económico y la accesibilidad al material tanto bibliográfico como humano para realizar este trabajo.

- A INTEVEP, y al personal del Laboratorio de Preparación de Muestras y Laboratorio de Extracciones Orgánicas, por ayudarnos en todo momento en los ensayos realizados.

PERSONALES:

Primeramente, debemos agradecer a nuestra tutora la profesora Egleé Zapata, y al profesor Víctor Padrón, quienes siempre nos dieron los mejores lineamientos y consejos durante la realización de este trabajo.

Realmente, existen tantas personas a quien agradecerles durante la realización de este trabajo tanto como en el transcurso de nuestra formación académica, que sería muy injusto de nuestra parte dejar de mencionar a muchas personas, por lo tanto ***Muchas Gracias*** a todos aquellos quienes en algún momento nos hallan ayudado de manera desinteresada.

UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El trabajo se realizó en dos secciones de la Formación La Luna, las cuales se ubican en el occidente de Venezuela, más específicamente dentro de la cuenca de Maracaibo (ver Figura 01), esta cuenca se encuentra limitada actualmente por un grupo de estructuras positivas, las cuales son; la Sierra de Perijá al Oeste, los Andes de Mérida al Sur y por la Serranía de Lara – Trujillo al Este.

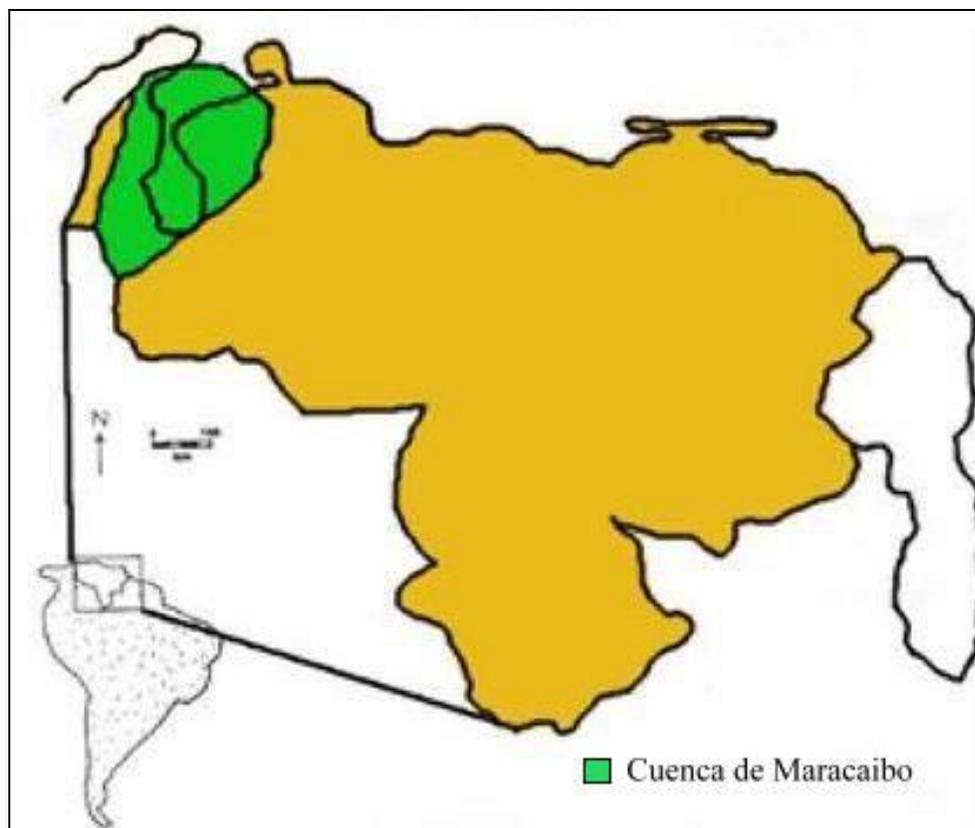


Figura 01, Ubicación de la Cuenca de Maracaibo.

Las secciones que se estudian en este trabajo están ubicadas en:

1. Sección de **Flor de Patria**; ubicada al Este del estado Trujillo, en el municipio del mismo nombre. La sección se encuentra en un corte de carretera en la vía Flor de Patria – Boconó (ver Figura 02).
2. Sección de **San Pedro del Río**; se encuentra en el pueblo de mismo nombre ubicado al Oeste del estado Táchira, en el municipio Pedro María Ureña, cercano a la población de San Juan de Colón (ver Figura 02).



Figura 02, Ubicación de las secciones de estudio.

ETAPA DE CAMPO

Esta fue la primera etapa del trabajo realizada. Ella se realizó en un periodo de 5 días y consistió en un reconocimiento de las características litoestratigráficas de las secciones de Flor de Patria (estado Trujillo) y San Pedro del Río (estado Táchira).

La finalidad de esta descripción es la elaboración de una columna estratigráfica detallada de ambas secciones, donde se puedan identificar todas las características observables en ellas, tales como: tipo de roca, color fresco y meteorizado, presencia de microfósiles, fracturas, contactos etc...

Conjuntamente, se realizó la toma muestras, la cual es la base esencial del trabajo, ya que los resultados de este, se basan en la interpretación de los datos aportados por los análisis realizados a las muestras.

El muestreo que se realizó en ambas secciones, es de tipo sistemático, el cual es ampliamente utilizado con fines de estudios geoquímicos. Este consiste en la toma de muestras a un espaciamiento constante entre ellas, sin estar este supeditado a la litología, ya que se desea obtener una alta resolución geoquímica, donde se puedan observar con facilidad cambios en las variables geoquímicas en las muestras. Para la sección de Flor de Patria (estado Trujillo) y San Pedro del Río (estado Táchira), el muestreo se realizó cada metro.

Las muestras se tomaron en roca fresca, presentando un tamaño aproximado de 15 cm y un peso de alrededor de 0,5 kg, siendo estas muestras debidamente

preservadas en bolsas de tela rotuladas, para evitar cualquier contaminación de las mismas.

Además del levantamiento geológico de las secciones estudiadas, se tomó un conjunto de fotografías en donde se puede observar la forma del afloramiento y la estructura dominante en ella, al igual que la determinación de ciertos contrastes de color entre las rocas y los contactos existentes entre distintas litologías presentes.

ETAPA DE LABORATORIO

METODOLOGÍA PARA LA PULVERIZACIÓN DE MUESTRAS

La pulverización de muestras es el primer paso para la determinación de parámetros geoquímicos como Carbono Orgánico Total (COT), Carbono mineral (CaCO_3), elementos mayoritarios, minoritarios y trazas, de la misma manera se utiliza en el tratamiento de muestras para determinar isótopos estables como δC^{13} , δO^{18} , etc.

Procedimiento:

1. Se separan pequeños trozos de una muestra de mano, con dimensiones de 1 cm a 3 cm.
2. Se trituran en un mortero de ágata, recubiertas con bolsas plásticas.
3. Se introducen los restos dentro de los cilindros pulverizadores, los cuales son de Carburo de Tungsteno. Se pueden pulverizar tres muestras a vez.
4. Se montan los tres recipientes sobre un soporte, los cuales se introducen dentro de la máquina pulverizadora (Shatterbox) marca SPEX modelo 8510, durante 30-45 segundos.
5. Se retiran las muestras y se colocan sobre papel de seda (carente de poros) con la ayuda de una espátula de poliuretano.

6. El polvo se introduce en unos recipientes de vidrio (Vial) y se rotula según sea la muestra.
7. Los recipientes cilíndricos se lavan con detergente, luego se les retira esta sustancia y se agrega Ácido Nítrico (HNO_3) al 10%, se deja por 5 minutos para que ácido reaccione y disuelva los restos de muestra que no pudieron ser eliminados mediante el lavado.
8. Se agrega Agua Destilada para neutralizar la acción del ácido.
9. Se procede a secar la muestra con un compresor de aire que libera la humedad de los recipientes.

DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE CARBONO MINERAL (CaCO_3)

- Se pesan en un Beaker de 100 ml, 400 miligramos (mg) de muestra, previamente pulverizada.
- Se añaden 20 ml de ácido clorhídrico (HCl), a una concentración o Normalidad de 2N.
- Se agita la muestra mientras se le agrega el HCl.
- En los casos que queden sólidos en suspensión dentro de la solución se debe agregar una cantidad suficiente de Acetona Analítica, hasta desaparecer los sólidos remanentes.
- Se tapa el Beaker con un trozo de papel de aluminio, al cual se le hacen dos (2) pequeños orificios.

- Se somete a digestión en una plancha de calentamiento por tres (3) horas a una temperatura de $45\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Culminada la digestión se deja enfriar y se titula con una solución de hidróxido de sodio (NaOH) con una concentración de 1.3 N, practicando el siguiente procedimiento:
 - Se agregan dos (2) gotas de fenolftaleína a la muestra, en el caso en que el procedimiento se lleva a cabo manualmente.
 - Se añade hidróxido de sodio (NaOH) utilizando una pipeta de 50 ml, y se agita hasta que la muestra tome una coloración púrpura, donde se detiene la operación.
 - Se anota el volumen de hidróxido de sodio (NaOH) gastado para el cálculo del porcentaje de CaCO_3 .
- Los datos de peso, volumen de álcali y COT, se introducen en una hoja de cálculo establecida, con un programa para la determinación del contenido de CaCO_3 de la muestra analizada

De igual forma el proceso de titulación de las muestras se puede realizar mediante el uso de un titulador automático (ver Anexo 01).

DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE CARBONO ORGÁNICO TOTAL (COT)

- Una vez titulada la muestra, se deja asentar la solución y se filtra en un crisol refractario, para obtener la muestra libre de carbonatos.
- Se deja secando la muestra presente en el crisol refractario dentro de un horno a una temperatura aproximada de 50 °C durante 12 horas.
- Se determina el porcentaje de COT en el equipo para la determinación de carbono (C) y azufre (S), marca LECO, modelo CS-244, atendiendo al siguiente procedimiento:
 - En un crisol limpio se añaden dos (2) medidas de catalizador de hierro (*iron chip accelerator*) y tres (3) medidas de lecocel II (acelerador de combustión para determinación de C y S), para establecer el estándar de calibración del equipo.
 - Se corren al menos cinco (5) veces el mismo estándar para obtener estabilidad en la señal de respuesta, en caso de no conseguir estabilidad en la señal, se debe aplicar un factor de corrección matemático.
 - Al calibrar el equipo (LECO CS-244), se procesan las muestras durante 15 – 20 minutos aproximadamente, las cuales ya han sido previamente tituladas, filtradas en un crisol y secadas en un horno por 12 horas aproximadamente.

METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE ELEMENTOS TRAZAS MAYORITARIOS Y MINORITARIOS

Se pesa 0.1 g de muestra previamente secada en la mufla a 105 °C durante 2 horas y colocadas en un recipiente de teflón para digestión en microondas. Las muestras fueron disueltas en 1 ml de ácido fluorhídrico (HF) concentrado, 7 ml de ácido nítrico (HNO₃) concentrado y 5 ml de peróxido de hidrógeno en un programa de temperatura y presión por microondas.

Una vez terminado la programación se deja enfriar el recipiente de teflón, se abre y se le agrega 6 ml de ácido bórico al 5 %. La muestra es transferida cuantitativamente a un balón de 50 ml y medida por la técnica de espectrometría de emisión atómica con plasma inductivamente acoplado (ICP-AES) para todos los elementos a excepción de sodio (Na) y rubidio (Rb) que fueron medidos por la técnica de emisión atómica con llama (EEA-Llama).

La mayoría de los elementos fueron medidos por la técnica de espectrometría de emisión con plasma atómico inductivamente acoplado (ICP-AES), la cual es una técnica multielemental rutinariamente utilizada en análisis geoquímicos. Esta técnica esta diseñada principalmente para soluciones que puedan ser nebulizadas, el procedimiento analítico presenta un primer paso fundamental denominado *digestión*, el cual consiste en tratar la muestra con una mezcla de

HCl-HNO₃ (diluido o concentrado) a bajas temperaturas (95 °C) por unas pocas horas.

Se continúa con el tratamiento con agua regia (HCl + HNO₃) para proveer una simple matriz ácida la cual es bien seguida por el ICP-AES, a pesar de ello, la materia orgánica en los suelos y sedimentos solo es parcialmente oxidada, trayendo como consecuencia la depositación de residuos de materia orgánica en la punta del nebulizador neumático y causar el bloqueo del mismo.

Por lo anteriormente expuesto se recomienda, una evaporación final con ácido perclórico (HClO₄), para favorecer la completa oxidación de la materia orgánica.

Los elementos como el sodio (Na) y el rubidio (Rb) fueron medidos a través de la técnica de espectrometría de emisión de energía térmica (en forma de llama, chispa o fuente de plasma), la cual consiste en excitar átomos a altos niveles de energía. Consecuentemente emitirán una radiación característica que puede ser aislada por un monocromador, la intensidad de radiación emitida es proporcional a la concentración de átomos presentes.

Para análisis de emisión la temperatura de la fuente de excitación ha de ser mayor en el orden de las mayores cantidades de átomos libres.

METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE ISOTOPOS ESTABLES DE CARBONO ($\delta^{13}\text{C}$) y OXIGENO ($\delta^{18}\text{O}$)

La metodología para la obtención de estos isótopos se fundamenta en la reacción de la muestra previamente pulverizada con ácido fluorhídrico (HF) al 100% de concentración a una temperatura de 25 °C, en un recipiente cerrado al vacío, para hacer reaccionar el carbonato y generar de esta forma CO_2 , el cual será analizado en un espectrómetro de masas de relaciones isotópicas.

De forma más específica la obtención de los isótopos estables de Oxígeno y Carbono se realiza en tres etapas fundamentales:

- 1. GENERACIÓN DE CO_2 :** A partir de la muestra previamente pulverizada se procede a generar la reacción en un tubo de cristal con dimensiones estandarizadas (ver Figura 03). En el fondo de este tubo se colocan 20 gr de muestra, tratando de no ensuciar las paredes del tubo (ya que si se dejan restos en las paredes del tubo la reacción no será completa).

En el dedal lateral del tubo de cristal (ver Figura 03) se introducen 3 ml de ácido fluorhídrico caliente, posteriormente se tapa con una llave, la cual se acopla a una línea de vacío (ver Figura 04), evacuando a bajo y alto vacío, en ese momento el tubo de reacción ha alcanzado un buen vacío, se cierra la llave y se retira el tubo. El tubo de reacción que

contiene la muestra al baño termostático, donde deja alrededor de media hora para aclimatarlo antes de que se inicie el ataque con ácido fluorhídrico.

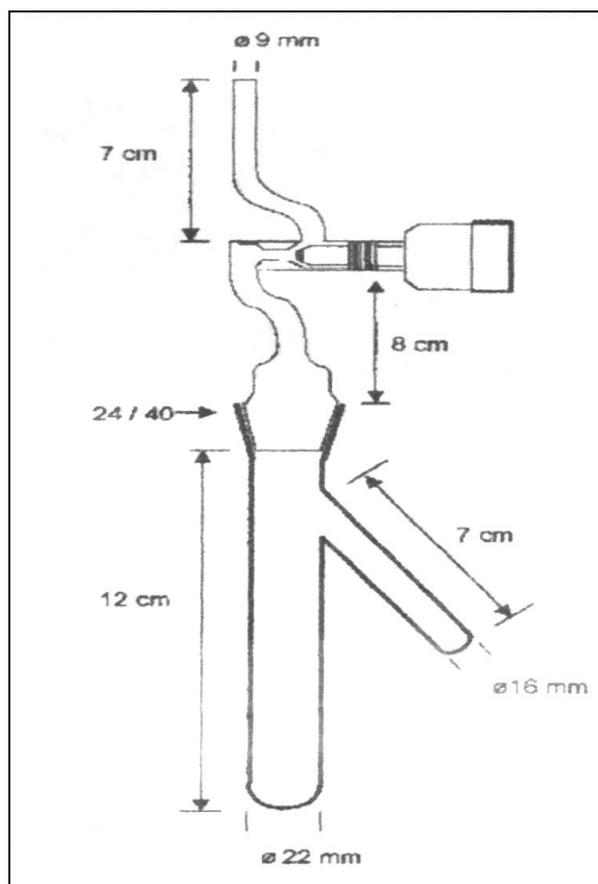


Figura 03, Tubo de Reacción, tomado de Henríquez H. (Inédito)

Finalizada la media hora se vierte el ácido sobre la muestra inclinando el tubo, e inmediatamente se regresara al baño termostático para completar la reacción, en donde la misma dura entre 4 a 15 horas.



Figura 04. Línea de Alto y Bajo Vacío

2. DESTILACIÓN: El CO_2 producto de la reacción se encuentra contaminado con vapor de agua y otros gases, debido a esto en esta fase se procede a la separación CO_2 del vapor de agua mediante un proceso de destilación criogénica.

La línea de destilación consta de tres trampas en forma de "U" (ver Figura 05), donde las dos primeras son sometidas a una mezcla frigorífica a base de nitrógeno líquido y alcohol n-propanol con una

temperatura de $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ que permite congelar el vapor de agua en las trampas.

En la tercera trampa se atrapa el CO_2 puro mediante un congelamiento debido a la acción de nitrógeno líquido a $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$, logrando de esta manera aislarlo, para luego ser descongelado y confinarlo en una ampolla.

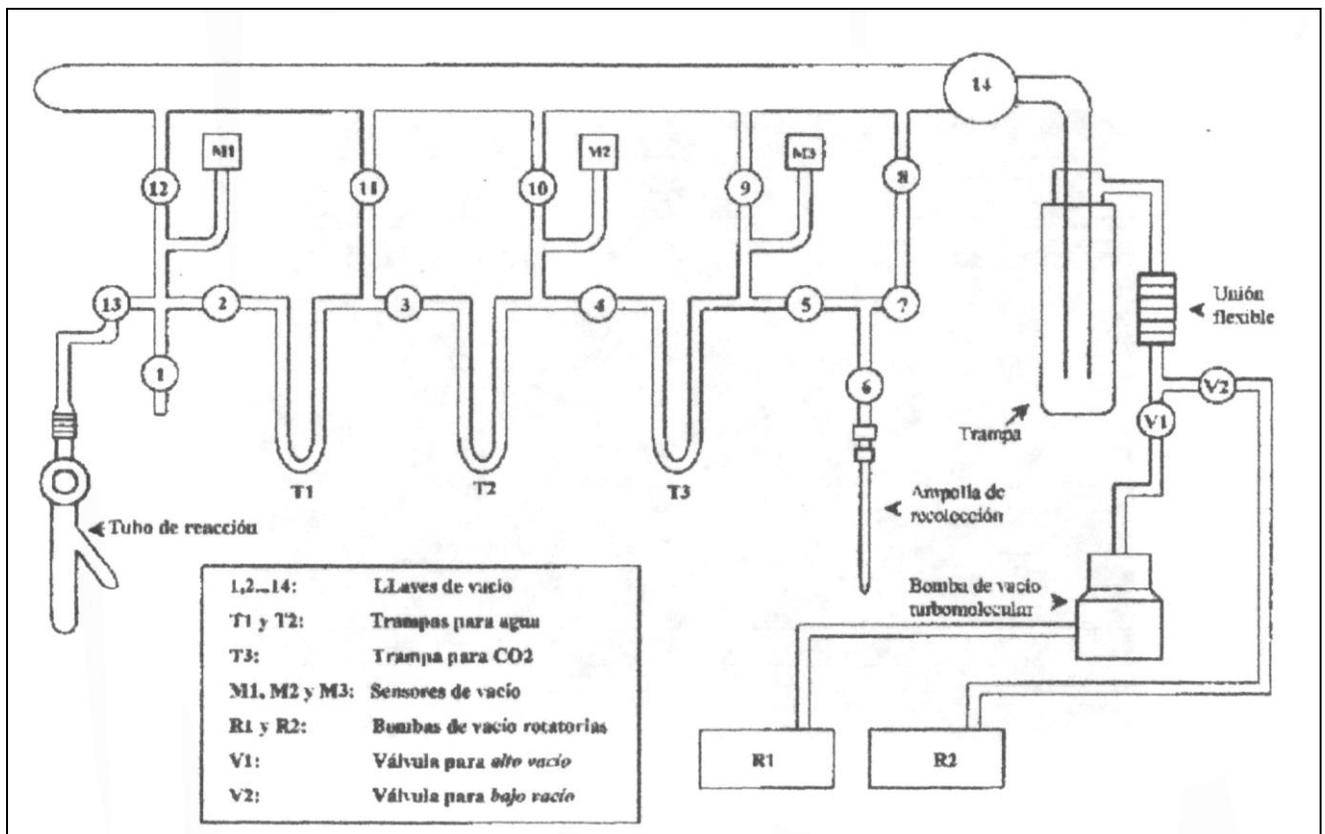


Figura 05. Línea de Destilación, tomado de Henríquez H. (Inédito)

3. ANALISIS DE COMPOSICIÓN ISOTÓPICA: La ampolla donde quedo confinado el CO_2 en la línea de destilación es analizada en un

Espectrómetro de masas de relaciones isotópicas (ver Figura 06), por medio del cual se realizarán las mediciones de las relaciones isotópicas de $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ y $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, respecto a un carbonato patrón el cual ha sido estandarizado mundialmente.

El espectrómetro se encarga de desdoblar el CO_2 en isótopos de ^{12}C , ^{13}C , ^{16}O y ^{18}O , de acuerdo a ciertas proporciones estandarizadas para cada roca.



Figura 06, Espectrómetro de Masa para la determinación de Relaciones Isotópicas

ETAPA DE OFICINA

A partir de los análisis realizados a las muestras tomadas en campo se obtuvieron una serie de datos, los cuales deben ser manipulados de forma correcta para poder interpretar un conjunto de características propias del medio en el cual se depositaron los sedimentos.

Mediante la concentración de elementos mayoritarios, minoritarios, trazas, contenido de Carbono Orgánico Total (COT), Carbono Mineral (CaCO_3) y relaciones isotópicas de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{18}\text{O}$, se elaboro un conjunto de tablas mediante la ayuda del programa Microsoft Excel, las cuales están dispuestas de base a tope para observar las variaciones de los patrones geoquímicos, a lo largo de la columna. Además de esto, las tablas se calibraron mediante información Bioestratigráfica de estas mismas secciones.

Al tener estas tablas correctamente calibradas se pudo evaluar de fácil manera los cambios en las variables geoquímicas estudiadas, que ocurren a lo largo del registro geológico, relacionándola de esta manera con eventos de alcance regional y global que afectaron de forma significativa el medio sedimentario, de igual forma a partir de estos datos se identificaron eventos de ocurrencia local.

MARCO TEÓRICO

Antes de dar inicio a cualquier estudio sobre la distribución geoquímica de los elementos en el medio sedimentario, es necesario tener conocimiento acerca de los protolitos (rocas fuente) con los cuales se inicia el ciclo sedimentario.

El primer proceso que se lleva a cabo una vez expuesta la roca fuente o protolito, es la meteorización, donde se presentan procesos físicos y químicos, que alteran la roca fuente, estos procesos son resultado de las condiciones climáticas existentes en las regiones donde se ubican los protolitos. Por lo tanto la meteorización puede ser dividida en; meteorización física y meteorización química, actuando generalmente de forma simultánea.

Durante la meteorización química se comienzan presentar ciertas cualidades geoquímicas de los elementos que conforman la roca el protolito, estas características permitirán explicar el fraccionamiento, empobrecimiento ó enriquecimiento relativo de los elementos en la roca fuente. Los procesos de meteorización química intensa en el protolito dan lugar a una extensa lixiviación de los elementos que presentan mayor movilidad geoquímica.

Luego de la meteorización se produce el transporte de los materiales producidos durante la meteorización, siendo este un proceso eminentemente físico, donde ocurren modificaciones importantes en el sedimento. Los procesos

mecánicos que permiten la disminución efectiva del tamaño de los granos, así como los cambios energéticos y el fraccionamiento hidráulico, actúan modificando la composición química del material transportado.

El ambiente sedimentario en el que se depositan los sedimentos, también participa en los procesos de alteración de éstos, siendo esta etapa del proceso sedimentario la que más importancia tiene en la modificación de los sedimentos. Los cambios producidos en la cuenca están restringidos especialmente por las condiciones fisicoquímicas bajo las que se acumula el material sedimentario.

Durante la diagénesis se producen cambios composicionales que imprimen su huella en la composición global de la roca sedimentaria. Dentro de los cambios químicos que ocurren durante el proceso sedimentario, los más importantes se llevan a cabo dentro de la cuenca en donde se deposita el material y durante la diagénesis de los sedimentos.

La composición de las rocas sedimentarias es muy susceptible a modificaciones, pues como se vio anteriormente, son varios los controles que operan cambiando la composición del material, desde la roca original hasta el sedimento final. La composición principal de algunas de las rocas sedimentarias en sus componentes típicos se muestra en la tabla 02:

ELEMENTO	ARENISCAS	LUTITAS	CALIZAS
Silicio (Si)	77,33	58,1	5,19
Titanio (Ti)	0,56	0,62	0,06
Aluminio (Al)	7,67	15,4	0,81
Hierro (Fe⁺³)	1,07	4,02	0,54
Hierro (Fe⁺²)	0,3	2,45	No determinado
Magnesio (Mg)	0,95	2,44	7,89
Calcio (Ca)	4,09	3,11	42,57
Sodio (Na)	0,68	1,3	0,05
Potasio (K)	1,27	3,24	0,33
Fósforo (P)	0,06	0,17	0,04
Carbono (C)	5,03	2,63	41,64
Azufre (S)	0,07	0,64	0,05
Bario (Ba)	0,05	0,05	No determinado
TOTALES	99,13 %	94,62 %	99,07%

Tabla 02, Composición típica de algunas rocas sedimentarias; tomado y modificado de Alberdi & Martínez (1999).

GEOQUÍMICA

Se refiere al estudio de la composición química de las diversas fases de la tierra y de los procesos físicos y químicos que han producido la distribución de los elementos en tales fases. La geoquímica clásica se dirigía principalmente a definir la abundancia de los elementos en los minerales y las rocas. Técnicas modernas, las más importantes de las cuales utilizan la dilución isotópica y la activación neutrónica, han aumentado mucho la sensibilidad y la exactitud de los análisis geoquímicos. La investigación geoquímica moderna concede considerable importancia a la determinación cuantitativa de temperatura, presión y tiempo en los sistemas geológicos. Los métodos basados en el fraccionamiento de los isótopos han demostrado ser muy útiles a este respecto.

En las últimas dos décadas, el impacto de la geoquímica de los isótopos en la ciencia de la tierra ha sido tan importante como el descubrimiento de la correlación estratigráfica por medio de los fósiles o la determinación de la estructura del subsuelo mediante los métodos geofísicos (Manson B., 1960).

GEOQUÍMICA DE LA DEPOSITACIÓN DE LOS CARBONATOS

El equilibrio de los carbonatos en solución en los cuerpos de agua depende en gran medida de los factores fisicoquímicos y una consecuencia de ello es que las rocas carbonáticas son excelentes indicadores de las condiciones del medio ambiente en que se depositaron. La presencia de calizas dentro de una formación marina revela, por ejemplo, una temperatura de las aguas relativamente elevada, pues esta favorece la evaporación con la consecuente disminución de la presión parcial de CO_2 y la sobresaturación del carbonato de calcio.

Además de la temperatura, en la precipitación de los carbonatos intervienen otros factores, tanto biológicos como inorgánicos. Entre los factores biológicos se cuentan no sólo la fijación del carbonato en los caparzones y esqueletos de distintos organismos, sino también la acción de bacterias que, como subproducto de su metabolismo, provocan su precipitación. La acción indirecta de las bacterias puede ser decisiva cuando, por ejemplo, el ataque bacteriano de restos de materia orgánica eleva, al generar NH_3 , el *pH* alrededor de la

partícula en descomposición, y produce la precipitación del carbonato. Las algas también pueden provocar la precipitación química de los carbonatos por consumo del CO_2 durante la fotosíntesis, con la consecuente elevación del pH , en ambientes excepcionalmente ricos en vida vegetal. El estudio de la composición química de los esqueletos formados por carbonato de calcio (CaCO_3) en organismos actuales ha puesto de manifiesto que la temperatura y la composición del agua de mar, donde viven, influye en su contenido de estroncio (Sr) y magnesio (Mg), así como en la proporción entre los isótopos ^{16}O y ^{18}O , y también en la relación aragonito/calcita que entra a formar parte del esqueleto.

Entre los agentes inorgánicos que influyen en la precipitación de los carbonatos se cuentan no sólo la temperatura, el pH y la concentración de CO_2 , sino también la presencia de otros elementos, tanto minoritarios como trazas, que no forman parte esencial de la molécula de carbonato. Los carbonatos pueden contener un número de elementos menores y trazas, que influyen o no en su precipitación. Algunos de los elementos hallados son: Mn, Fe^{+2} , Sr, Ba, Pb, Co, Zn, Mg, Cr, Ni, Al, Si, V, Cu, Ti, etc... Estos elementos pueden hallarse en solución sólida en el carbonato, o bien haber coprecipitado con éste, con frecuencia se les encuentra en inclusiones fluidas dentro del carbonato. El magnesio precipita como parte de la calcita (hasta 30% de MgCO_3), no así el aragonito, el cual puede incorporar más estroncio que la calcita. Como consecuencia, el contenido de magnesio y estroncio en el carbonato del

caparazón de los distintos organismos marinos depende, en consecuencia, de las cantidades relativas aragonito y calcita. El contenido de magnesio y estroncio depende también de otros factores, tales como la temperatura de formación, la edad geológica y la posición filogenética de la especie.

Otro aspecto de la geoquímica de los carbonatos que tiene importancia para la reconstrucción del ambiente de depositación es el relativo a la distribución de los isótopos de carbono y oxígeno (Vera J., 1994).

QUIMIOESTRATIGRAFÍA

Parte de la estratigrafía que se ocupa del estudio e interpretación de la composición geoquímica de las rocas sedimentarias representadas en las secciones estratigráficas (Alberdi & Martínez; 1999).

La geoquímica sedimentaria suministra dos tipos de datos: a) aquellos que sirven para la interpretación genética de los materiales (de unidad en Sedimentología y Petrología Sedimentaria), y b) Aquellos relativos a la evolución de los valores en una sección estratigráficas que sirven para la comparación (correlación) con otras secciones estratigráficas (Vera J., 1994)

ELEMENTOS MAYORITARIOS Y MINORITARIOS

En una roca sedimentaria se llaman componentes mayoritarios a los que constituyen la gran mayoría de la misma (Ejm. SiO_2 en rocas silíceas, CaCO_3 en rocas carbonáticas, etc.), mientras que se denominan componentes minoritarios a aquellos que están en pequeñas proporciones. Dentro de los minoritarios hay unos componentes cuya abundancia se mide en porcentajes y cuyo contenido varía de 0,1% a 5% en peso, por ejemplo: materia orgánica, residuos insolubles en carbonatos, etc. (Vera J., 1994)

ELEMENTOS TRAZA

La abundancia de estos elementos se mide en partes por millón (ppm) o en porcentajes (%). Entre los elementos traza existe una gran variedad, aunque en la práctica son pocos los utilizados en la quimioestratigrafía, entre los que destacan: Sr, Mg, Mn, Fe, K y Na. Con carácter más eventual se han utilizado: Ba, Ni, Cr, Ti, P, Cu, V y algunas Tierras Raras (Vera J., 1994).

Desde un planteamiento puramente teórico el conocimiento exacto de la abundancia de estos elementos en las diferentes rocas, y en especial, su evolución a lo largo de una sección estratigráfica, suministra un posible criterio de división y de correlación entre diferentes secciones estratigráficas de una misma cuenca. En la práctica este interés disminuye ya que se limita al estudio

de materiales carbonáticos, especialmente pelágicos, en los que las posibles modificaciones diagenéticas han sido menores, y, por tanto, su composición geoquímica es muy semejante a la original. En algunas secciones estratigráficas de materiales de plataformas marinas, ricos en materia orgánica y en algunas secciones de materiales salinos, han suministrado resultados prometedores.

El mayor interés se centra en el estudio de algunos elementos traza seleccionados que permitan delimitar conjuntos de estratos dentro de una sección estratigráfica caracterizados por su composición, que puedan ser seleccionados con secciones próximas (Vera J., 1994).

La determinación de estos elementos usualmente se hace mediante espectrofotometría de absorción atómica (AAS), microsonda en microscopía electrónica, espectrofotometría de llama, fluorescencia de rayos X (XRF) y espectrometría de plasma.

El análisis sistemático de las muestras permite obtener las curvas de variación de los contenidos de los elementos analizados, en conjunto con las curvas de CaCO_3 y de isótopos estables permiten delimitar intervalos o “zonas *quimioestratigráficas*”. Cada una de estas zonas quimioestratigráficas está caracterizada por unos valores geoquímicos y podrá ser reconocida en secciones estratigráficas cercanas.

La zonación quimioestratigráfica, basadas en elementos traza, puede constituir una herramienta de correlación, además de las zonaciones bioestratigráficas y magnetoestratigráficas, entre secciones estratigráficas de diferentes localidades, siempre dentro de una misma cuenca.

El conjunto de los valores de los elementos trazas estará controlado por los factores paleoceanográficos y paleoclimáticos, así como las posibles actividades hidrotermales y cambios en los patrones de aporte (Vera J., 1994).

FACTORES QUE CONDICIONAN LA DISTRIBUCIÓN DE LOS ELEMENTOS QUÍMICOS EN EL MEDIO SEDIMENTARIO (Alberdi & Martínez; 1999)

El comportamiento geoquímico de un elemento en el ambiente exógeno vendrá dado por la variación de los siguientes parámetros:

POTENCIAL IÓNICO: Esta propiedad se refiere a la relación entre la carga del ión respecto a su radio (Z / r), la cual es un parámetro que condiciona en gran medida el comportamiento geoquímico de los elementos. En la Figura 07, se observan tres grandes campos, los cuales se diferencian entre si por su capacidad de pasar o no al medio acuoso. En el campo superior izquierdo se ubican los iones fácilmente solubles;

en la parte central se observa la mayor parte de los elementos de transición, y los cuales en medio acuoso suelen hidrolizarse, formando óxidos u hidróxidos insolubles; y en el extremo inferior derecho se hallan las especies químicas con muy alta relación carga a radio, cuyo comportamiento en medio acuoso es mantenerse en solución vía formación de oxianiones solubles.

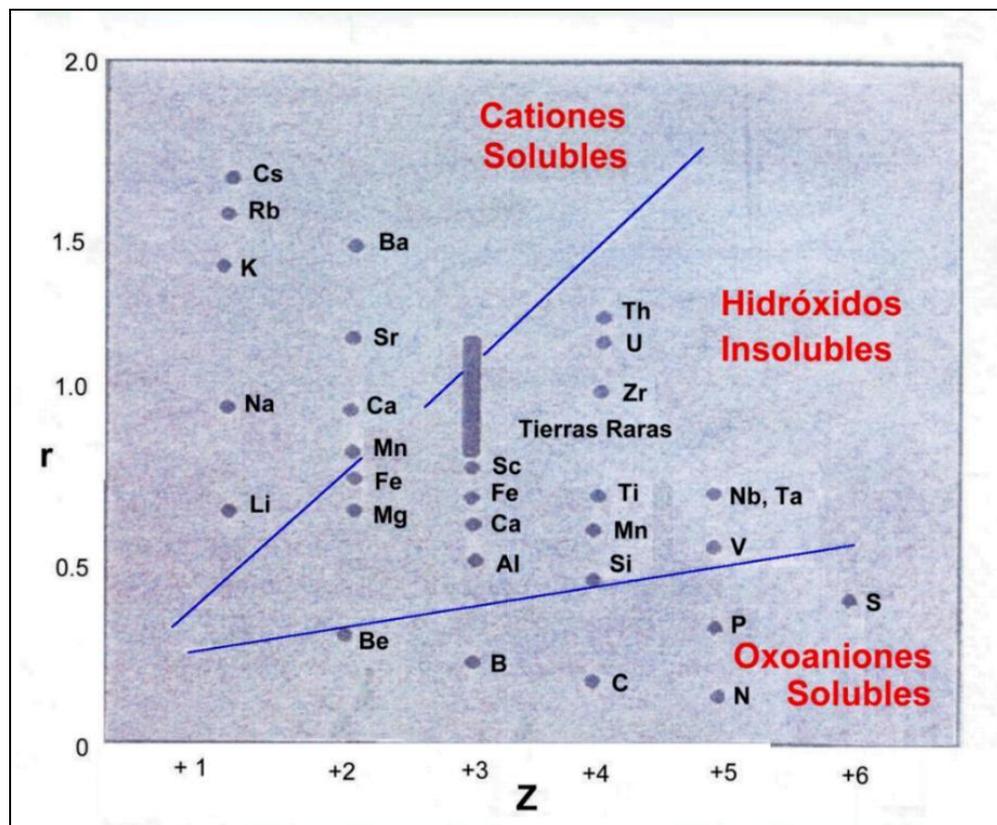


Figura 07, Distribución de los Iones más comunes en el gráfico Z vs. r, tomado y modificado de Alberdi & Martínez (1999)

- **CONCENTRACIÓN DE PROTONES (pH):** El pH , es una propiedad del medio en el cual se depositan los sedimentos, este tiene la prioridad de

descartar la solubilidad o no de una especie química, y hasta tal punto que en muchos ambientes sedimentarios sus condiciones particulares de pH propician la acumulación de un elemento por precipitación; y en otros casos, condiciones específicas de pH durante la meteorización de una roca parental determinan que un elemento se movilice en solución o se concentre en el suelo.

- **POTENCIAL ELECTROMOTRIZ (Eh):** Esta propiedad determina que especie en particular será termodinámicamente estable en el medio exógeno. Este condicionamiento es particularmente aplicable a los elementos químicos que posean la habilidad de presentar más de un estado de oxidación. Se puede generalizar un diagrama de $Eh - pH$ a fin de utilizarlo para explicar asociaciones sedimentarias relacionadas con limitaciones ambientales impuestas por algunas transiciones químicas muy comunes.

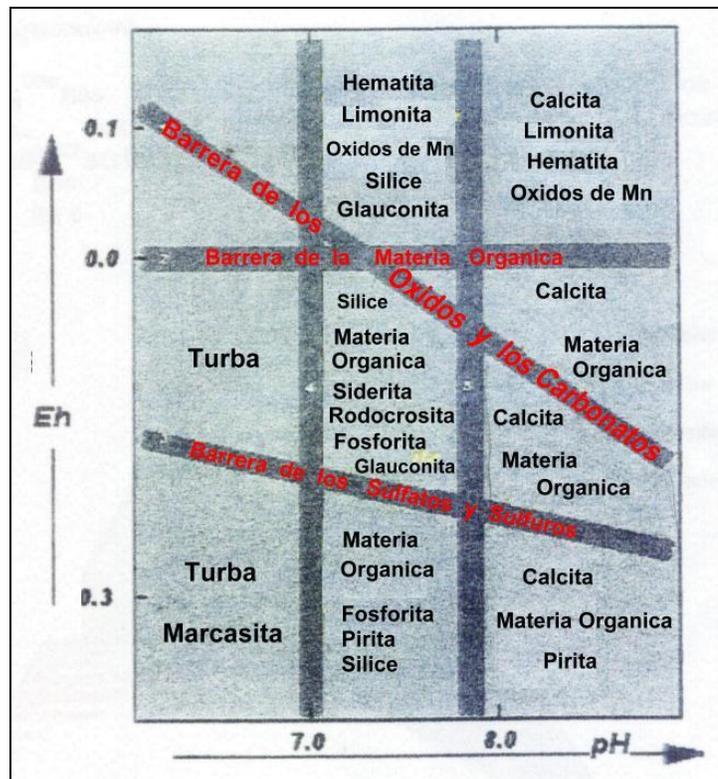


Figura 08, Diagrama pH vs. Eh de estabilidad de algunos de los minerales más comunes, tomado y modificado de Alberdi & Martínez (1999)

A partir de este gráfico se pueden definir un conjunto de campos típicos de ambientes sedimentarios, los cuales demuestran una asociación de productos geoquímicos resultantes.

A partir de los datos aportados por el contenido de elementos trazas en la rocas se pueden realizar una serie de graficas que ayudan a determinar diversas características propias de las rocas, las cuales no pueden ser definidas mediante el uso de elementos mayoritarios u otros, estas graficas dan indicios acerca de el tipo de roca, tipo de sedimento, tipo de meteorización dominante en la roca fuente, análisis de proveniencia, ambiente en que se encontraba la

roca parental, ambiente sedimentario en que se depositaron los sedimentos, entro otros.

Unas de las razones por las cuales se utilizan los elementos traza es la sensibilidad geoquímica que presentan estos elementos, la cual es mucho mayor que la de los demás, y pequeñas variaciones en sus concentraciones permiten determinar cambios en las rocas. Cabe destacar también que los elementos traza se prestan a mas “juegos geoquímicos” que los elementos mayoritarios, ya que estos rara vez se modifican de manera apreciable por efecto de las condiciones redox, adsorción sobre arcillas, o captura por materia orgánica (Alberdi & Martínez; 1999). Ente las relaciones que se pueden realizar con estos elementos destacan:

- Relación **Mn/Ca**: Ésta es utilizada para determinar la existencia de actividad hidrotermal dentro de un medio sedimentario (Vera J., 1994).
- Relación **Sr/Ca**: Ésta se utiliza para determinar cambios del nivel del mar dentro de una cuenca los cuales pueden correlacionarse a distancia con otros eventos de carácter global o regional (Vera J., 1994).
- Relación **Fe/Mn**: Ésta tiene una correlación negativa con el hidrotermalismo submarino, de manera que los valores máximos de Fe/Mn se corresponderán con etapas de mínimos hidrotermales y

viceversa, aunque mayormente es utilizada para determinar cambios en la condiciones redox de un medio (Vera J., 1994).

CARACTERÍSTICAS GEOQUÍMICAS DE LOS PRINCIPALES ELEMENTOS FORMADORES DE ROCAS (Beus A. A., 1976)

OXÍGENO (O₂): Es el elemento dominante en la litosfera y el manto de la tierra, de igual manera es el elemento más típico en el planeta. Los átomos altamente estables de oxígeno son unos de los más abundantes, siendo solo superados por el hidrógeno (H₂) y el helio (He). El oxígeno juega un papel primordial entre todas las sustancias que constituyen la tierra, ya que este está presente dentro de la composición química de la inmensa mayoría de estas.

Estudios realizados acerca de la geoquímica del oxígeno en varios tipos de roca en la corteza terrestre, arroja que la distribución de oxígeno a través de la geósfera tiende a mantener un equilibrio termodinámico y sus contenidos aumentan de forma significativa hacia la superficie del planeta, esta migración sufrida por el oxígeno dentro del campo gravitacional de la tierra es debida esencialmente a las presiones existentes en las capas más internas de la tierra.

EL OXÍGENO EN LAS ROCAS SEDIMENTARIAS: Este tipo de rocas contienen la mayor cantidad de oxígeno de las rocas de la corteza terrestre,

aunque existen otras rocas sedimentarias que presentan deficiencia de oxígeno (carbones, petróleo, bitúmenes etc.), sin perturbar esto el equilibrio general que presenta el oxígeno, ya que el peso molecular específico que presentan estos hidrocarburos es tan alto que impide que este tipo de roca exista en las zonas superiores del registro sedimentario.

Con el aumento de la profundidad de los sedimentos arcillosos y por ende la presión, se presenta el fenómeno de deshidratación de los sedimentos y de igual forma un decrecimiento del contenido total de oxígeno. Este proceso es acompañado por una reducción del Fe^{+3} bajo una relativa presión parcial de oxígeno, para que se inicie el proceso de metamorfismo de esas rocas, perdiendo gran cantidad de oxígeno (mayormente en forma de H_2O).

TIPO DE ROCA SEDIMENTARIA	CONTENIDO PROMEDIO (%) DE O_2	ABUNDANCIA (%) EN EL REGISTRO SEDIMENTARIO
Arcillas	49,5	53
Areniscas	51,5	25,4
Carbonatos	49,2	20,8
Evaporitas	6,73	0,8

Tabla 03, Abundancia de Oxígeno en algunas rocas sedimentarias; tomado y modificado de A.A. Beus (1976).

SILICIO (Si): Es uno de los principales elementos químicos de la corteza terrestre, es el segundo en importancia luego del oxígeno. El silicio es el catión mas ampliamente distribuido en la litosfera y tiene una fuerte afinidad con el

oxígeno. El silicio recoge gran parte del oxígeno libre en la litosfera formando compuestos muy estables y móviles. El gran volumen específico que presentan los complejos formados de silicio y oxígeno determina su migración y redistribución en la corteza y el manto, lo cual le permite establecer condiciones de equilibrio termodinámico.

LA SÍLICE EN LAS ROCAS SEDIMENTARIAS: El promedio de contenido de sílice en sedimentos pelágicos puede ser estimado en un 20,5 %, mientras que solo en las rocas carbonáticas el sílice no forma parte de los constituyentes esenciales.

Algunos sedimentos arcillosos ligeramente metamorfizados ó sin metamorfizar contienen en promedio menos sílice que los esquistos (las rocas graníticas presentan mayor contenido de sílice que rocas metamórficas tales como los esquistos). Aunque luego de un recalcu lo con la eliminación del dióxido de carbono (CO₂) y tomando en cuenta el exceso de agua, el contenido de sílice en las arcillas se hace similar al de los esquistos.

TIPO DE ROCA SEDIMENTARIA	CONTENIDO PROMEDIO (%) DE SiO ₂	ABUNDANCIA (%) EN EL REGISTRO SEDIMENTARIO
Arcillas	47,5	53
Areniscas	77.33	25,4
Carbonatos	4,40	20,8
Evaporitas	0,035	0,8

Tabla 04, Abundancia de Sílice en algunas rocas Sedimentarias, tomado y modificado de A.A. Beus (1976).

ALUMINIO (Al): Este elemento es otro de los más típicamente encontrados en la corteza terrestre, siendo su mineral de mena más importante la bauxita, encontrándose más ampliamente distribuido dentro de las rocas sedimentarias.

EL ALUMINIO EN LAS ROCAS SEDIMENTARIAS: Se observa un aumento del contenido en rocas como las arcillas, aunque no se observa una variación determinante en sus equivalentes metamórficos.

El aumento del contenido de Aluminio en las rocas sedimentarias arcillosas puede ser debido a la influencia de la actividad volcánica, mientras que el incremento del aluminio en este mismo tipo de rocas el cual es observado del Paleozoico al Mesozoico, es debido fundamentalmente a cambios drásticos de las condiciones depositacionales de las plataformas.

La distribución del contenido de aluminio en algunos sedimentos recientes son caracterizados por la alta varianza en el contenido de aluminio debido a que algunas especies aportan carbonatos a los sedimentos evitando así la proliferación de aluminio, en ejemplo de esto es la diferencia en el contenido de aluminio presentado por la limolita y la dolomita.

Como cálculo general se obtiene que el contenido promedio de aluminio en los sedimentos pelágicos es de alrededor de 6 %, luego de un recálculo eliminando el contenido de dióxido de carbono (CO₂) y agua se obtiene un contenido aproximado de 7,1%.

TIPO DE ROCA SEDIMENTARIA	CONTENIDO PROMEDIO (%) DE Al ₂ O ₃	ABUNDANCIA (%) EN EL REGISTRO SEDIMENTARIO
Arcillas	9	53
Areniscas	7.67	25,4
Carbonatos	0,96	20,8
Evaporitas	0,03	0,8

Tabla 05; Abundancia del Aluminio en algunas rocas Sedimentarias; tomado y modificado de A.A. Beus (1976).

HIERRO (Fe): Es el principal elemento químico en las capas más internas de la tierra. Su abundancia decrece desde las zonas más profundas hacia las partes superiores de las capas graníticas.

El átomo de hierro es el mas pesado dentro de los elementos formadores de roca, de igual forma, el hierro es uno de los pocos elementos formadores de roca que presenta valencia variable, lo cual marca su movilidad y juega un rol importante en el transporte del oxigeno dentro de la litosfera. El peso que presenta el átomo de hierro lo ubica en la parte inferior de la línea de diferenciación de las sustancias, ubicándole, de esta manera en la parte más interna de la tierra.

La forma más estable del hierro, es Fe^{+3} también llamada ión férrico, el cual es menos móvil que su otro ion Fe^{+2} (ferroso), por lo tanto es más abundante el Fe^{+3} en las rocas sedimentarias.

EL HIERRO EN LAS ROCAS SEDIMENTARIAS: Durante el Pre – Cámbrico se presentó un enriquecimiento en hierro en las rocas sedimentarias, producto de una vigorosa actividad volcánica (andesítica y basáltica). Posteriormente se ha determinado un decrecimiento del contenido de hierro en las arcillas, sugiriendo un agotamiento de la actividad volcánica máfica, también reflejando un crecimiento gradual del contenido de oxígeno en la atmósfera.

El contenido promedio de hierro en sedimentos pelágicos puede ser estimado en 3,66 %, mientras que el contenido de hierro de las arcillas es similar al de los esquistos, demostrando esto que no se produce enriquecimiento en este elemento durante el metamorfismo.

TIPO DE ROCA SEDIMENTARIA	CONTENIDO PROMEDIO (%) DE Fe_2O_3	ABUNDANCIA (%) EN EL REGISTRO SEDIMENTARIO
Arcillas	4,8	53
Areniscas	1,37	25,4
Carbonatos	0,86	20,8
Evaporitas	0,29	0,8

Tabla 06; Abundancia de Hierro en algunas rocas Sedimentarias; tomado y modificado de A.A. Beus (1976).

MAGNESIO (Mg): Al igual que el hierro, el magnesio es un elemento característico de la corteza terrestre, las cantidades de este elemento decrecen rápidamente hacia las partes más superiores de la litosfera. A diferencia del hierro el magnesio es mucho más móvil durante las etapas tempranas de la cristalización magmática.

EL MAGNESIO EN LAS ROCAS SEDIMENTARIAS: Los carbonatos juegan un papel importantísimo en la distribución del magnesio en las rocas sedimentarias, un ejemplo de ello son las limolitas, las cuales presentan un contenido muy pobre de magnesio, mientras las dolomitas tienen al magnesio como su catión dominante.

Se ha observado una disminución en el contenido de magnesio en las rocas carbonáticas del Pre – Cámbrico al Reciente, lo cual indica un rápido e irreversible cambio en el comportamiento geoquímico del magnesio, demostrando así variaciones en las condiciones depositacionales. El contenido de magnesio en los sedimentos oceánicos recientes es calculado en un 1,4 %.

TIPO DE ROCA SEDIMENTARIA	CONTENIDO PROMEDIO (%) DE Mg	ABUNDANCIA (%) EN EL REGISTRO SEDIMENTARIO
Arcillas	1,5	53
Areniscas	0,955	25,4
Carbonatos	4,6	20,8
Evaporitas	0,33	0,8

Tabla 07, Abundancia de Magnesio en algunas rocas Sedimentarias; tomado y modificado de A.A. Beus (1976).

CALCIO (Ca): El comportamiento del calcio durante la formación de la tierra es muy similar al del aluminio. El calcio migra desde el manto en los procesos de fusión concentrándose en los productos de cristalización. El contenido de calcio decrece gradualmente hacia los granitos. En los procesos de sedimentación la diferenciación biogénica determina el rol especial que tiene el calcio en la formación de rocas carbonáticas en las capas sedimentarias y el subsiguiente metamorfismo de las mismas. La separación biogénica del calcio de otros elementos es la principal característica de este elemento.

EL CALCIO EN LAS ROCAS SEDIMENTARIAS: La diferenciación natural del calcio de algunos sedimentos es compensada por su elevada concentración en las rocas carbonáticas.

Una disminución de la relación Mg / Ca en las rocas carbonáticas es observada a todo lo largo del registro geológico, siendo mas pronunciada en los tiempos post - paleozoicos.

TIPO DE ROCA SEDIMENTARIA	CONTENIDO PROMEDIO (%) DE Ca	ABUNDANCIA (%) EN EL REGISTRO SEDIMENTARIO
Arcillas	2,1	53
Areniscas	4,09	25,4
Carbonatos	32,5	20,8
Evaporitas	28,25	0,8

Tabla 08; Abundancia de Calcio en algunas rocas Sedimentarias; tomado y modificado de A.A. Beus (1976).

SODIO (Na): Este es un elemento que se encuentra uniformemente distribuido en la litosfera. Las propiedades químicas del sodio determinan su rol de importancia entre los elementos formadores de rocas sedimentarias, las cuales serán explicadas posteriormente.

EL SODIO EN LAS ROCAS SEDIMENTARIAS: Las rocas arcillosas en promedio contienen 0,5 – 1,0 % en contenido de sodio.

Dentro de todas las familias de rocas existe una desigual distribución de sodio, ya que éste es movilizado de las rocas sedimentarias continentales, debido a que la mayor cantidad de sodio se encuentra diluido en fluidos que rellenan los espacios porales en los sedimentos, y al ser éstos convertidos en roca y expuestos se pierde gran cantidad de sodio.

Se han realizado estudios de sedimentos oceánicos profundos encontrándose porosidades que varían entre 38 – 58 %, y al comparar las concentraciones de sales en los fluidos de poro con la del agua de mar, se obtiene una composición análoga, indicando esto que gran parte de las sales diluidas en los sedimentos provienen del agua de mar.

Una drástica caída en el contenido de sodio señala el desplazamiento de las soluciones de poro de la roca, mientras que la ausencia de sodio en las rocas

sedimentarias tomadas de afloramiento es un fenómeno secundario causado por la meteorización.

El contenido promedio de sodio en sedimentos pelágicos es de alrededor de 3,30 % y en sedimentos abisales arcillosos se presenta un promedio de 1,07 a 0,62 %.

TIPO DE ROCA SEDIMENTARIA	CONTENIDO PROMEDIO (%) DE Na	ABUNDANCIA (%) EN EL REGISTRO SEDIMENTARIO
Arcillas	0,91	53
Areniscas	0,68	25,4
Carbonatos	0,25	20,8
Evaporitas	31,32	0,8
Soluciones de Poro	1,05	

Tabla 09; Abundancia de Sodio en algunas rocas Sedimentarias; tomado y modificado de A.A. Beus (1976).

POTASIO (K): Este un elemento que se ha concentrado progresivamente durante la evolución de la tierra. El potasio tiene el ión más grande de los cationes formadores de roca y presenta buena capacidad de migración, para compensar esa cualidad, el catión de potasio es continuamente expulsado del manto y concentrado en las capas graníticas donde la fuerza gravitacional es favorable para la concentración de átomos de gran tamaño.

EL POTASIO EN LAS ROCAS SEDIMENTARIAS: La distribución de potasio en las arcillas es similar a la del sodio, pero a diferencia de este se presentan cantidades análogas de potasio en las arcillas, en los esquistos y en los gneises, además la distribución del potasio se hace más uniforme durante la sedimentación. El contenido de potasio es bajo en las rocas sedimentarias debido a la movilización de los iones de potasio dentro de la hidrosfera.

El contenido de potasio es similar en los sedimentos oceánicos y en las rocas sedimentarias, es decir, no se presenta enriquecimiento en los procesos de litificación y diagénesis.

TIPO DE ROCA SEDIMENTARIA	CONTENIDO PROMEDIO (%) DE K	ABUNDANCIA (%) EN EL REGISTRO SEDIMENTARIO
Arcillas	2,70	53
Areniscas	1,275	25,4
Carbonatos	0,25	20,8
Evaporitas	0,35	0,8

Tabla 10; Abundancia de Potasio en algunas rocas Sedimentarias; tomado y modificado de A.A. Beus (1976).

TITANIO (Ti): Este es un elemento muy característico que se ubica dentro de los elementos minoritarios en las rocas. Las mayores cantidades de titanio esta concentrado en rocas como garbos y basaltos derivadas del manto. También es muy común en las demás rocas del grupo de las máficas y ultramáficas.

EL TITANIO EN LAS ROCAS SEDIMENTARIAS: El contenido de titanio en rocas sedimentarias pelíticas incluyendo sedimentos oceánicos presenta contenidos similares a las granodioritas y ligeramente superiores a las areniscas. El contenido de titanio en las areniscas aumentado a partir de Pre – Cámbrico hasta el presente.

TIPO DE ROCA SEDIMENTARIA	CONTENIDO PROMEDIO (%) DE Ti	ABUNDANCIA (%) EN EL REGISTRO SEDIMENTARIO
Arcillas	0,62	53
Areniscas	0,56	25,4
Carbonatos	0,12	20,8
Evaporitas	0,03	0,8

Tabla 11; Abundancia de Titanio en algunas rocas Sedimentarias; tomado y modificado de A.A. Beus (1976).

MANGANESO (Mn): Este es otro elemento minoritario típico de la corteza terrestre. La distribución de este elemento es análoga a la del hierro y de igual manera presenta valencia variable.

El manganeso se presenta de forma típica en rocas ígneas y fuertemente metamorfizadas, en forma bivalente debido a su potencial de oxidación, presentando un comportamiento diferente durante su migración en soluciones post – magmáticas.

EL MANGANESO EN ROCAS SEDIMENTARIAS: El manganeso presenta patrones de migración similares a los del hierro, los cuales son diferenciados durante el ciclo sedimentario. Como resultado de ello algunos sedimentos (sedimentos abisales) son enriquecidos en manganeso imprimiéndoles de esta manera una gran importancia comercial.

La divergencia entre el manganeso y el hierro depende del aumento del contenido de oxígeno en la atmósfera, presentándose una disminución de la relación Mn / Fe al aumentar el contenido de oxígeno a través del registro geológico. Presentándose así gran cantidad de depósitos de manganeso desprovistos de hierro, debido a su oxidación por la alta cantidad de oxígeno presente.

TIPO DE ROCA SEDIMENTARIA	CONTENIDO PROMEDIO (%) DE Mn	ABUNDANCIA (%) EN EL REGISTRO SEDIMENTARIO
Arcillas	0,075	53
Areniscas	0,04	25,4
Carbonatos	0,042	20,8
Evaporitas	0,01	0,8

Tabla 12; Abundancia de Manganeso en algunas rocas Sedimentarias; tomado y modificado de A.A. Beus (1976)

FÓSFORO (P): El fósforo al igual que los anteriores es un elementos minoritario dentro de la corteza terrestre. La forma más común de encontrar el fósforo en la naturaleza es de la forma $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{OH}, \text{Cl})$: Apatito.

Desde un punto de vista químico el fósforo presenta triple enlace el cual es relativamente débil, por esta razón, el fósforo parece ser más reactivo. Éste es oxidado fácilmente por el aire a temperatura ambiente generando un brillo de apariencia fosforescente al contacto con el aire. Los óxidos de fósforo son P_4O_6 y P_4O_{10} , siendo este ultimo en su fase sólida un cristal molecular en el cual los grupos P_4O_{10} están en un arreglo centrado. Este sólido es una forma metaestable que es atacado fácilmente por el agua.

El fósforo, aluminio, titanio y el calcio son elementos derivados del manto y están concentrado principalmente en rocas máficas e intermedias, el fósforo es muy característico en las capas basálticas, presentándose en estrecha asociación con el calcio en el apatito.

El fósforo, igualmente que el titanio y el potasio tiende a concentrarse en las capas mas profundas de las rocas máficas y ultramáficas derivadas del manto. Bajo las condiciones gravitacionales del manto superior las propiedades de los elementos determinan su tendencia a migrar hacia la litosfera, con las soluciones acuosas y magmas producidos en el manto superior.

EL FÓSFORO EN LAS ROCAS SEDIMENTARIAS:

TIPO DE ROCA SEDIMENTARIA	CONTENIDO PROMEDIO (%) DE P	ABUNDANCIA (%) EN EL REGISTRO SEDIMENTARIO
Arcillas	0.07	53
Areniscas	0.06	25,4
Carbonatos	0.05	20,8
Evaporizas	0.05	0,8

Tabla 13; Abundancia de Fósforo en algunas rocas Sedimentarias; tomado y modificado de A.A. Beus (1976)

NÍQUEL (Ni): En la naturaleza se encuentra típicamente en forma de sulfuro mezclado con sulfuros de hierro, o como silicatos mezclados con magnesio. El níquel en su estado puro reacciona con el monóxido de carbono a temperatura ambiente formando Níquel Tetracarboxilo, $Ni(CO)_4$.

El níquel presenta propiedades muy parecidas a las del hierro, solo que se oxida con mayor dificultad que el hierro.

CONTENIDO Y VARIACIONES DE $CaCO_3$ (Vera J., 1994)

Su interés se limita al estudio de secciones estratigráficas de rocas carbonáticas marinas o lacustres, en especial, de aquellas que presentan ciclicidad de varios rangos superpuestos, reflejado en cambios en el contenido de $CaCO_3$.

La producción de carbonatos varía como respuesta a cambios ambientales graduales, siendo la variación en la profundidad del agua el más significativo de una serie de factores ambientales que determinan la precipitación del CaCO_3 .

El estudio de la distribución de los contenidos de CaCO_3 pone de manifiesto la alternancia rítmica de episodios con mayor o menor contenido de CaCO_3 , los cuales se relacionan con las épocas de paleomagnetismo, de manera que dentro de cada una de las épocas se diferencian varios ciclos. El espesor de cada uno de los ciclos está relacionado con la tasa de sedimentación y la duración de cada uno de éstos es análoga con secciones adyacentes dentro de una misma cuenca. Estas variaciones se deben a cambios climáticos que afectan al conjunto de océanos y regulan la productividad y/o condiciones de conservación de los carbonatos.

CARBONO ORGÁNICO TOTAL (COT) (Méndez, O., Inédito)

El Carbono Orgánico Total (COT), esta integrado por moléculas pequeñas solubles denominadas Bitumes o MOE también denominado Material Orgánico Extraíble (el cual constituye del 5 – 10% del COT), y por material orgánico insoluble de moléculas grandes denominado Kerógeno (ver Figura 09), el cual es precursor del petróleo. La cantidad, calidad y maduración termal del Kerógeno, determinan la capacidad generadora de la roca o sedimento.

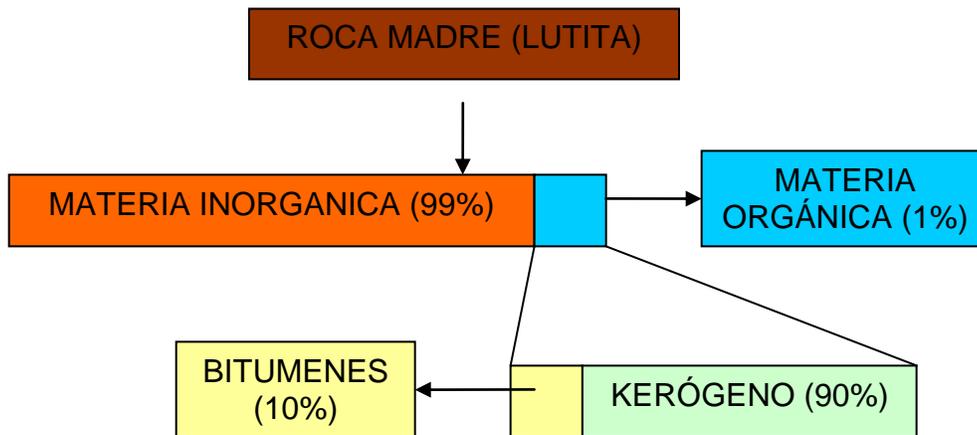


Figura 09, Esquema de la Composición aproximada de las rocas en cuanto a su contenido de Materia Orgánica

EL CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA (Vera J., 1994)

El contenido de materia orgánica en sedimentos y rocas sedimentarias se mide mediante pirólisis y se expresa en porcentajes en peso, respecto al total de la roca. Los contenidos de materia orgánica en las rocas carbonáticas o lutíticas varían normalmente de 0,1% a 1%, alcanzando valores muy superiores en los denominados *episodios anóxicos*, en los que el valor medio es del orden de 6% a 9%. Estos episodios anóxicos corresponden a intervalos en los que se

depositaron en el conjunto de los océanos materiales anormalmente ricos en materia orgánica, que se expresan también en una anomalía en los valores de isótopos estables de carbono, presentándose durante estos eventos ciertos factores que controlan la depositación de la materia orgánica, tal como se observa en la Figura 10. Dos episodios anóxicos han sido muy bien documentados en el registro estratigráfico del Mesozoico: uno de ellos corresponde al Toarciense inferior y el otro corresponde al límite entre Cenomaniense y Turoniense. Estudios en detalle consideran que en el Cretácico hubo como mínimo otros dos episodios anóxicos.

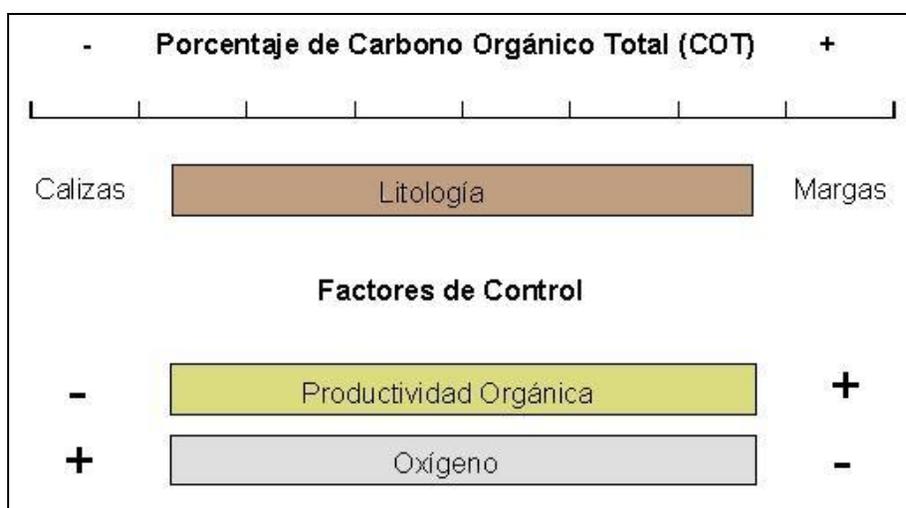


Figura 10, Factores que controlan la preservación de Materia Orgánica **ISÓTOPOS (Andrews & Kokes; 1964)**

Los núcleos de todos los elementos de la tabla periódica pueden ser imaginados como si estuvieran formados exclusivamente por protones y neutrones. Para especificar la estructura nuclear de los átomos, se escriben dos números con el signo del elemento, por ejemplo ${}^7_3\text{Li}$. En esta nomenclatura el

número inferior, que precede al símbolo, indica el número de protones del núcleo; el número superior que sigue al símbolo indica el número de protones más el número de neutrones.

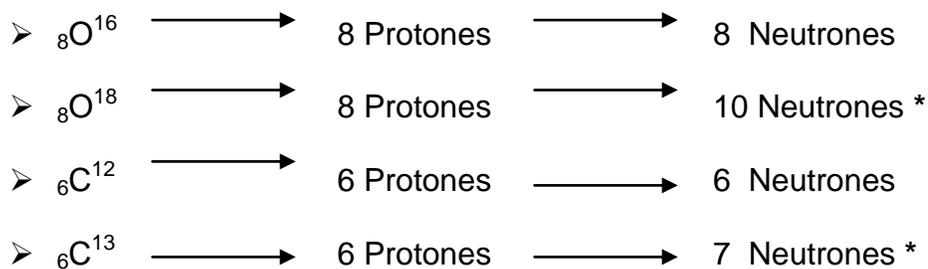
Dichos símbolos, no tan solo indican cual es la estructura del núcleo, sino también indican cual es la masa aproximada del átomo. En general, cada protón añade 1 u.m.a (Unidad de Masa Atómica) a la masa del átomo; igualmente cada neutrón contribuye con 1 u.m.a; por lo tanto la masa total de un átomo, en unidades de masa atómica, es aproximadamente igual al número de protones más neutrones.

A partir de este concepto, se pueden presentar varias formas de núcleos para los elementos, como por ejemplo el hidrógeno, el cual se puede presentar de dos formas: ${}_1\text{H}^1$ y ${}_1\text{H}^2$, siendo el ${}_1\text{H}^2$ denominado *deuterio* o *hidrógeno pesado*. Ambas sustancias proceden de un mismo elemento, pero un átomo de deuterio pesa el doble de un átomo de hidrógeno. Como en este caso dos especies de átomos tienen la misma carga nuclear pero diferentes masas, se les da el nombre de *isótopos*.

Las propiedades químicas de estos átomos diferentes son prácticamente las mismas, debido a que la distribución de los electrones alrededor de un átomo neutro determina las propiedades químicas, y esta distribución depende únicamente de la carga nuclear.

Los isótopos al poseer el mismo número atómico ocupan el mismo lugar en el sistema periódico de los elementos, debido a su mismo comportamiento químico, en cambio, es distinto su comportamiento físico debido a la desigual masa atómica, y en esta diferencia se basan los métodos de separación de isótopos.

Un ejemplo de los isótopos más comunes son:



* Isótopos Estables utilizados en este trabajo.

Entre los isótopos se pueden diferenciar dos tipos principales: los estables y los radiactivos. Los primeros permanecen con la misma estructura atómica a lo largo del tiempo, mientras que los radiactivos sufren un proceso de desintegración, que modifica su estructura atómica, hasta alcanzar estabilidad nuclear.

ISÓTOPOS ESTABLES (GONZÁLEZ F., 1982)

Se denominan de esta manera a los isótopos de elementos que presentan mayor estabilidad, es decir, aquellos que no presentan decaimiento radiactivo.

Los isótopos estables son los que tienen interés en la quimioestratigrafía ya que arrojan información sobre las condiciones de depositación de los materiales analizados, mientras que los isótopos radiactivos son los que se utilizan en la radiometría. Entre los isótopos estables de interés en la quimioestratigrafía destacan el oxígeno ($\delta^{18}\text{O}$) y el carbono ($\delta^{13}\text{C}$).

Las medidas de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{18}\text{O}$ se realizan simultáneamente sobre rocas carbonáticas sometidas a un tratamiento químico para la extracción del CO_2 de la muestra, el cual es analizado en un espectrómetro de masas, consistiendo dicho análisis en una valoración de las diferencias en las razones isotópicas $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ y $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ de la muestra a analizar con respecto a una muestra patrón o estándar.

Las composiciones isotópicas medidas son expresadas en tantos por mil con el símbolo δ , que define la relación entre la diferencia de la muestra a analizar y el estándar, y la propia composición del estándar (PDB):

$$\delta^{18}\text{O} = \frac{[(^{18}\text{O}/^{16}\text{O} \text{ de la muestra} - ^{18}\text{O}/^{16}\text{O} \text{ del estándar}) \times 1000]}{[^{18}\text{O}/^{16}\text{O} \text{ del estándar}]}$$

$$\delta^{13}\text{C} = \frac{[(^{13}\text{C}/^{12}\text{C} \text{ de la muestra} - ^{13}\text{C}/^{12}\text{C} \text{ del estándar}) \times 1000]}{[^{13}\text{C}/^{12}\text{C} \text{ del estándar}]}$$

Cuando la muestra del carbonato a analizar tenga la misma composición del estándar el valor será de cero, cuando dicha muestra tenga más abundancia del isótopo más pesado (^{18}O y ^{13}C , respectivamente) que en el estándar los valores del δ serán positivos, mientras que cuando los que más abunden (siempre en comparación con el estándar) sean los más ligeros (^{16}O y ^{12}C , respectivamente) los valores del δ serán negativos.

ISÓTOPOS ESTABLES DE OXÍGENO (VERA J., 1994)

El Oxígeno se presenta en la naturaleza bajo una forma dominante ^{16}O (99,76%) y otros dos isótopos minoritarios ^{17}O (0,04%) y ^{18}O (0,2%), debido a su abundancia y a la diferencia de masa, la razón isotópica que se utiliza es $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, expresada en partes por mil con respecto a un estándar (PDB).

Los valores de $\delta^{18}\text{O}$ de una roca sedimentaria pueden ser los originarios del depósito o haber sufrido modificaciones en la diagénesis. La interpretación genética y el significado paleogeográfico se limitan a los casos en los que los valores originarios obtenidos se mantengan, sin haber sufrido modificación. Esto es característico de rocas carbonáticas de ambientes marinos pelágicos, mientras que las originadas en ambientes más someros, costeros y continentales, pueden enmascarar la señal isotópica original por cambios diagenéticos.

La señal isotópica originaria de $\delta^{18}\text{O}$ de un fósil o de una roca sedimentaria depende de varios factores:

Salinidad: (ver Figura 11) Los valores de $\delta^{18}\text{O}$ aumentan al hacerlo la salinidad y son mínimos en las aguas dulces. En medios pelágicos la salinidad tiende a mantenerse constante, por lo que este factor presenta interés en medios restringidos o medios marino someros en los que la salinidad puede cambiar considerablemente por la entrada de aguas dulces y/o por evaporación.

Efecto Vital: Se refleja en cambios pequeños de la composición isotópica de diferentes géneros o especies con caparazón calizo. Los valores entre dos especies diferentes a lo largo de una sección estratigráfica presentan valores paralelos, de manera que todas las muestras presentan diferencias análogas.

Efecto Glacial: (ver Figura 11), Está relacionado con el desigual contenido en los isótopos del agua marina, del vapor de agua de las nubes, del agua de lluvia y del hielo de los glaciares. La relación global del $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ en la superficie de la Tierra es constante, de manera que un crecimiento de los casquetes glaciares, con la consiguiente concentración de isótopos más ligeros, conlleva a un aumento de la misma relación en el agua de los océanos. En definitiva una alternancia de períodos glaciales e interglaciares implicará cambios en las razones isotópicas del agua.

Los cambios del $\delta^{18}\text{O}$ en una sección estratigráfica de materiales pelágicos estarán, preferentemente, ligados al efecto glacial y a los cambios de temperatura. El efecto glacial se refleja en ritmicidades de corto período (20.000-100.000 años) que se constatan en ciclos de espesor decimétrico o métrico, según la tasa de sedimentación, con cambios en los valores del $\delta^{18}\text{O}$ en el orden de relaciones porcentuales de 0,5%, que coinciden con variaciones de CaCO_3 .

Los cambios de temperatura quedan reflejados en cambios del $\delta^{18}\text{O}$ de mayor envergadura tanto en magnitud, como en duración. Se trata de cambios que pueden implicar varias unidades del $\delta^{18}\text{O}$ y que separan intervalos de duración siempre superior al millón de años.



Figura 11, Algunos factores que influyen en los cambios de los valores de $\delta^{18}\text{O}$

ISÓTOPOS DE CARBONO (VERA J., 1994)

La razón isotópica que se utiliza es: $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, expresada en partes por mil con respecto a un estándar (PDB). La distribución estratigráfica del $\delta^{13}\text{C}$ presenta las siguientes características:

Efecto Vital: es un factor que controla la razón isotópica del carbono, ya que para cada especie de organismo los valores absolutos del $\delta^{13}\text{C}$ son diferentes.

Contenido de Materia Orgánica (ver Figura 12): altas concentraciones de materia orgánica llevan consigo aumento (tienden a valores menos negativos) de la relación isotópica del carbono en los sedimentos que se depositan. Los

episodios anóxicos, caracterizados por alto contenido de materia orgánica, se corresponden con máximos (valores cercanos a cero) de $\delta^{13}\text{C}$.

Existe un paralelismo entre la curva de las variaciones del $\delta^{13}\text{C}$ y la curva de los cambios relativos del nivel del mar. En los períodos de nivel del mar alto, la superficie continental se reduce, lo que trae consigo una reducción de aportes nutritivos de procedencia continental al océano, por lo que aumenta la relación isotópica del carbono. En definitiva, una transgresión quedará reflejada en variaciones hacia valores más positivos del $\delta^{13}\text{C}$, mientras que una regresión se reflejará en variaciones hacia valores más negativos.

Otros factores que pueden reflejarse en cambios del $\delta^{13}\text{C}$ son: fluctuaciones de la biomasa de los continentes inducidas no por cambios del nivel del mar, sino por cambios climático y/o evolutivos, incendios forestales de grandes dimensiones, cambios en la circulación oceánica que influyan en la distribución de las masas más o menos ricas en materia orgánica.

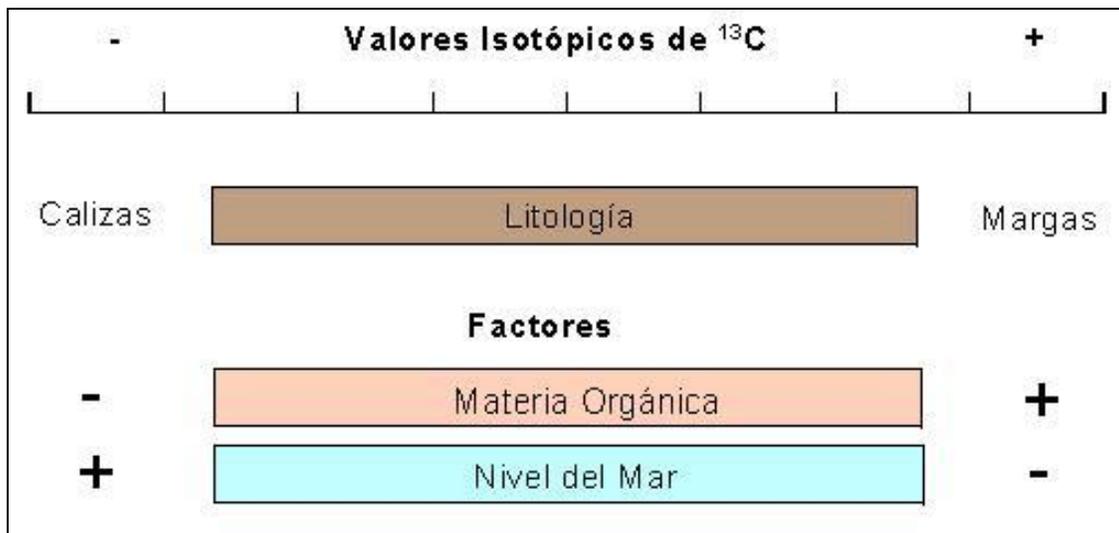


Figura 12, Algunos de los factores que controlan los valores de $\delta^{13}\text{C}$

EVENTOS ESTRATIGRÁFICOS

CONCEPTO DE EVENTO EN ESTRATIGRAFÍA (Vera J., 1994)

El término *evento* se aplica a los fenómenos excepcionales que acaecieron a lo largo de la historia geológica y que pueden quedar reflejados en las secciones estratigráficas. Se definen como eventos a los “fenómenos geológicos raros y eventuales, que quedan reflejados en el registro estratigráfico, que se superponen a los fenómenos normales y frecuentes”.

Un criterio esencial para considerar evento, establecido en la definición, es que quede reflejado en el registro estratigráfico y que, por tanto, pueda deducirse a partir del estudio de las secciones estratigráficas. De acuerdo con la técnica que

se utilice para reconocerlos se puede hablar de eventos físicos, químicos y biológicos.

Los **eventos físicos** son aquellos que se reconocen en las secciones estratigráficas mediante la observación y la medida. Un ejemplo de estos eventos corresponde a los reflejados mediante discontinuidades estratigráficas apreciables en distintos sectores de la cuenca.

Los **eventos químicos** son aquellos que se detectan mediante análisis químicos. Incluyen varios tipos, entre ellos los niveles de concreciones o de costras de óxido de Fe y Mn, los niveles estratiformes de fosfatos, los cambios bruscos en el contenido de materia orgánica medidos por el Contenido de Carbono Orgánico Total (COT), los cambios bruscos en las razones isotópicas de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{18}\text{O}$, y los niveles de concentración anómala de algunos elementos trazas.

Los **eventos biológicos** quedan reflejados en el registro estratigráfico en cambios bruscos en el contenido fósil (abundancia y diversidad), como las superficies estratigráficas que coinciden primeras apariciones y/o últimas apariciones de múltiples organismos y los cambios bruscos ocasionados por factores paleoecológicos como son los ocasionados por fenómenos de

colonización o de migración, por fenómenos de mortandad o por cambios de la productividad.

RECONOCIMIENTO DE EVENTOS CLIMÁTICOS (Vera J., 1994)

Los eventos climáticos se pueden reconocer en el registro estratigráfico mediante el análisis paleoclimático de las rocas analizadas. Ello permite detectar superficies que marquen cambios bruscos en el clima reinante durante la depositación de la roca en cuestión. Los cambios periódicos de orden menor como los anuales o los miles de años reflejados en laminaciones (Ejm, varvas en medios lacustres) no son considerados, normalmente como eventos, sino como cambios normales.

Los cambios climáticos se pueden determinar a través de dos criterios. El primero de ellos es un criterio sedimentológico, reflejado en un cambio brusco de la litología, como puede ser el inicio de depósitos evaporíticos, el depósito de niveles de carbón, el depósito de sedimentos glaciales, el depósito de bauxitas o el depósito de facies detríticas rojas. El segundo criterio de cambio climático es el obtenido a partir del estudio de las fluctuaciones de la curva del $\delta^{18}\text{O}$ en sedimentos pelágicos.

RECONOCIMIENTO DE EVENTOS OCEANOGRÁFICOS (Vera J., 1994)

Los eventos oceanográficos se deben a cambios bruscos del régimen de corrientes de los océanos y se reconocen en el registro estratigráfico mediante discontinuidades (paraconformidades) simultáneas en amplias regiones o mediante cambios sedimentológicos y/o geoquímicos en los materiales pelágicos.

EVENTOS ANÓXICOS OCEÁNICOS (Vera J., 1994)

El concepto de evento anóxico oceánico se utiliza para denominar intervalos de tiempo en los que en los medios marinos se depositaron, simultáneamente en amplias regiones, sedimentos ricos en carbono orgánico. El término anóxico alude a la falta de oxígeno y es sinónimo de “euxínico”.

En el registro estratigráfico los fenómenos anóxicos se reconocen por la presencia de facies oscuras constituidas por lutitas, margas o rocas silíceas de color oscuro, laminadas con contenido de materia orgánica entre 1% y 6%, presencia de pirita dispersa y concentración muy elevada de algunos elementos trazas. Se prefiere utilizar el término “evento anóxico” para marcar el inicio o final de los depósitos antes descritos, mientras que para el intervalo de tiempo

completo en el que tuvo lugar el depósito se puede usar el término “episodio anóxico”.

Los eventos anóxicos más conocidos se iniciaron en: el límite Frasnense/Fameniense (Devónico), la Zona de Semicostatum (Sinemuriense), la Zona de Margaritatus (Pliensbaquiense), la base de la Zona de Falciferum (Toarciense inferior), el Aptiense medio, el Albiense inferior, el Albiense superior y el límite Cenomaniense-Turoniense.

Se han reconocido facies oscuras ligadas a episodios anóxicos en dos contextos geotectónicos y paleogeográficos diferentes. El primero de ellos es en los mares epicontinentales, con menos de 200 metros de profundidad. El segundo corresponde a los márgenes pasivos con substrato de corteza continental adelgazada.

En ambos contextos se producen simultáneamente fenómenos que modifican las condiciones sedimentarias y que afectan a amplias regiones, por lo que en todos los modelos genéticos se interpretan como resultado de eventos oceanográficos. Estos eventos se deben a la expansión de la capa oxígeno mínimo, de manera que capas de agua con bajo contenido de O₂ pasaron a ocupar gran parte del fondo de las plataformas, así como amplios sectores de los márgenes continentales.

Ello determinó la implantación en el fondo marino de unas condiciones de poca oxigenación, que hacían imposible la vida béntica y favorecían la conservación de la materia orgánica en los sedimentos. Las corrientes ascendentes (*upwelling*) se han relacionado con importantes episodios transgresivos mundiales que conllevan importantes movimientos de aguas oceánicas y que, a su vez, pueden tener su origen en la tectono-eustasia.

GEOLOGÍA REGIONAL

CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA REGIÓN: Actualmente el occidente de Venezuela se caracteriza por presentar varias unidades estructurales positivas, las cuales tienen una larga y compleja historia de evolución tectónica, estas unidades son; El Macizo de Guayana, los Andes de Mérida, Serranía de Perijá y Serranía de Trujillo (Parnaud *et al*, 1995). Tales unidades positivas limitan la denominada cuenca de Maracaibo que presenta una variada evolución estructural a lo largo de todo el registro geológico.

Para una mayor comprensión del desarrollo de la cuenca, Parnaud *et al* (1995) realizó una división en etapas, basada en las características tectono – estratigráficas de la región, logrando dividir esta en seis (6) etapas o supersecuencias, a todo lo largo del Mesozoico y Cenozoico.

Dentro de esta división no se tomó en cuenta el Paleozoico, debido a su poca importancia y casi inexistencia dentro del registro sedimentario en la región. Aunque se ha reconocido litología paleozoica dentro del escudo de Guayana, Andes de Mérida y Serranía de Perijá entre otras.

Litología del Paleozoico Inferior se ha reconocido en el flanco Sur de los Andes, de edad Ordovícico – Siluriano. El paleozoico Medio se presenta en la Serranía de Perijá y el Paleozoico superior se ubica en los Andes con litologías tanto de

origen marino como continental, dentro del Lago de Maracaibo infrayaciendo al Cretácico se encuentra un basamento metamórfico sin edad precisada.

En las supersecuencias establecidas por Parnuad *et al* (1995) se pueden resaltar las siguientes características:

SUPERSECUENCIA “A” (ver Figura 13): Se produce durante el Jurásico, donde se suscita un periodo de “Rifting” continental, el cual afectó todo el Norte de Sudamérica, este periodo de expansión continental produce un estilo estructural caracterizado por la presencia de estructuras distensivas, como fallas normales y grabenes, en donde se deposita litología de edad Jurasica y origen netamente continental. Se ha reconocido litología Jurásica en la Sierra de Perijá con sedimentos de origen volcánico.

Al producirse el periodo de extensión continental se produjeron diversos “*rifts*” o surcos a lo largo de Venezuela y Colombia, entre los cuales podemos destacar los de Machiques, Trujillo, Uribante y Espino en Venezuela y en Colombia los surcos de Cocuy y Arcabuco, estando todos estos dispuestos de forma subparalela entre si. Este periodo de extensión continental dio inicio a un Margen Pasivo a todo lo largo de la parte Norte de Sudamérica.

SUPERSECUENCIA “B” (ver Figura 13): Se produce durante el Cretácico y se caracteriza por conformar un margen pasivo que se inicia a principios del Cretácico al producirse una transgresión de alcance mundial, la cual inundó parte del escudo de Guayana. Toda la depositación durante este periodo se realizó en un margen pasivo con sedimentación de origen costero a marino, la cual finalizó con la subducción de la placa del Caribe debajo de la placa Sudamericana que posteriormente generaría una cuenca “*foreland*” o antepaís.

SUPERSECUENCIA “C” (ver Figura 13): Se produce a finales del Cretácico tardío al Paleoceno y se caracteriza por ser una etapa de transición de un margen pasivo a uno activo, el cual es producido por la colisión de la placa del Caribe contra la placa Sudamericana creándose una cuenca “*foreland*” con el “*foredeep*” hacia la parte de la Serranía de Perijá y el “*forebulge*” hacia la zona de Barinas, esta situación se presentó solo al noroeste de Venezuela, mientras que al noreste continuó la depositación en un margen pasivo, debido a que la colisión fue en forma oblicua.

La sedimentación dentro de esta supersecuencia puede ser dividida en tres secuencias denominadas por Parnaud *et al* (1995) como; K6, K7 y K8, las cuales tienen las siguientes características:

- **Secuencia “K6”:** Se produce del Campaniense Superior al Maastrichtiense, durante este periodo se inicia una regresión al mismo tiempo que se da la subducción de la placa del Caribe debajo de la placa Suramericana, produciéndose una cuenca “*foreland*” hacia la zona del Lago de Maracaibo, produciendo esto la migración del depocentro de la cuenca hacia el Sur
- **Secuencia “K7” y “K8”:** Va del Maastrichtiense Superior al Paleoceno, en donde se rellena el “*foreland*” con los sedimentos arenosos de la Formación Mito Juan. Se produce un nuevo episodio transgresivo generando una extensión de la sedimentación hacia el Sur.

SUPERSECUENCIA “D” (ver Figura 13) Se produce durante el Paleoceno Superior al Eoceno Medio, a partir de esta etapa la cuenca se caracteriza por presentar un dominio colisional. Durante el mencionado periodo se produce el emplazamiento de las napas de Lara, migrando de forma gradual hacia el Este formando una nueva cuenca “*foreland*”. La deformación generada produce nuevos ciclos transgresivos y regresivos de edad Eoceno, lo cual produce la deposición de varias secuencias, denominadas por Parnaud *et al* (1995) como; T1, T2 y T3, las cuales serán descritas a continuación:

- **Secuencia “T1”:** Va del Paleoceno Superior al Eoceno Inferior, esta secuencia puede ser dividida en dos partes; la primera, al ir disminuyendo el nivel base, la erosión es seguida por la depositación de

sedimentos continentales hacia el Sur del Lago de Maracaibo, mientras que hacia el Norte prevalecen las condiciones marino profundas, y en la segunda parte, se produce una transgresión debida a la flexura de la plataforma produciéndose la depositación de la Formación Misoa hacia la parte central de la cuenca del Lago de Maracaibo.

- **Secuencia “T2” y “T3”:** Se produce durante todo el Eoceno Medio, en donde debido al emplazamiento de las napas de Lara se produce subsidencia en la cuenca de Barinas / Apure y como consecuencia de la carga tectónica de las misma se genera una “línea de Bisagra” a lo largo de toda la parte noreste del Lago de Maracaibo, generando esto una profundización de los ambientes sedimentarios, evidenciado por el cambio de condiciones de plataforma somera de la Formación Misoa a condiciones marina profundas de la Formación Paují.

SUPERSECUENCIA “E” (ver Figura 13): Se produce del Eoceno superior al Mioceno inferior, en donde se lleva a cabo un cambio a nivel regional, debido a la presencia de áreas positivas, las cuales producen la separación de la cuenca del Lago de Maracaibo con la ubicada en Falcón. También se producen áreas positivas al Oeste y al Sur de la Serranía de Perijá generando áreas de influencia fluvio – deltáicas en las cercanías de estos elementos positivos. Hacia el sureste continua la circulación marina que afecta toda la cuenca de Barinas / Apure, la cual se extiende hacia la cuenca del Lago de Maracaibo hacia finales del Oligoceno tardío y Mioceno temprano.

Durante este periodo se producen dos secuencias depositacionales; la primera se depositó durante el Eoceno tardío al Oligoceno temprano en dos dominios sedimentarios, uno deltáico hacia el oeste, y otro marino hacia el este. La base de esta secuencia descansa sobre una discordancia debido a la erosión producida durante el Paleoceno. La segunda, se depositó en el Oligoceno tardío al Mioceno temprano, durante un periodo de extensión de inundaciones marinas, esta secuencia es discordante y está marcada por truncaciones en terminaciones “*onlap*”, esta secuencia se caracteriza por presentar acuñamiento hacia el Este del Lago de Maracaibo.

SUPERSECUENCIA “F” (ver Figura 13): Va del Mioceno Medio al Pleistoceno, este periodo se caracteriza por estar dominado por un tectonismo compresional, el cual genera el levantamiento del Macizo de Santander (Colombia) y Serranía de Perijá, Andes de Mérida (Venezuela), al producirse este levantamiento se produce la separación total de la cuenca del Lago de Maracaibo y la de Barinas / Apure. El rápido levantamiento produjo sedimentación molásica a lo largo de los márgenes de los Andes de Mérida, mientras que la sedimentación marina persiste en la cuenca del Lago de Maracaibo y donde se produce una nueva transgresión durante el Mioceno Medio.

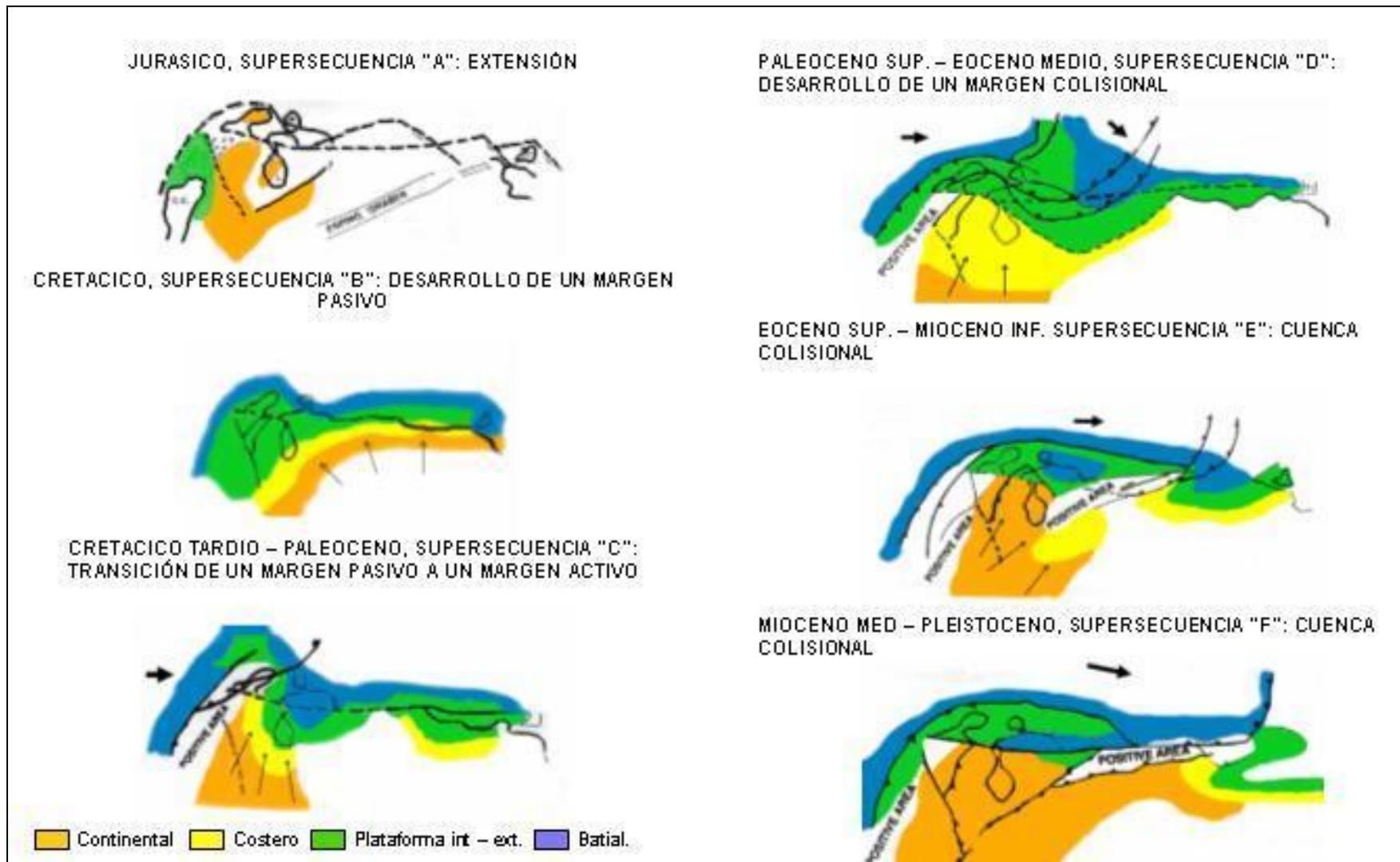


Figura 13. Evolución Geotectónica de Venezuela, tomado y modificado de Parnaud *et al* (1995)

CARACTERÍSTICAS DE LA CUENCA CRETÁCICA EN EL OCCIDENTE DE VENEZUELA:

Tal como se mencionó anteriormente durante el Cretácico se produce una transgresión marina de alcance mundial que afectó gran parte del norte de América del Sur. Debido a esto la sedimentación Cretácica del Occidente de Venezuela y del Este de Colombia ocurrió en una cuenca de margen pasivo, dentro de la cual las aguas mantuvieron más o menos interconectadas.

Dado que gran parte de la región ocupada por la cuenca Cretácica presentó un paleorelieve irregular con zonas más elevadas que otras se deben haber definido zonas dentro de la cuenca con distintas circulación, poco intercambio de aguas y diferente aporte sedimentario. Este aislamiento de varias zonas dentro de la cuenca se debió fundamentalmente a la existencia de elementos positivos o subpositivos, los cuales actuaron como barrera paleogeográfica que impidieron la libre circulación de las aguas dentro de la cuenca. A consecuencia de ello se definieron zonas de mayor profundidad o también denominados surcos en los cuales se desarrollaron elementos menores pero bien definidos en sus características litológicas y paleoambientales, las cuales han sido denominadas como subcuencas (García Jarpa *et al*;1980).

Para el Occidente de Venezuela García Jarpa *et al* (1980) definió tres subcuencas, las cuales son:

1. Subcuenca Lara – Trujillo.
2. Subcuenca de Uribante.
3. Subcuenca de Machiques

Las dos primeras cuencas están separadas entre sí por una barrera paleogeográfica denominada Arco de Mérida (ver Figura 14), con orientación aproximada noroeste – sureste. La subcuenca de Uribante se extiende hacia el suroeste del Lago de Maracaibo. La subcuenca de Machiques está ubicada en el área de la Sierra de Perijá.

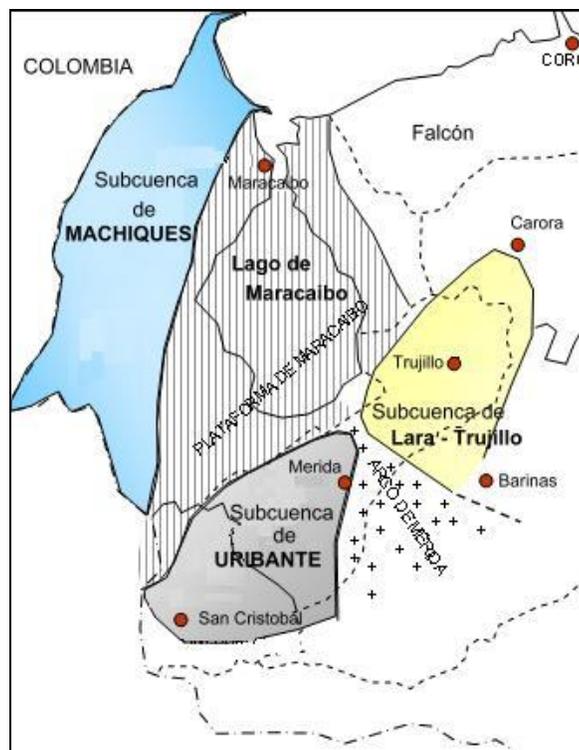


Figura 14, Subcuencas del Occidente de Venezuela durante el Cretácico, tomado y modificado de García Jarpa *et al* (1980)

LITOESTRATIGRAFÍA DEL CRETÁCICO DEL OCCIDENTE DE VENEZUELA:

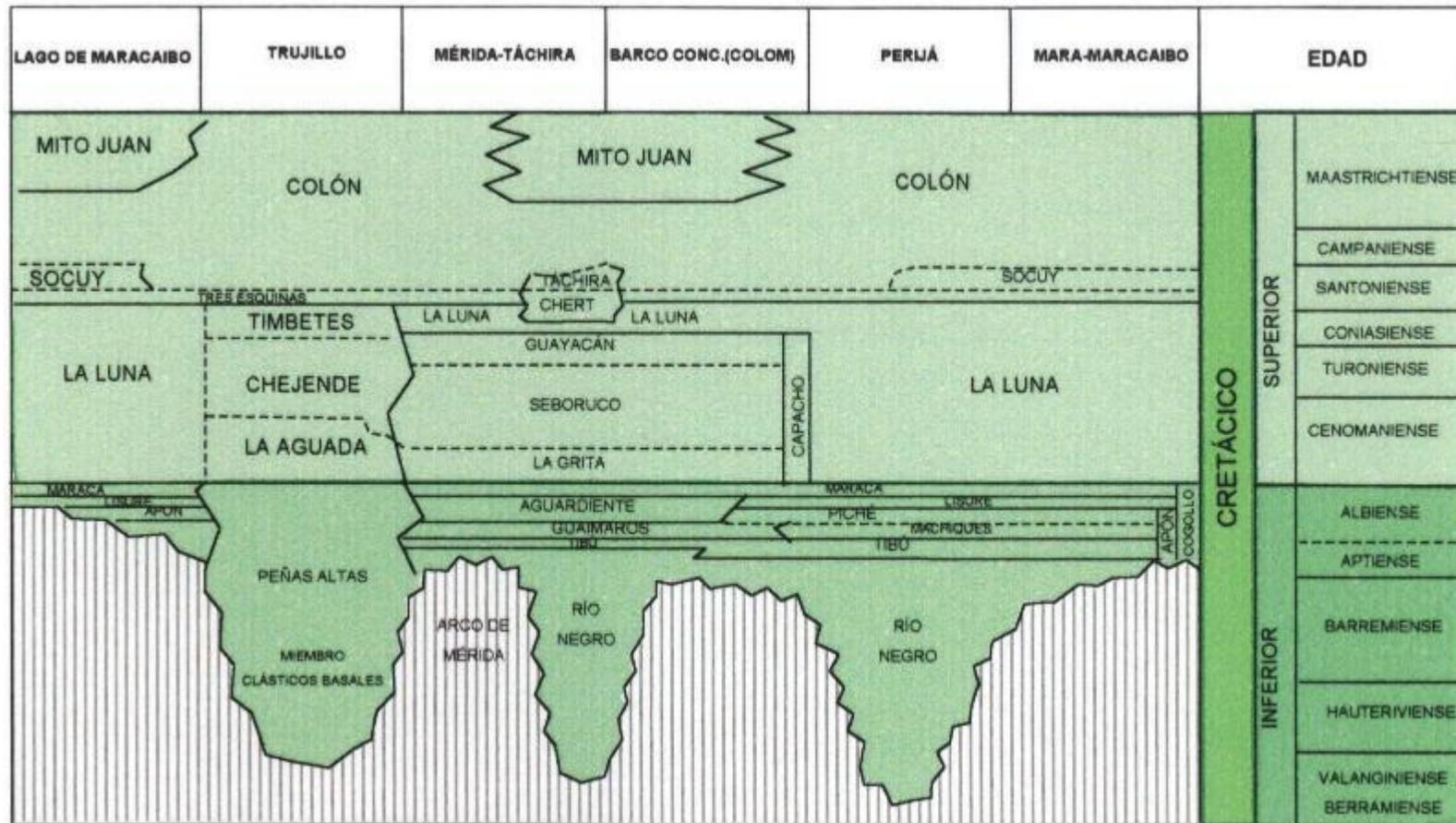


Figura 15. Cuadro de Correlación del Occidente de Venezuela. Tomado y modificado del

Código Estratigráfico de las cuencas Petroleras de Venezuela

FORMACIÓN RÍO NEGRO:

FACIES	DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA	AMBIENTE SEDIMENTARIO
CONGLOMERADOS OLIMÍCTICOS	Son impersistentes y gradan hacia areniscas conglomeráticas, estos son de color gris a amarillento, estando los conglomerados conformados por gujarros de cuarzo y fragmentos de areniscas. Los clastos son soportados por matriz protocuarcítica gruesa, teniendo formas angulares a subangulares	Esta facies se puede identificar como de ambiente deltáico, cada nivel conglomerático indica una pulsación fluvial, mientras que la angularidad de los granos y su isotropía indica una baja energía mecánica
ARENISCAS ARCÓNICAS Y LÍTICAS	Esta facies van de arenas de grano fino a grueso, a veces se presentan lentes conglomeráticos. Las areniscas presentan estratificación cruzada tipo planar, estas facies se interdigitan con la facies anterior. En las arenas arcónicas los feldespatos dominantes son ortosa, microclino y oligoclasa, los cuales resultan de la denudación de un terreno granítico y metamórfico. Las areniscas líticas reconocidas son de colores grises claros hasta marrones presentando igualmente estratificación cruzada.	Se pueden identificar ambientes deltáicos a marinos, aunque también se presentan ambientes de pantanos interpretados por la presencia de restos de plantas.
LUTITAS Y LODOLITAS CALCÁREAS	Las lutitas son muy escasas dentro de esta Formación, presentándose lutitas de colores grises oscuros intercaladas con areniscas se capas lenticulares de lutitas carbonosas y capas de yeso.	Esta facies se puede ubicar en un ambiente de laguna costanera, llanuras de marea con aguas de salinidad normal con poca oxigenación y baja oxigenación.

Tabla 14, Características de la Formación Río Negro, tomada y modificada de García Jarpa *et al* (1980)

FORMACIÓN APÓN:

MIEMBRO	DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA	AMBIENTE SEDIMENTARIO
TIBÚ	Representan las primeras calizas arenosas grises, se distinguen también areniscas calcáreas con algunas lutitas al igual que algunas glauconitas en esta secuencia se observan moluscos bien preservados. Al ir subiendo en sección se presentan intercalaciones de margas, dolomitas y calizas fétidas marcando así la proximidad del Miembro Machiques.	Ambiente marino de profundidad somera restringida, también se pueden identificar ambientes de lagunas costaneras protegidas, de baja circulación de aguas.
MACHIQUES	Calizas laminares negras y bituminosas, intercaladas con margas y lutitas negras con concreciones discoidales de hasta dos metros de diámetro, se presenta repetición de paquetes de calizas bituminosas intercaladas con calizas de colores claros.	Esta litología fue depositada en un área donde se presenta un estrato de agua estancada, mostrándose hacia el tope una tendencia gradual hacia menores profundidades. Presentándose condiciones restringidas con profundidades neríticas
GUAIMAROS	Este se caracteriza por lutitas laminares de color gris oscuro a negro con muy escasos restos bioclásticos y ocasionales lentes de limolita y arenisca. Las lutitas restos escasos de plantas, concreciones ferruginosas y algunos cristales de yeso. En la parte superior de las lutitas aparecen capas de calizas duras de color gris.	Ambiente de laguna costanera a marinos de aguas someras.
PICHE	Se caracteriza por una mayor proporción de calizas masivas que el Miembro Tibú, aunque el carácter litológico no proporciona ningún criterio de diferenciación entre ambos mas que su posición relativa dentro de la formación, éste es un intervalo eminentemente calcáreo. Las calizas son de colores grises y en algunos casos azuladas	Ambiente de lagunas costaneras protegidas de baja circulación de aguas, variando hasta ambiente marino somero

Tabla 15, Características de la Formación Apón, tomado y modificado de García Jarpa *et al* (1980)

FORMACIÓN LISURE:

FACIES	DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA	AMBIENTE SEDIMENTARIO
ARENISCAS CALCÁREAS Y CALIZAS ARENOSAS	Esta facies se caracteriza por la presencia de glauconitas las cuales le imprimen tonalidades grises o verdosas, estas rocas son de grano medio a fino, también se observan areniscas micáceas laminares.	Facies de aguas marinas de plataforma costera de profundidades variables, el influjo clástico puede ser producto de un levantamiento hacia el Sur
CALIZAS OOLÍTICAS	Hacia el Lago de Maracaibo se observan intervalos de poco espesor de estas calizas de apariencia detrítica con numerosas intercalaciones de margas y lutitas hacia el tope.	Ambiente de aguas marinas de plataforma costera de baja energía.

Tabla 16, Características de la Formación Lisure, tomado y modificado de García Jarpa *et al* (1980)

FORMACIÓN MARACA:

FACIES	DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA	AMBIENTE SEDIMENTARIO
CALIZAS ARENOSAS	Intervalo conformado casi exclusivamente por calizas arenosas en capas gruesas alternando con calizas con restos de conchas, observándose también capas delgadas de margas y lutitas de color gris.	Sedimentación en un ambiente marino de plataforma media a somera
ARENISCAS GLAUCONÍTICAS	Se observan hacia la parte inferior de la formación, presentándose también areniscas calcáreas, marcando esto la transición entre la Formaciones Lisure y Maraca	Ambiente marino de plataforma costera

Tabla 17, Características de la Formación Maraca, tomado y Modificado de García Jarpa *et al* (1980)

FORMACIÓN AGUARDIENTE: Esta conformado eminentemente por un miembro arenoso, aunque presenta algunas facies que son importantes destacar como son:

FACIES	DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA	AMBIENTE SEDIMENTARIO
BANCOS DE ARENA GRUESOS	Capas de arena gruesa con estratificación cruzada. Las arenas son limpias bien escogidas, hay alternancia de laminación de grano grueso y medio	Ambiente de Barra o cordón litoral (restringida) y playa asociada.
LUTITAS	Lutitas limosas, carbonáceas, con restos de plantas y granos de pirita, los colores de las lutitas varían de gris oscuro a claro	Ambiente de laguna costanera pantanosa y emergente
CALIZAS PURAS Ó ARENOSAS	Delgadas capas de caliza tipo wackstone, packstone y grainstone, asociado con areniscas glauconíticas.	Ambiente de agua somera de mar abierto con circulación y salinidad normal. Localmente se puede interpretar ambientes de barrera y lagunas costaneras.
ALTERNANCIA DE ARENISCAS, LIMOLITAS Y LUTITAS	Capas delgadas con estratificación lenticular, rizaduras y películas de carbón, areniscas bien escogidas con ocasional glauconita	Zona de depositación situada entre barras emergentes y barras sumergidas en la plataforma abierta, con variación de energía
ARENISCAS GLAUCONÍTICAS	Capas gruesas a delgadas, a veces calcáreas que pueden pasar lateralmente a las facies anterior. Composición entre wacka cuarzosa y arenita cuarzosa	Ambiente de barra sumergida en una plataforma somera raramente emergente, puede llegar a la zona intermareal. Ambiente de menor energía que la facies anterior

Tabla 18, Características de la Formación Aguardiente, tomado y modificado de García Jarpa *et al* (1980)

FORMACIÓN CAPACHO:

MIEMBRO	DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA	AMBIENTE SEDIMENTARIO
LA GRITA	Esta conformado por calizas biomicríticas negras y densas alternando con calizas arcillosas finamente laminadas y concreciones calcáreas	Ambiente marino profundo y poco oxigenado, puede ser ubicado en una zona de margen de plataforma.
SEBORUCO	Esta conformado por una sección uniforme de lutitas macizas duras y no calcáreas de color gris oscuro a negro con unas pocas capas delgadas de calizas micrítica conchífera gris hacia el tope. Las lutitas de esta miembro son de dos tipos uno fosilífero y otro cuarzoso con arena fina y limo.	Ambiente de plataforma somera con poca circulación, las intercalaciones de calizas y lutitas implican cambios de energía. Los periodos de depositación de caliza micrítica bioclástica pudo coincidir con periodos de circulación moderada que oxigeno la columna de agua. Durante la depositación de este miembro existió influencia de corrientes tanto deltáicas que depositaron lodos y limos como marinas, la cual enriqueció el fondo de foraminíferos.
GUAYACÁN	Consiste en capas gruesas de caliza bioclástica macizas muy fosilífera de color gris intercaladas con lutitas no calcáreas micáceas de color gris oscuro a negro, y cantidades menores de limolitas grises	Ambiente pelágico o de plataforma abierta, la sedimentación ocurre con niveles de baja oxigenación.

Tabla 19, Características de la Formación Capacho, tomada y modificada de García Jarpa *et al* (1980)

FORMACIÓN PEÑAS ALTAS:

FACIES	DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA	AMBIENTE SEDIMENTARIO
UNIDAD INFERIOR	Se describe en la sección de El Jabón, al oeste de Barbacoas, esta unidad esta compuesta predominantemente de cuarzoarenitas gris claras, de grano fino, sacaroideas a friables, con algunas intercalaciones de calizas masivas gris oscuras, afaníticas y fosilíferas que alternan con calizas grises coquinoideas y lutitas negras micro-laminadas.	Cabe destacar que en el trabajo realizado por García Jarpa <i>et al</i> (1980), restringen el uso de esta formación a la subcuenca Lara – Trujillo, teniendo esta como contacto inferior a la Formación La Quinta y como contacto superior a la Formación La Luna. García Jarpa <i>et al</i> (1980) Interpretan dos ciclos completos de transgresión-regresión, con paleoambiente predominante de plataforma interna, con profundidades entre cero y 80 m, pero con oscilaciones que varían entre ambientes de laguna hipersalina hasta talud superior con profundidades de 250 m.
UNIDAD SUPERIOR	En la sección de San Pedro, la unidad superior se compone de lutitas grises, masivas, de litología monótona y algunas areniscas cuarzosas blancas, de grano fino a grueso.	

Tabla 20, Características de la Formación Peñas Altas, tomado y modificado de García Jarpa *et al* (1980)

FORMACIÓN LA LUNA:

FACIES / MIEMBRO	DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA	AMBIENTE SEDIMENTARIO
FACIES ALTERNANTES DE CALIZAS Y LUTITAS	Consiste típicamente de calizas y lutitas calcáreas fértidas con abundante materia orgánica laminada y finamente dispersa de color gris oscuro a negro, presenta nódulos y concreciones elipsoidales a discoidales. Las capas de calizas varían en espesor hasta 50 cm, con estratificación uniforme y monótona	Se deposita en un ambiente marino con condiciones de fondo anóxicas de profundidad variable. En este ambiente reductor se preservó la materia orgánica y se formó pirita
MIEMBRO LA AGUADA	Se designa de esta forma la parte inferior de la formación La Luna en la subcuenca de Lara – Trujillo, esta conformada por capas de caliza densa de color gris oscuro de 20 a 40 cm de espesor con concreciones de caliza, las cuales se hacen más abundantes hacia el tope de la sección, donde se presentan algunas intercalaciones de arena fina y limo.	Este miembro puede ser considerado como facies transicionales entre las facies de aguas llanas depositadas en la plataforma y las facies pelágicas.
MIEMBRO CHEJENDÉ	Se reconoce en la subcuenca Lara – Trujillo y consta de una sección de 80 m donde se observan calizas concrecionarias de color gris oscuro a negro, interestratificadas con lutitas y margas. En este miembro resalta la preponderancia de lutitas y margas por sobre las calizas.	Este miembro se deposita en un ambiente pelágico con poca circulación de aguas y con sedimentación lenta
MIEMBRO TIMBETES	Al igual que la anterior solo se reconoce en la subcuenca de Lara – Trujillo y consta de una sección de 90 m conformada por capas de calizas estratificadas concrecionarias con un espesor de hasta un metro de color gris azulado a oscuro, las capas de calizas se encuentran separadas entre sí por margas muy calcáreas de color negro, también se observan capas de chert intercaladas con las calizas.	Ambiente pelágico de mayor oxigenación y circulación de las aguas que en el miembro anterior
MIEMBRO TRES ESQUINAS	Esta constituido por areniscas glauconíticas calcáreas y fosilíferas de color verdoso, a veces con pelotillas de fosfato, se caracteriza además por su textura oolítica – ovular e infrayacen a la lutitas de la Formación Colón, presentando un espesor de 3 a 5 m.	Ambiente de moderada oxigenación y rico en organismos.
MIEMBRO FTANITAS DEL TÁCHIRA	Esta formada por ftanitas negras finamente laminadas en capas delgadas con intercalaciones de lutitas silíceas y calizas negras. Existen capas lenticulares de caliza con concreciones.	Región marina oceánica de profundidad de 300 m. Probablemente la ftanita es de origen secundario derivado de la disolución de restos orgánicos silicios. Se interpreta un ambiente de mayor oxigenación que los anteriores

Tabla 21, características de la Formación La Luna, tomado y modificado de García Jarpa *et al* (1980)

FORMACIÓN COLÓN:

FACIES / MIEMBRO	DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA	AMBIENTE SEDIMENTARIO
FACIES DE LUTITAS NEGRAS FOSILÍFERAS	Lutita negra con intercalaciones de limolita y areniscas finas con restos de bivalvos.	Ambiente marino pelágico de salinidad normal y circulación moderada
FACIES DE LIMOLITAS Y ARENISCAS GLAUCONÍTICAS	Esta facies se desarrolla en la base y en el tope de la secuencia. La glauconita es muy abundante y hay presencia de concreciones.	Ambiente de plataforma interna con influencias deltáicas, esta litología puede indicar sedimentación reducida debido a un momento de quietud en la transgresión
MIEMBRO CUJISAL	Capas gruesas de areniscas arcósicas y a veces glauconíticas.	Se puede identificar un ambiente de cordón litoral, el cual estaría relacionado con un levantamiento en el cartón de Guayana.
MIEMBRO SOCUY	Consta de 40 m de caliza margosa de colores claros con intercalaciones muy escasas de lutitas. Las calizas del Miembro Socuy se diferencian de las calizas de la Formación La Luna.	Ambiente deposicional de aguas moderadamente profundas menor de 500 m, este ambiente se va haciendo cada vez menos profundo al irse depositando las lutitas de la Formación Colón.

Tabla 22, Características de la Formación Colón, tomado y modificado de García Jarpa *et al* (1980)

FORMACIÓN MITO JUAN:

FACIES	DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA	AMBIENTE SEDIMENTARIO
ARCILLAS ARENOSAS	Se caracterizan por ser arcillas grises a gris verdoso y negro, localmente arenosas en las cuales el contenido de limo y arena aumenta en sentido ascendente.	Ambiente de aguas salobre poco profundas
CALIZAS Y ARENISCAS	Hacia el tope de la Formación se pueden ubicar capas delgadas de calizas y areniscas del tipo grauvacca y subgrauvacca.	Ambiente poco profundo, evidenciando esta facies la colmatación de la cuenca

Tabla 23, Características de la Formación Mito Juan, tomado y modificado de García Jarpa *et al* (1980)

CARACTERÍSTICAS ESTRATIGRÁFICAS DEL CRETÁCICO DEL OCCIDENTE DE VENEZUELA:

Es bien sabido que durante el Cretácico en Venezuela se desarrolló un margen pasivo tipo Atlántico, el cual puede ser confirmado por una serie de argumentos planteados por Villamil & Pindell (1998):

1. Curvas de acumulación de sedimentos realizadas muestran una constante acumulación típica de una subsidencia termal durante gran parte del Cretácico. Durante todo ese periodo no se presentaron eventos importantes de levantamiento o de actividad tectónica, excepto por los acontecidos durante el Campaniense – Maastrichtiense en la cuenca de Maracaibo, debido a la acreción de terreno en el Occidente de Colombia.
2. La placa del Caribe que comenzó a interactuar con el norte de Sudamérica a fines del Cretácico, está compuesta por corteza oceánica del Pacífico de edad Jurasico, la cual ha migrado a través del norte de Sudamérica, esto muestra que durante gran parte del Cretácico el borde norte de Sudamérica se encontraba sin actividad tectónica relevante.

Para resumir, es claro ahora, que la historia de subsidencia, estudios estructurales, estratigráficos y la historia moderna del movimiento de placas, señalan la existencia de un margen pasivo en el norte de Sudamérica, y el cual

fue alterado por el movimiento de la placa del Caribe de Oeste a Este durante el final del Cretácico y durante todo el Cenozoico.

El registro estratigráfico del Cretácico de Venezuela está fuertemente influenciado por una transgresión de alcance regional, la cual se inició a principios del Cretácico. Este evento marcó de gran manera todo el desarrollo estratigráfico del Cretácico del Occidente de Venezuela, a continuación se realiza una recopilación de los aspectos estratigráficos más importantes acontecidos durante el Cretácico en el Occidente de Venezuela:

BARREMESIANO – BARREMIENSE: Durante este periodo se presenta una subsidencia diferencial, la cual favorece el desarrollo de aguas someras alejadas de las arenas costeras, al igual que se forman depresiones entre dos cinturones de agua somera, los cuales serán rellenados posteriormente por sedimentos del Cretácico tardío, ricos en materia orgánica.

En esta época se inicia un sistema transgresivo que afectó todo el Cretácico y el cual depositó sedimentos de forma discordante sobre las facies continentales de la Formación La Quinta (ver Figura 16).

La secuencia transgresiva del Cretácico temprano del occidente de Venezuela está conformada por una mezcla de siliciclastos fluviales, con escasa presencia de carbonatos, definida como Formación Río Negro.

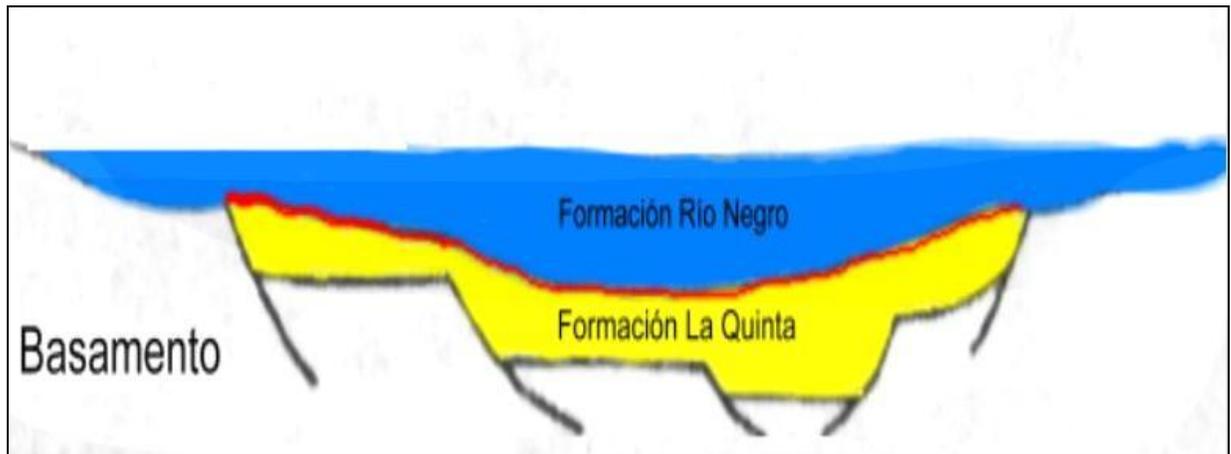


Figura 16, Corte Esquemático mostrando la deposición de los sedimentos durante el Barremiense, tomado y modificado de Villamil y Pindell (1998)

APTIENSE: Durante esta etapa se presenta una mayor variabilidad de facies respecto al periodo anterior. El tope del Barremiense y la base del Aptiense es caracterizado por representar un límite de secuencia de alcance regional.

El Aptiense es caracterizado por gran cantidad de carbonatos de agua somera como los de la Formación Apón, en la cual el aporte clástico fue muy restringido, aunque, dentro de esta formación se presenta una interdigitación de carbonatos con siliciclastos (ver Figura 17), lo que indica un aporte intermitente de siliciclastos.

Las regiones del margen pasivo del occidente de Venezuela que anteriormente fueron cubiertas por siliciclastos de grano grueso son cubiertos ahora por sedimentos de tamaño de grano cada vez más fino, señalando esto una influencia cada vez más significativa del periodo transgresivo.

Durante este tiempo se inicia la depositación del Grupo Cogollo hacia la Sierra de Perijá, conformado por intervalos carbonáticos y arcillosos de la Formación Apón, al mismo tiempo se da inicio a la depositación de los intervalos arenosos de la Formación Aguardiente en la cercanía de los Andes de Mérida. Ambas formaciones (Apón y Aguardiente) representan la continuación de la transgresión Cretácica, la cual hace migrar hacia el sur la zona de alta producción de carbonatos.

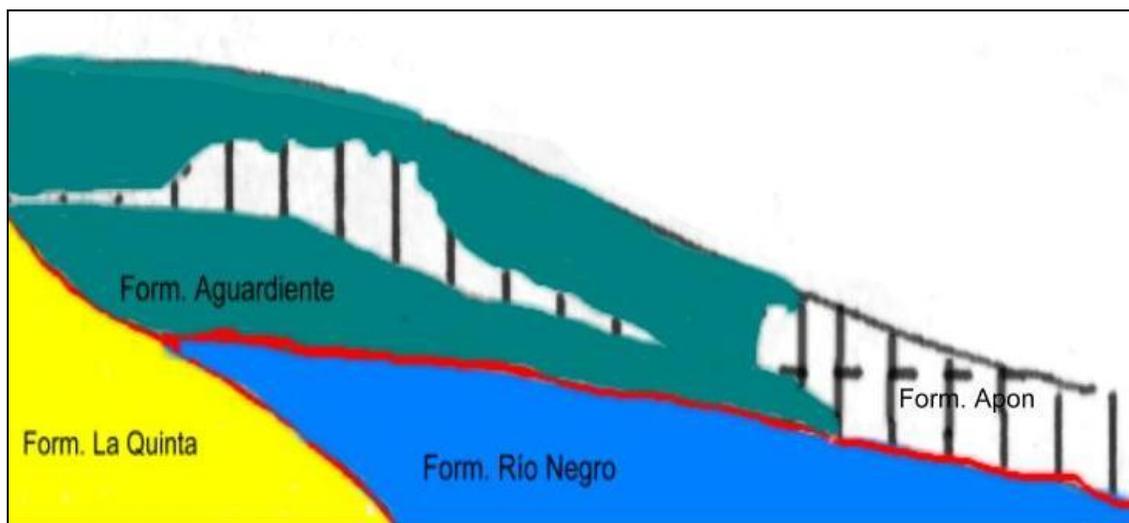


Figura 17, Corte Esquemático mostrando la forma de sedimentación durante el Aptiense, tomado y modificado de Villamil & Pindell (1998)

ALBIENSE TEMPRANO: En este intervalo al igual que durante todo el Cretácico, los sedimentos depositados presentan terminaciones “*onlap*” sobre los sedimentos Pre – Cretácicos, esta sedimentación tiene claras facies de agradación y transgresión. La agradación fue pronunciada durante la parte baja del Albiense Inferior, la cual fue seguida por una transgresión y una ligera regresión.

En el Albiense temprano hay dominio de depósitos de arcillas sobre bancos carbonáticos y cuerpos arenosos, durante esta época se deposita de forma discontinua el Miembro Tibú de la Formación Apón y la Formación Lisure. Al final del Albiense temprano se produce una transgresión, la cual es asociada con la finalización de la influencia siliciclástica y de los sistemas carbonáticos de agua somera en gran parte de occidente de Venezuela.

ALBIENSE MEDIO – TARDÍO (ver Figura 18): El registro sedimentario durante el Albiense medio demuestra una transgresión abrupta, la cual provocó extensión de los intervalos de roca madre. Al inicio de esta transgresión se observa el diacronismo de la misma dentro del Grupo Cogollo, donde hay un contacto de facies de grano medio a grueso con facies de carbonatos de agua somera.

El Albiense tardío se caracteriza por la extensión de sedimentos de aguas marinas someras a lo largo de toda la cuenca de Maracaibo y Barinas / Apure. Durante este periodo se produce un levantamiento de parte del basamento que influencia de forma significativa los patrones de sedimentación dentro de la cuenca (Erlich *et al*; 2000), formándose elementos positivos o subpositivos denominados: Macizo de Santa Marta, Bloque de Paraguaná, Macizo de Santander y Andes de Mérida, alrededor de los cuales se acuñan los sedimentos.

En la parte norte y central de la cuenca de Maracaibo los carbonatos de plataforma interna a media de las formaciones Lisure y Maraca gradan hacia el sur, hacia la base del arcillas de la Formación Capacho.

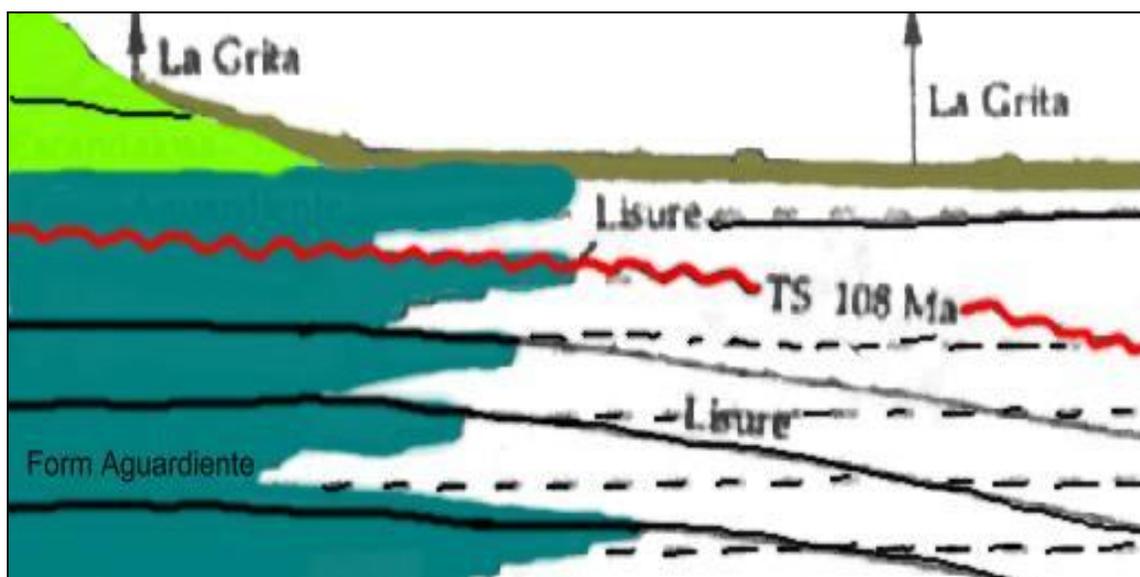


Figura 18, Corte Esquemático de la deposición durante el Albiense Medio – Tardío, tomado y modificado de Villamil & Pindell (1998)

CENOMANIENSE: Los patrones de sedimentación cambian rápidamente al final del Albiense. Durante el Cenomaniense se produce la primera de una serie de cuatro transgresiones marinas que afectan el Cretácico tardío (Erllich *et al*; 2000), la cual se dio inicio en el Albiense tardío y provoca la finalización de la producción de los carbonatos de las formaciones Lisure y Maraca, depositándose los sedimentos marinos de la Formación Capacho.

En el Cenomaniense de la subcuenca de Uribante se depositan los miembros Seboruco y Guayacán de la Formación Capacho, los cuales se caracterizan por estar formados por arcillas no – calcáreas (Miembro Seboruco) encima de las cuales hay una discordancia (ver Figura 19), que separa a este miembro de los carbonatos de agua somera del Miembro Guayacán. En la base del Miembro Seboruco se presenta un cambio de facies de arcillas dístales a limolitas proximales de aguas someras, éste contacto es debido a una caída relativa del nivel del mar durante el Cenomaniense.



Figura 19, Corte Esquemático de la deposición en la subcuenca de Uribante durante el Cenomaniense, tomado y modificado de Villamil & Pindell (1998)

En las subcuencas de Machiques y Lara – Trujillo, la rápida extinción de los carbonatos junto con un cambio repentino de la tasa de subsidencia, produce la finalización de la deposición de la Formación Maraca, existiendo de esta manera facies transicionales entre Maraca y La Luna. Hacia la parte central de la subcuenca de Machiques se presenta una discordancia entre las formaciones Maraca y la Luna (Villamil & Pindell; 1998), la cual puede ser observada sólo mediante estudios bioestratigráficos.

CENOMANIENSE TARDÍO – CONIACIENSE: Al final de Cenomaniense los últimos remanentes de las partes altas del basamento fueron rápidamente cubiertos por arcillas y limolitas de la Formación Capacho.

Encima del Cenomaniense tardío de facies de aguas someras, hay una superficie transgresiva que es la base de la Formación La Luna que se encuentra en el límite Cenomaniense – Turoniense, (ver Figura 20), esta superficie marca la segunda transgresión marina que afectó la región durante el Cretácico tardío (Erlich *et al*; 2000), aumentando el establecimiento de condiciones anóxicas de las aguas de fondo en toda la cuenca del Maracaibo, lo cual resultó en la preservación de grandes cantidades de materia orgánica en la Formación La Luna.

Al inicio de este periodo comienza la depositación de la Formación La Luna, compuesta por limolitas silíceas microlaminadas depositadas a lo largo de los Andes de Mérida, mientras que los estratos del Turoniense medio al Coniaciense están caracterizados regionalmente por la depositación de arcillas calcáreas, limolitas hemipelágicas y desarrollo de algunas capas de chert (ver Figura 20).

Durante el Coniaciense al Santoniense temprano se produce la tercera transgresión marina ocurrida en el occidente de Venezuela, siendo esta la responsable del cambio de los patrones de sedimentación del Turoniense al Coniaciense, además debido a esto durante el Coniaciense se presentaron bajas tasas de sedimentación, las cuales aumentan dramáticamente en el Santoniense.

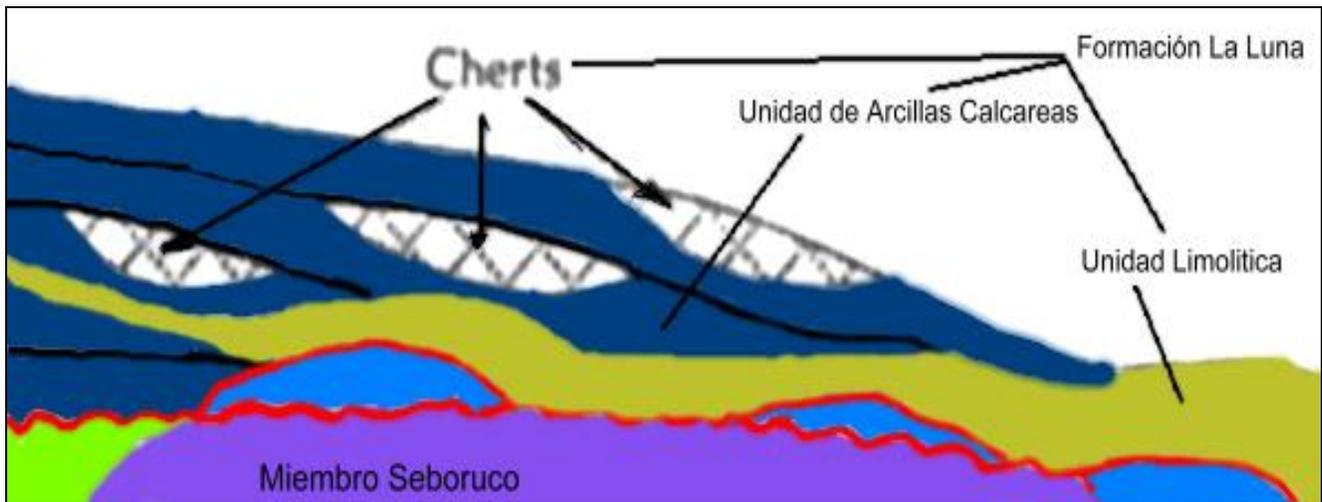


Figura 20, Corte Esquemático de la depositación durante el Turoniense – Coniaciense, tomado y modificado de Villamil & Pindell (1998)

SANTONIENSE – CAMPANIENSE: Durante gran parte de este periodo se produce una regresión, donde dominó la depositación de los cherts, por lo tanto este intervalo demuestra que la asociación de intervalos transgresivos con la depositación de cherts no es válido en todos los casos (Villamil & Pindell; 1998), este rápido influjo de cuarzo señala un aumento de la tasa de sedimentación clástica, causada por el aumento de la tasa de subsidencia y además, muestra un cambio en las condiciones oceanográficas y climáticas a nivel regional. Estos cambios en los patrones de sedimentación producen una intermitente oxigenación de las aguas de fondo de la cuenca, lo cual se ve reflejado por mostrar este periodo fuertes condiciones de *“upwelling”*. Como consecuencia de estos cambios, la zona del alto paleobatimétrico de los Andes fue foco de

deposición de los niveles fosfáticos del Miembro Tres Esquinas de la Formación La Luna, y en la subcuenca de Machiques del Miembro Socuy de la Formación Colón el cual se produjo bajo condiciones moderadas de oxigenación.

Todos los cambios climáticos producidos durante el Santoniense – Campaniense, y los cuales son reflejados en los patrones de sedimentación son producidos por el inicio del periodo de levantamiento ocurrido en Colombia.

Al final de este periodo se produce el cuarto periodo transgresivo que afecta el occidente de Venezuela, el cual se produjo a mediados del Campaniense y alcanzó su máximo a finales del Campaniense e inicios del Maastrichtiense.

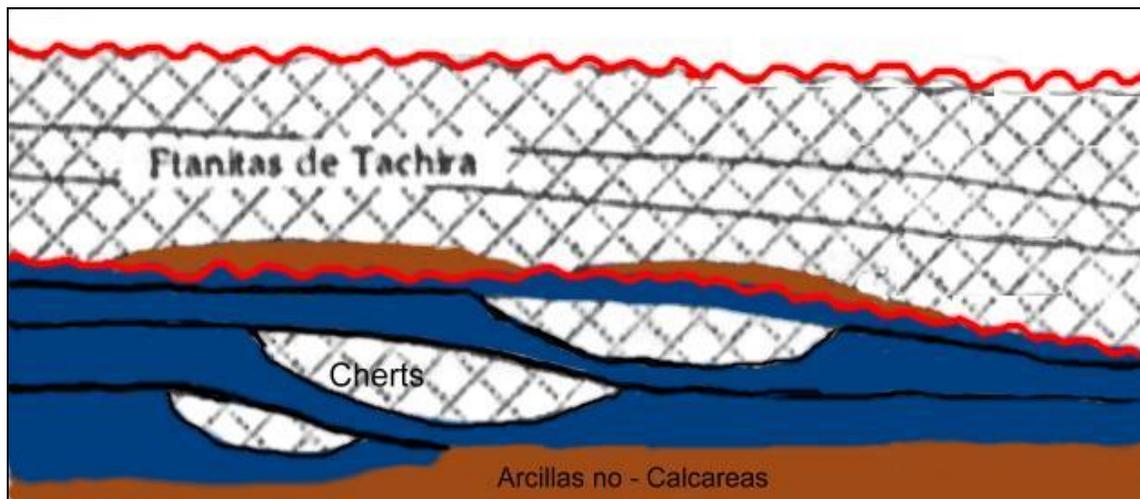


Figura 21, Corte Esquemático de la deposición durante el Santoniense – Campaniense, tomado de Villamil & Pindell (1998)

MAASTRICHTIENSE: Este periodo fue dominado por la progradación de las formaciones Colón y Mito Juan (ver Figura 22), las facies observadas en este periodo muestran la finalización de la cuarta transgresión e inicio de una regresión, la cual se cree es debida a causas tectónicas, ya que la progradación de las arcillas de la Formación Colón coincidió también con el levantamiento de la Cordillera Central de Colombia.

La progradación de las arcillas de la Formación Colón sobre el Miembro Tres Esquinas, es seguida por una disminución de la profundidad durante la depositación de la Formación Mito Juan (ver Figura 22). Esta progradación y posterior regresión demuestra el final del relleno del espacio creado durante la depositación de la Formación La Luna, la cual fue depositada lentamente permitiendo subsidencia termal, la cual genero la creación de espacio en la cuenca.

La sedimentación de las formaciones Colón y Mito Juan muestra un aumento de la tasa de depositación el cual provoco el llenado de la cuenca. El aumento de la tasa de depositación pudo deberse a levantamientos producidos en Colombia, como consecuencia de la convergencia de la placa del Caribe hacia el oeste de Sudamérica.

Durante el Maastrichtiense tardío el sistema depositacional refleja una influencia de una continua deformación estructural en el Este de Colombia, junto con el cambio paleoclimático ocurrido a final del Cretácico.

La convergencia de la placa del Caribe hacia el oeste de Venezuela produce el desarrollo de un cuenca “foreland” en Maracaibo, la cual continua a finales del Maastrichtiense y durante todo el Paleoceno.

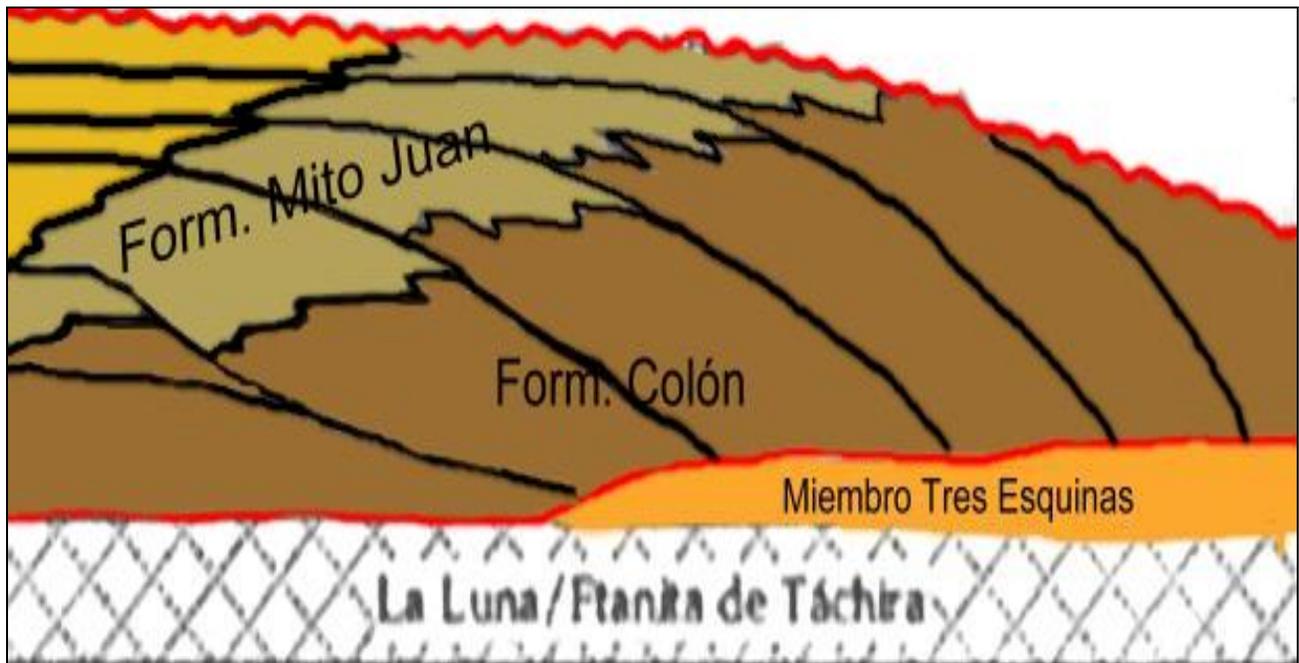


Figura 22, Corte Esquemático demostrando el estilo de depositación durante el Maastrichtiense, tomado y modificado de Villamil & Pindell (1998)

SECCIÓN “FLOR DE PATRIA”

UBICACIÓN Y ACCESO: Esta sección se encuentra ubicada al Este del estado Trujillo, en el municipio Trujillo a aproximadamente 35 kilómetros a Este de la población de Flor de Patria, en el tramo de la carretera que va desde Flor de Patria hasta Boconó, a 5 kilómetros del caserío Diego Díaz y a 10 kilómetros de la población de Burbusay, en dirección hacia Boconó (ver Figura 23).

Más específicamente esta sección puede ser ubicada en la **HOJA 6144 III N. E.** con coordenadas (sistema transversal de Mercator), **1 042 337 Norte** y **3 53 460 Este**

El acceso a la sección estudiada se hizo desde la población de Flor de Patria, por la carretera Flor de Patria – Boconó, encontrándose la sección de estudio a 9 kilómetros después de la bifurcación Santa Ana – Boconó (ver Figura 23).

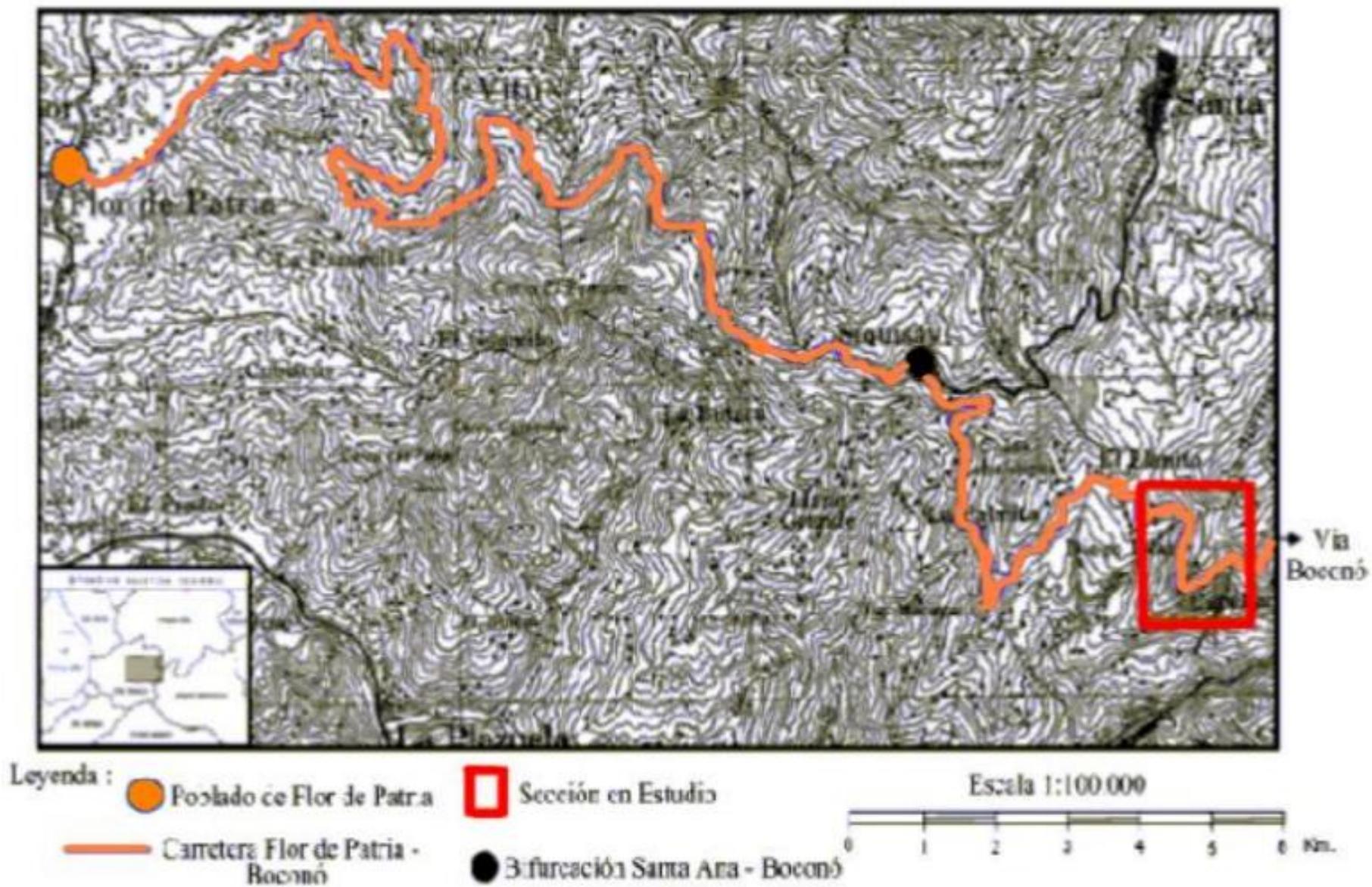


Figura 23, Ubicación Geográfica de la Sección de Flor de Patria

LITOESTRATIGRAFÍA: La sección descrita en la columna estratigráfica se encuentra ubicada en la subcuenca Lara – Trujillo y presenta un espesor de 36 metros. En donde sólo se reconocieron dos tipos de rocas como son las lutitas y las calizas; cabe destacar que esta sección se observa una predominancia significativa de las lutitas por sobre las calizas, en una proporción de alrededor de 85 % de lutitas y solo un 15 % de calizas (ver Figura 23).



Figura 24, Vista de la sección de Flor de Patria

En la parte basal de la sección se presenta un intervalo de alrededor de 6 metros de espesor conformado por lutitas silíceas, de color fresco gris y color meteorizado marrón oscuro, las cuales atendiendo a la interpretación estructural realizada a partir del mapa **E - 4 - D**, realizado por la **CREOLE PETROLEUM CORPORATION**, en el año 1967. Se interpreta en contacto de falla con la

suprayacente Formación La Luna, este contacto no pudo ser observado en la sección en estudio debido a que se está en presencia de una litología lutítica.

En trabajos anteriores como los de Renz (1959 y 1979) se define como infrayacente a la Formación La Luna el tope de la Formación Peñas Altas que fue denominada primeramente como formación La Puya y luego formación Maraca. Estando conformada la Formación Peñas Altas por una alternancia de bancos de areniscas, lutitas fosilíferas y calizas arenosas, lo cual no se reconoce en el área de estudio.

Posteriormente, García Jarpa *et al* (1980) define a la Formación Peñas Altas como infrayacente a la Formación La Luna en la subcuenca Lara – Trujillo. Luego Erlich *et al* (1999) describe a la Formación Peñas Altas conformada por limolitas de aguas someras. En este mismo trabajo se propone un hiato entre el tope de la Formación Peñas Altas y la base de la Formación La Luna, debido al abrupto cambio de sedimentos de aguas someras a depósitos de aguas profundas en un espesor litoestratigráfico de alrededor de un metro.

El intervalo de la sección estudiada correspondiente a la Formación La Luna presenta un espesor de 28 metros (ver Figura 24), conformado por lutitas y calizas, existiendo una predominancia de las lutitas por sobre las calizas, en una proporción de alrededor de 56 % de lutitas y 15 % de calizas. Es resaltante mencionar que en toda la sección estudiada solo la parte que corresponde a la Formación La Luna hay presencia de calizas.



Figura 25, Vista de las intercalaciones de lutitas calcáreas y calizas presentes en la sección de Flor de Patria

En esta sección de la Formación La Luna ubicada en la subcuenca de Lara – Trujillo se caracteriza por presentar una preponderancia de lutitas calcáreas finamente laminadas de color meteorizado gris y color fresco gris oscuro a negro.

Estos paquetes de lutitas tienen espesores de entre 1,5 y 7 metros (ver Figura 26), y presentan concreciones calcáreas elongadas de longitud variable entre 10 y 50 centímetros (ver Figura 27). Dentro de estas lutitas se presentan ocasionalmente microfósiles, tales como, Amonites. Cabe destacar que hacia el tope de la sección las lutitas se hacen más fósiles.

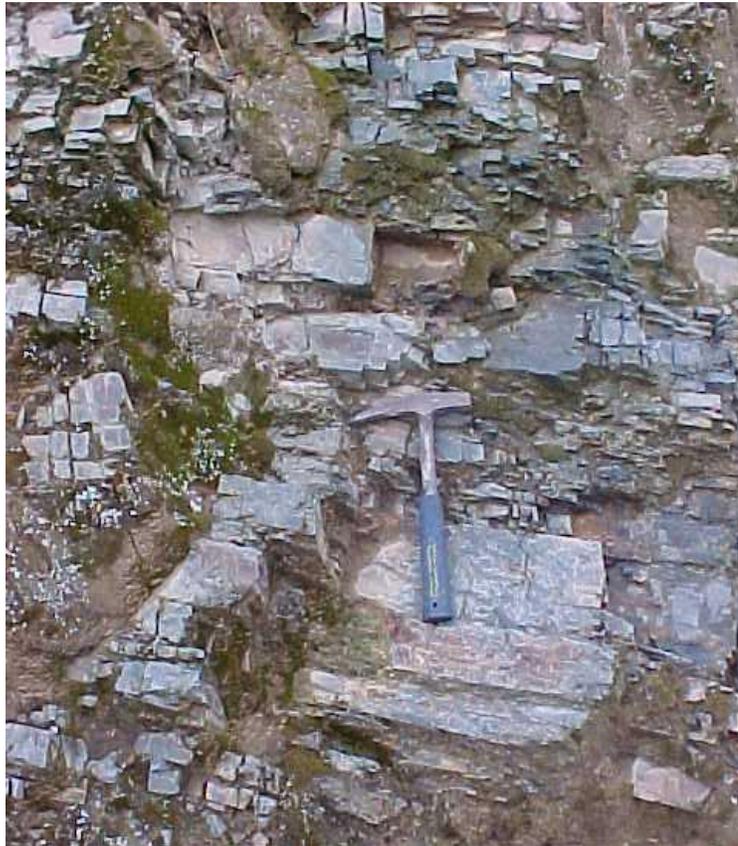


Figura 26, Lutitas calcáreas presentes en la sección de Flor de Patria.



Figura 27, Detalle de las concreciones calcáreas elongadas existentes en la sección de Flor de Patria

Suprayaciendo a la Formación La Luna se reconoció a la Formación Colón, la cual se encuentra en contacto concordante con la Formación La Luna. Mediante la interpretación estructural realizada del área de estudio (ver Figura 30), se determina el contacto entre la Formación La Luna y la Formación Colón como un contacto de falla, el cual no puede ser determinado en la sección aflorante, ya que se está en presencia de una litología eminentemente lutítica. En trabajos recientes, como el de Lorente *et al* (1997) se plantea la existencia de un hiato ente el tope de la Formación La Luna y la base de la Formación Colón, el cual fue determinado en base a información micropaleontológica, en este y otros trabajos se plantea como causa de este hiato el inicio de actividad tectónica al oeste de Venezuela a finales de la depositación de la Formación La Luna.

La Formación Colón en la sección de estudio se caracteriza por la presencia de lutitas silíceas fósiles, de color meteorizado marrón y color fresco gris. En esta sección la Formación Colón presenta ocasionales concreciones limolíticas de alrededor de 20 centímetros de longitud al igual que presenta escasos restos de Amonites.

ASPECTOS ESTRUCTURALES DE LA SECCIÓN DE FLOR DE PATRIA:

La sección se encuentra estructuralmente ubicada en un pliegue sinclinal, cuyo eje posee un rumbo aproximado de N35E.



Figura 28, Forma del pliegue sinclinal donde se encuentra la sección de Flor de Patria

Desde un punto de vista regional se observa que la sección en estudio se encuentra ubicada en un área ampliamente fallada (ver Figura 29), donde las fallas están orientadas en diferentes direcciones.

En el mapa geológico **E – 4 – D**, realizado por la **CREOLE PETROLEUM CORPORATION** en el año 1967 a escala 1:50.000 (ver Figura 29), donde está ubicada la zona en estudio se pueden reconocer tres sistemas de fallas (Madrid I.; 2001):

- El primer sistema de fallas, el cual es dominante en el área, pudiéndose definir este como un sistema de fallas principales con una orientación aproximada **N20E**.
- El segundo sistema de fallas, este está ubicado en posición oblicua al primer sistema de fallas, presentando una orientación aproximada de **N25W**.
- El tercer sistema de fallas, es sub-ortogonal al primer sistema de fallas o sistema de fallas principales, con una orientación aproximada de **N80W**.

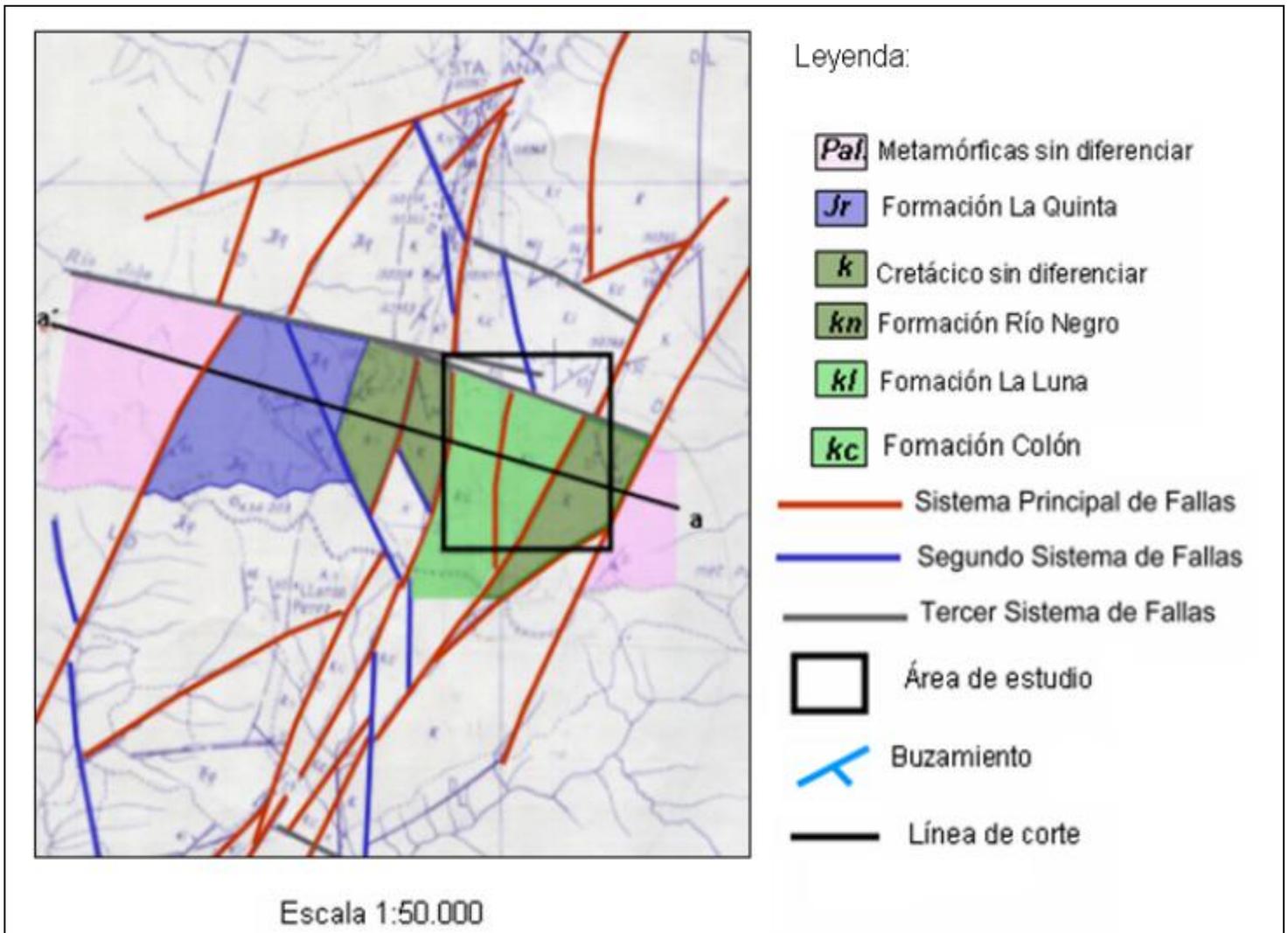


Figura 29, Mapa Geológico de la zona de estudio, Mapa **E – 4 – D** realizado por la **CREOLE PETROLEUM CORPORATION** en el año 1967, tomado y modificado de Madrid I., (2001)

La configuración estructural del área descrita anteriormente, afecta a la sección en estudio de manera particular, ya que esta se encuentra afectada principalmente por el sistema de fallas principales (ver Figura 29).

A partir de la interpretación estructural realizada, se establece que el sistema de fallas principales, está constituido en la proximidades del área en estudio por un sistema conjugado de fallas normales. Donde las fallas ubicadas al Este de la sección presentan un buzamiento oeste y las fallas ubicadas al oeste buzan hacia el Este, produciendo esta configuración la depresión en bloques en direcciones contrarias, generando una estructura tipo graben (ver Figura 30).

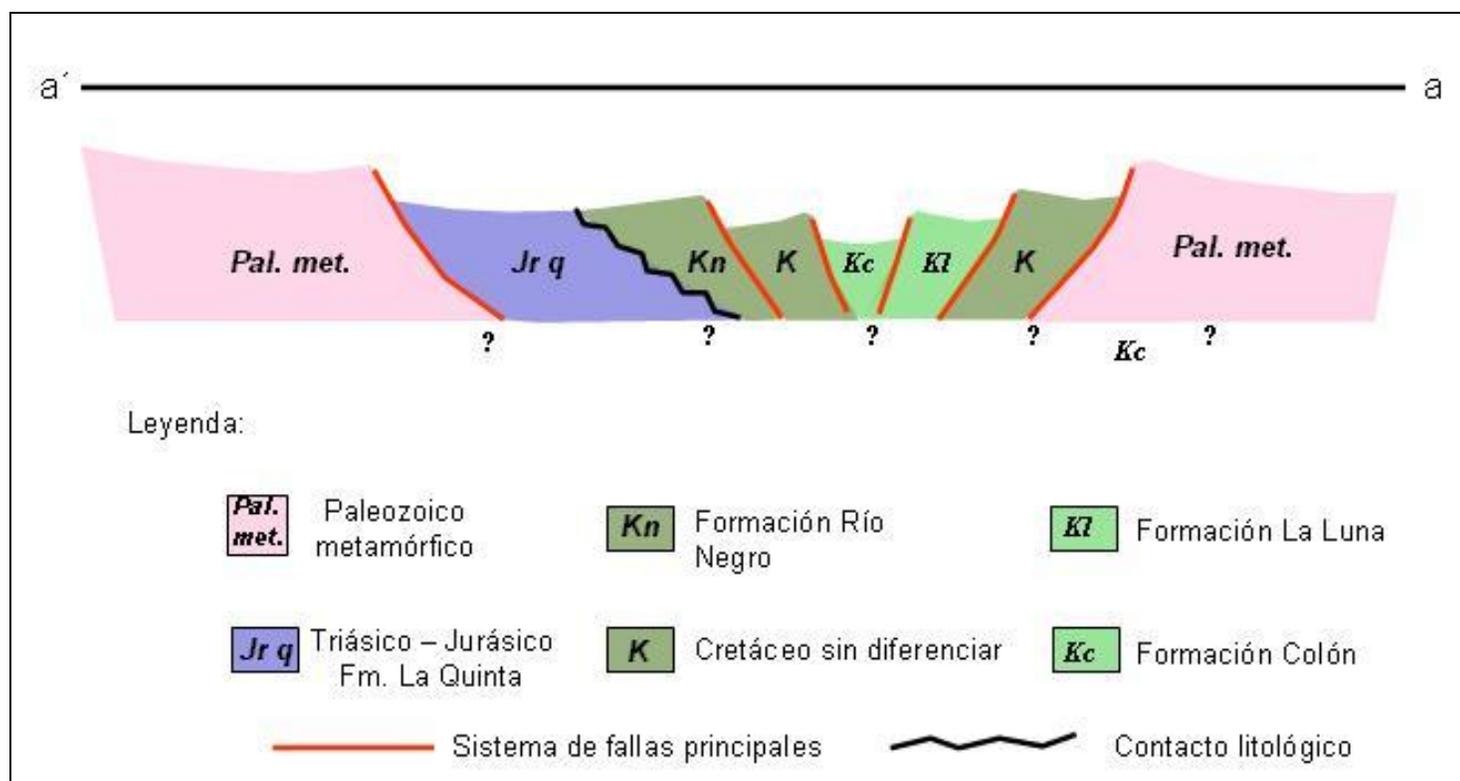


Figura 30, Corte esquemático del graben asimétrico interpretado en la sección de Flor de Patria, tomado y modificado de Madrid I., (2001)

Mediante la configuración estructural y la ubicación de las unidades litológicas observadas en el mapa (ver Figura 30), se observa como cada bloque deprimido en el graben constituye una unidad litológica, la cual se encuentra en contacto de falla con la unidad adyacente, produciendo en la sección en estudio que las formaciones presentes (Peñas Altas – La Luna – Colón), se encuentren en contacto de falla, lo cual no pudo ser identificado en el levantamiento de campo.

CARBONO ORGÁNICO TOTAL (COT)

SECCIÓN “FLOR DE PATRIA”

DESCRIPCIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA GRAFICA:

Los valores de Carbono Orgánico Total (COT) obtenido de las muestras analizadas de la Formación La Luna en la sección de Flor de Patria presentan valores irregulares que van desde 0,12 % como mínimo hasta 1,39 % como máximo, con un promedio de 0,66 %. Los valores promedios obtenidos concuerdan por lo establecido por Tissot & Welte (1978) como mínimos en contenido de COT (0,5 %) para una roca madre clástica.

Con el promedio de los valores obtenidos de COT (0,66 %) y atendiendo a la tabla propuesta por Peters K. E. (1986), la cual describe el potencial generador de hidrocarburos de una roca en base a parámetros como el COT.

CANTIDAD DE HIDROCARBUROS GENERADOS	CONTENIDO DE CARBONO ORGANICO TOTAL (%COT)
POBRE	0 – 0,5
REGULAR	0,5 – 1
BUENA	1 – 2
MUY BUENA	> 2

Tabla 26, Parámetros que describen el potencial generador de hidrocarburos de una roca madre, tomado y modificado de Peters K. E. (1986).

De acuerdo a la Tabla 26, se observa como el valor promedio de COT para la sección de Flor de Patria, se encuentra ubicado dentro del campo de las rocas fuente con calidad regular o aceptable para la producción de hidrocarburos.

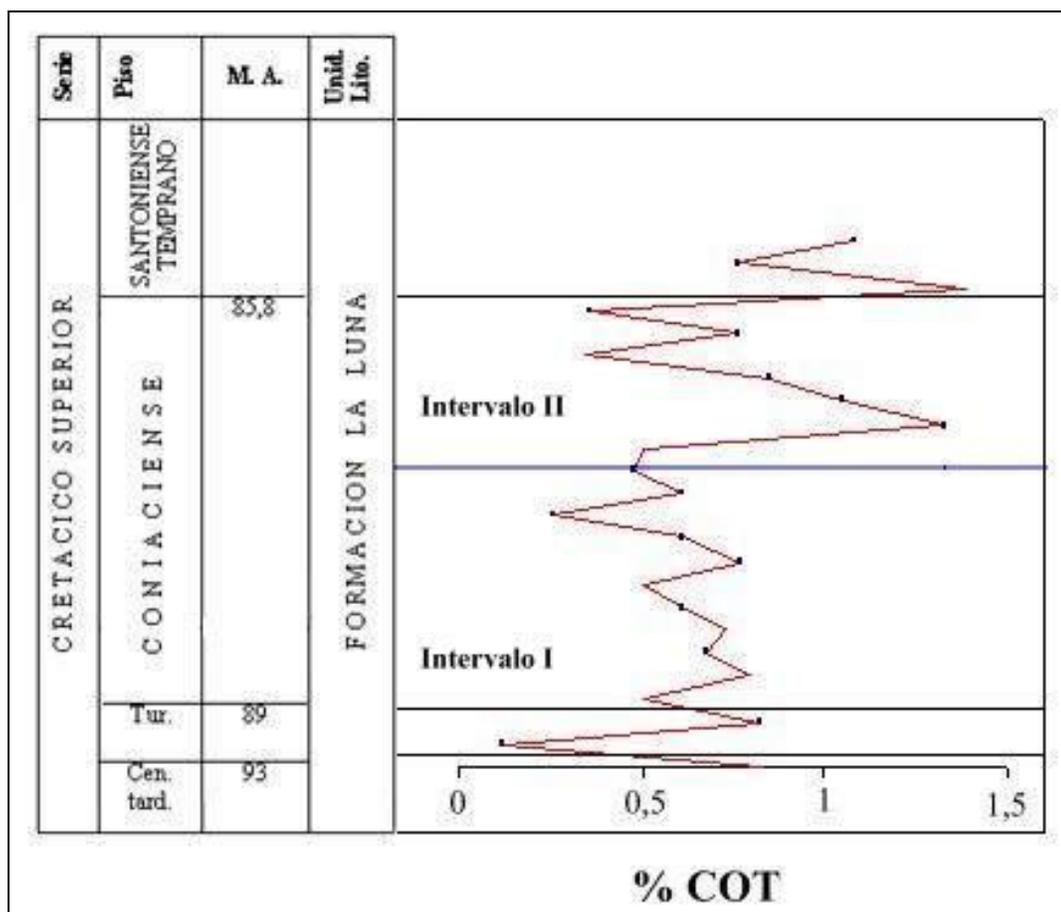


Figura 39, Comportamiento del % COT en la sección de Flor de Patria

Tomando en cuenta la representación gráfica del contenido de COT de la sección (ver Figura 39) en la cual se observa un comportamiento irregular del mismo. Se reportan valores altos de alrededor de 0,83 % durante el Cenomaniense tardío, durante el Turoniense se presentan valores mínimos de

la grafica que alcanzan el 0,12 %, mientras que a partir del Coniaciense se percibe una tendencia de aumento de los valores de 0,51% a 1,39 %.

En general, a partir del comportamiento de la grafica en la Figura 39, se puede definir una tendencia especifica de los valores de COT dentro de la sección, la cual a pesar de tener valores considerablemente altos de COT, se observa como estos van aumentando progresivamente hacia el tope de la sección.

Más específicamente del Cenomaniense tardío al Coniaciense tardío (**Intervalo I**) se reportan valores de alrededor de 0,63 %. Mientras que del Coniaciense tardío al Santoniense temprano (**Intervalo II**) se reportan valores significativamente más altos de aproximadamente 0,75 %.

Los valores promedio para los dos periodos definidos reflejan un ligero aumento de COT hacia el tope de la sección, los contenidos de COT en la sección indican la existencia de condiciones propicias para la conservación de la materia orgánica desde finales de Cenomaniense al Santoniense temprano.

ANALISIS DE LAS VARIACIONES DE LA GRÁFICA DE COT:

Atendiendo al comportamiento del contenido de COT (ver Figura 39), de base a tope en la sección en estudio se han podido definir dos tendencias en el comportamiento de la grafica.

El Primer Intervalo (**Intervalo I**), se presenta durante periodo Cenomaniense tardío – Coniaciense tardío, con valores de COT alrededor de 0,63 %, lo cual es considerablemente alto tomando en cuenta, que durante este periodo no se reportan amplios eventos de alta anoxia a nivel regional que pudieran tener incidencia a nivel local.

El Segundo Intervalo (**Intervalo II**), se presenta durante el periodo Coniaciense tardío– Santiense temprano, durante este periodo se observa un aumento significativo del contenido de COT en comparación con el intervalo anterior, este aumento corresponde con un evento anóxico de alcance global ocurrido durante este periodo y reportado por Arthur & Schlanger (1979), como el OAE₃.

Tomando en cuenta el parámetro del contenido de COT y conociendo que éste está ligado de forma directa con la existencia de condiciones anóxicas se puede describir la sección como influenciada por condiciones anóxicas, las cuales se incrementan hacia el tope de la sección, siendo esto reflejado por un aumento considerable del contenido de COT durante el periodo Coniaciense tardío– Santiense temprano, la intensificación de las condiciones anóxicas como se mencionó anteriormente son debidas a existencia de un tercer evento anóxico (OAE₃) reportado por Arthur & Schlanger (1979), el cual afectó principalmente la zona del Caribe y del Atlántico Norte (ver Figura 100).

Los valores considerablemente altos de COT reportados en el primer intervalo (Cenomaniense tardío – Coniaciense tardío), pueden ser debidos a efectos tardíos de un segundo evento anóxico (OAE₂), aunque también pueden ser debidos a condiciones propicias para la preservación de la materia orgánica existente a nivel local y en la cuenca occidental de Venezuela durante todo el Cretácico tardío (Erlich *et al*; 1999).

SECCIÓN “SAN PREDRO DEL RÍO”

DESCRIPCIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA GRAFICA DE %COT:

Los valores obtenidos del contenido de Carbono Orgánico Total (COT) de las 56 muestras analizadas de la Formación La Luna en la sección de San Pedro del Río, presentan valores dispersos entre 4,57% como máximos y 0,35% como mínimos, con un valor promedio de 1,77%, lo cual es un promedio considerablemente alto, ya que, el contenido promedio de COT para rocas carbonáticas y lutíticas se encuentra entre valores de 0,1 – 1%, alcanzando valores superiores en eventos anóxicos (Arthur & Schlanger; 1979). Por lo tanto el valor promedio obtenido para las rocas de la Formación La Luna en la sección de San Pedro del Río, al ser ubicado en Tabla 27, propuesta por Peters K.E. (1986), la cual describe el potencial generador de hidrocarburos a partir del contenido de COT. Ubica a la sección en estudio en un rango de Buena capacidad generadora de hidrocarburos (ver Tabla 26).

CANTIDAD DE HIDROCARBUROS GENERADOS	CONTENIDO DE CARBONO ORGÁNICO TOTAL (%COT)
POBRE	0 – 0,5
REGULAR	0,5 – 1
BUENA	1 – 2
MUY BUENA	> 2

Tabla 27, Parámetros que describen el potencial generador de hidrocarburos de un roca madre, tomado y modificado de Peters K.E. (1986).

De forma generalizada al observar la representación gráfica del contenido de COT, mostrada en la Figura 40, se reportan altos valores de COT hacia la parte baja de la sección, mientras que en la parte intermedia se tienen valores considerablemente bajos, lo cual cambia hacia el tope de la sección donde se reportan intervalos de mayor contenido de COT.

De manera específica a partir del comportamiento observado en la gráfica de COT (ver Figura 40), se definieron tres intervalos de comportamiento con características particulares entre sí, los cuales son descritos de la siguiente manera:

- **Intervalo I:** está ubicado hacia la base de la sección, extendiéndose del Coniaciense tardío al Santoniense temprano, este intervalo se caracteriza por presentar valores relativamente altos de COT, con mínimos de 0,94% y máximos de 3,32% con un promedio aproximado de 2,08%.
- **Intervalo II:** está ubicado en la parte intermedia de la sección abarcando el Santoniense medio, este periodo se caracteriza por presentar los

menores valores de COT reportados en la sección, con valores mínimos de 0,35% y máximos de 1,85% con un promedio de 0,92%.

- **Intervalo III:** se ubica de la parte media hacia el tope de la sección, abarcando todo el Santiense tardío, este intervalo se distingue por presentar los valores más altos de COT reportados en la sección, los cuales oscilan entre mínimos de 0,42% y máximos de 4,57% con un promedio de alrededor de 2,1%.

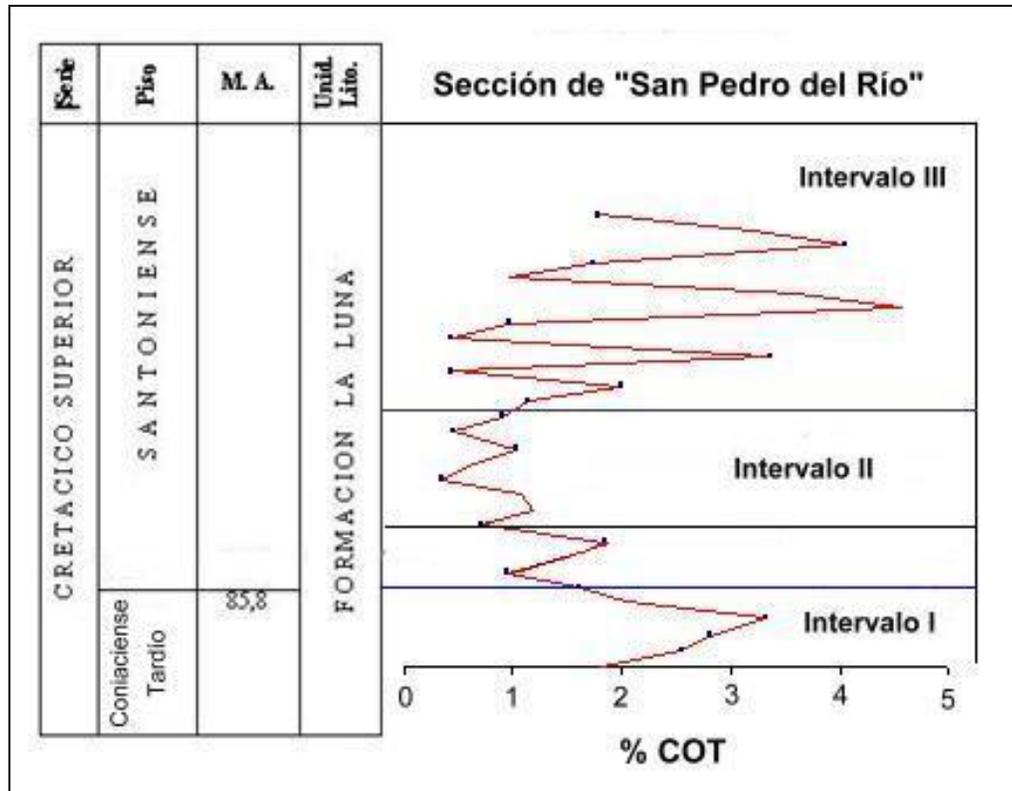


Figura 40, Comportamiento del %COT en la sección de San Pedro del Río

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LA GRAFICA DEL %COT:

Como se mencionó en párrafos anteriores la sección de San Pedro del Río de la Formación La Luna, tiene un contenido promedio de COT de 1,77%, debido a esto la sección se encuentra ubicada en un rango de “buena” capacidad de producción de hidrocarburos (ver Tabla 26).

A partir de los intervalos definidos de contenido de COT, se pueden establecer ciertas características ambientales que se presentan al momento de la depositación de los sedimentos, los cuales favorecieron la preservación de la materia orgánica.

En el **Intervalo I**, el cual está ubicado en la base de la sección ocupando del Coniaciense tardío al Santoniense temprano (ver Figura 40), con un valor promedio de alrededor de 2,08%, lo cual implica una existencia elevada de materia orgánica, lo que está directamente relacionado con la presencia durante esta época de un evento anóxico, definido por Arthur & Schlanger (1979) como OAE₃ (Evento Anóxico Oceánico tres). Este evento anóxico es considerado como el de menor envergadura a escala mundial, pero fue altamente significativo en el área de la cuenca de Maracaibo.

El **Intervalo II**, abarca el Santoniense medio y se caracteriza por presentar los valores más bajos de contenido de COT reportados en la sección, con un promedio de 0,92%. Desde otro punto de vista este valor promedio no es

extremadamente bajo, ya que se encuentra ubicado en un rango de “moderada” a “regular” capacidad generadora de hidrocarburos (ver Tabla 26). Por lo tanto esta disminución del contenido de COT, puede ser producto de ciertos procesos de afectación local, los cuales impidieron la concentración de materia orgánica, aunque el mencionado intervalo se encuentra ubicado dentro del OAE₃.

El **Intervalo III**, se identifica por presentar los valores más altos de COT, con un promedio aproximado de 2,1%, lo cual ubica a este intervalo, en una “muy buena” capacidad generadora de hidrocarburos según la tabla propuesta por Peters K.E. (1986). Esta secuencia de altos valores de COT son producidos por una serie de condiciones ambientales propicias para que se desarrollara una gran cantidad de materia orgánica que es aportada a la cuenca.

En general la sección de San Pedro del Río, se distingue por estar influenciada por el OAE₃, el cual actuó sobre toda la sección, aunque en menor intensidad hacia la parte media de ésta, donde debido a las condiciones locales no se permitió una buena preservación de la materia orgánica, a diferencia de lo sucedido hacia el tope de ésta, donde existió un gran aporte de materia orgánica posibilitado por la previa existencia de condiciones que facilitan una buena actividad orgánica.

CONTENIDO DE CARBONATO DE CALCIO (% CaCO₃)

SECCIÓN “FLOR DE PATRIA”

DESCRIPCIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA GRAFICA DE CaCO₃:

Debido a la litología existente en la sección en estudio, la cual está conformada por lutitas negras calcáreas y calizas, el contenido reportado de CaCO₃ para la sección es considerablemente alto.

En general los valores de CaCO₃ oscilan entre 46,86 % como mínimos y 92,83 % como máximos, con un promedio aproximado para la sección de 77,35 %.

Se observa como los valores altos de CaCO₃ coinciden con valores mínimos de COT, debido a esto la tendencia entre ambas gráficas será inversa, (ver Figura 41) presentándose los valores más altos hacia la parte basal, en el periodo Cenomaniense tardío – Coniaciense tardío con un contenido aproximado de 84,06 %, mientras que en el periodo Coniaciense tardío – Santoniense temprano el promedio de contenido de CaCO₃ es de 71,66 %, lo cual muestra la disminución del contenido de Carbonato de Calcio hacia el tope de la sección.

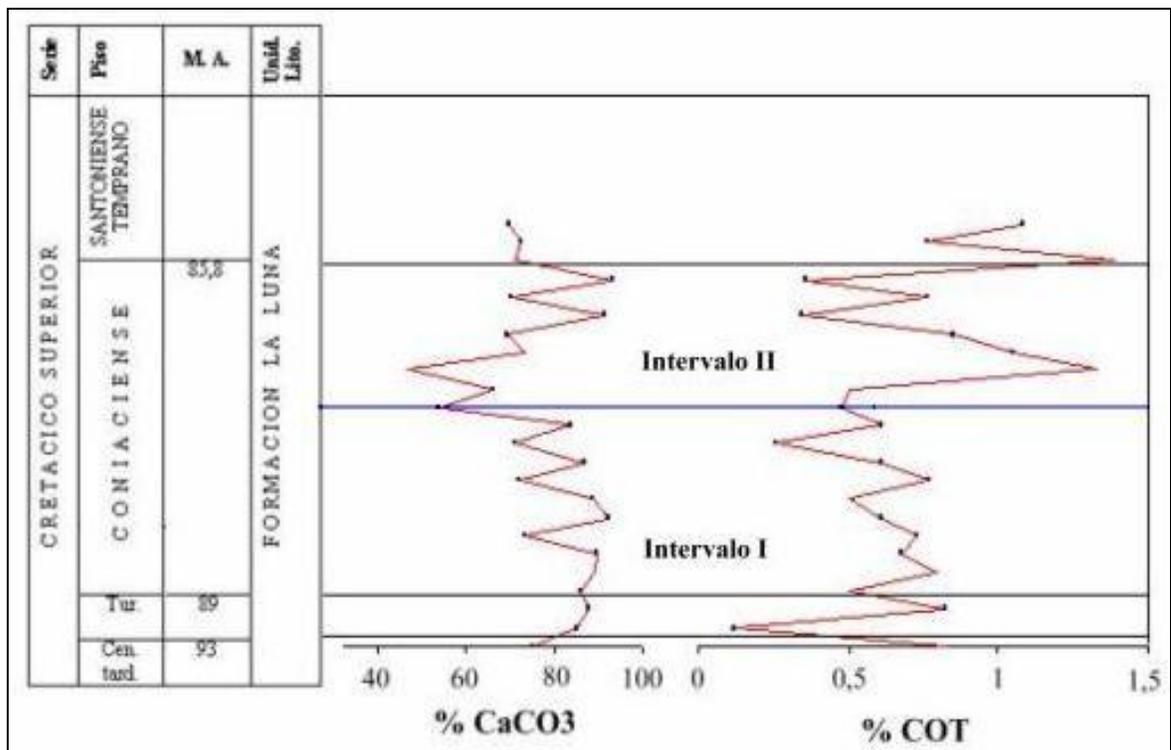


Figura 41, Comparación de las graficas de % CaCO₃ y % COT para la sección de Flor de Patria

De igual forma al comparar los resultados de los análisis de laboratorio con las descripciones de las muestras de la roca fresca, se pudo determinar un contraste significativo, en el cual, las muestras más claras con bandeamiento y venas rellenas de calcita presentan valores más altos de CaCO₃ y más bajos de COT, mientras que las muestras más oscuras son las que tienen mayor contenido de COT y más bajo de CaCO₃.

ANÁLISIS DE LAS VARIACIONES DE LA GRÁFICA DE CaCO₃:

Como se mencionó anteriormente debido a la litología existente en la sección de Flor de Patria, la cual está conformada eminentemente por lutitas calcáreas,

lo que implica que el carbonato de calcio es uno de los componentes mayoritarios de estas rocas, observándose una tendencia a disminuir el contenido de CaCO_3 hacia el tope de la sección (ver Figura 42), aunque es evidente como a finales de Coniaciense se presenta un aumento del contenido de CaCO_3 .

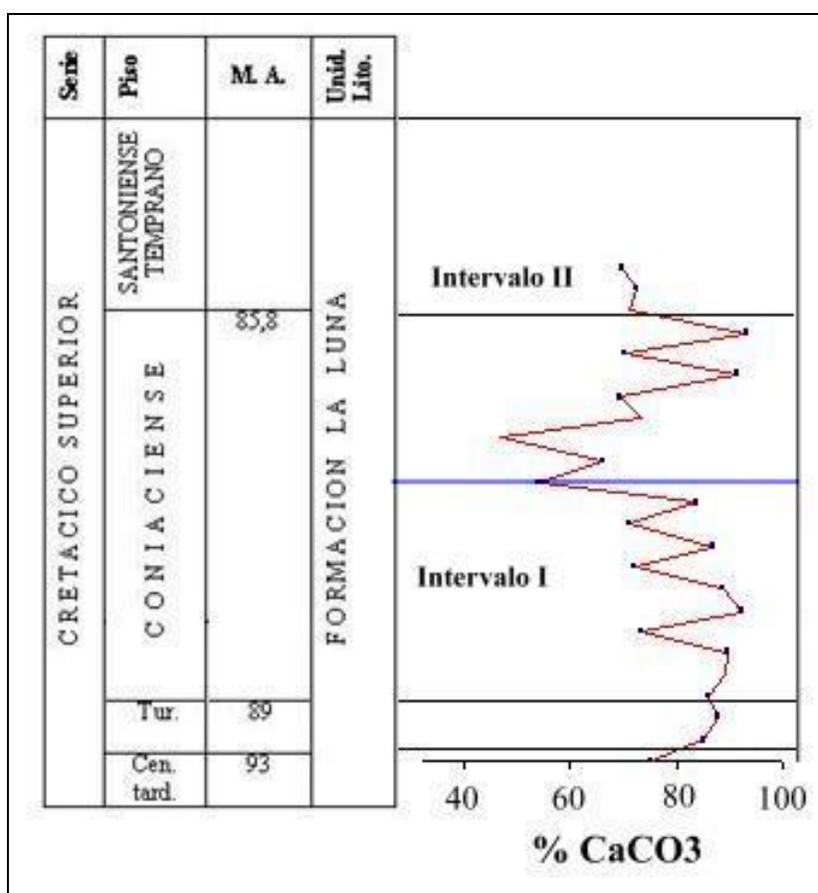


Figura 42, Comportamiento de % CaCO_3 para la sección de Flor de Patria

Al comparar las graficas de CaCO_3 y COT (ver Figura 41), en el Coniaciense tardío se observa como los mínimos de COT coinciden con aumentos

considerables del contenido de CaCO_3 . El mencionado contraste esta presente a lo largo de toda la sección, donde los máximos de COT coinciden con mínimos de CaCO_3 y viceversa. Por lo tanto es obvio como el aumento del contenido de CaCO_3 esta relacionado con la disminución de las condiciones anóxicas durante la depositación de los sedimentos.

Teniendo clara esta relación, se observa como en el periodo Cenomaniense tardío – Coniaciense tardío (Intervalo I) se presentan los valores más altos de CaCO_3 (ver Figura 42), donde existieron condiciones de regular oxigenación. Mientras que en el periodo Coniaciense tardío – Santoniense temprano (Intervalo II) se reportan los valores más bajos de CaCO_3 que indican la existencia de condiciones anóxicas en la cuenca para ese periodo.

Como se trató anteriormente durante el Cenomaniense tardío se observan aumentos en el contenido de CaCO_3 los cuales coinciden con mínimos de COT, esto puede ser consecuencia de pulsos regresivos dentro de la transgresión que afectó todo el Cretácico tardío, produciendo estos pulsos una menor productividad oceánica y una mayor presencia de O_2 en el agua de mar, reflejándose ambos factores en un aumento del CaCO_3 y disminución del COT en los sedimentos (Jarvis, *et al*; 2000)

SECCIÓN DE “SAN PEDRO DEL RÍO”

DESCRIPCIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA GRÁFICA DE CaCO_3 :

Debido a la naturaleza de las rocas de la Formación La Luna en la sección de San Pedro del Río (conformada eminentemente por calizas y lutitas calcáreas), éstas poseen un alto contenido de carbonato de calcio (CaCO_3).

La presencia o variación de diversas condiciones ambientales marca la abundancia en la producción de Carbonato de Calcio (CaCO_3), entre estos factores de control podemos mencionar; profundidad de agua, penetración de luz, oxigenación, temperatura, salinidad, aporte de nutrientes, aporte detrítico, entre otros, de la forma como se observa en la Figura 43.

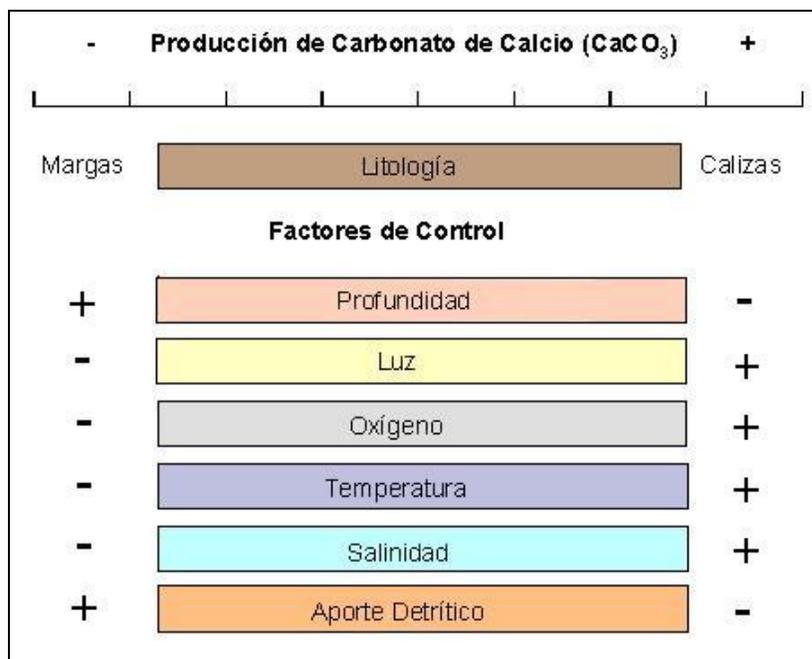


Figura 43, Factores que controlan la producción de CaCO_3

Durante la etapa de campo en la descripción de la sección de San Pedro del Río, se realizó un muestreo detallado a cada metro, obteniéndose un grueso de 56 muestras a lo largo de toda la sección, las cuales se describieron posteriormente de acuerdo al contenido de CaCO_3 (Rey O., Inédito) en:

1. Calizas, de 80 – 100 % de contenido de CaCO_3
2. Calizas margosas, de 60 – 80 % de contenido de CaCO_3
3. Margas, contenido de $\text{CaCO}_3 < 60 \%$

Al aplicar esta definición en las muestras tomadas en campo, se obtuvo que en la sección de San Pedro del Río las margas son las rocas de mayor abundancia (alrededor de 48%), seguida por las Calizas margosas (alrededor de 20%) y en menor abundancia las calizas (alrededor de 7%), mientras que el 25% restante esta conformada por rocas con un contenido muy escaso de CaCO_3 , por lo cual tienen un comportamiento químico distinto al de las demás rocas, ya que estas se encuentran alteradas diagenéticamente por procesos de silicificación (Dos Santos & Soto; Inédito).

El contenido de CaCO_3 en la sección en estudio presenta valores mínimos de 2,2% y máximos de 86,6% con un promedio de alrededor de 41,51%.

A partir del comportamiento de la gráfica de los contenidos de CaCO_3 (ver Figura 44), se pudo definir dos intervalos de comportamiento; el primero (**Intervalo I**), se encuentra ubicado hacia la base de la sección, ocupando del

Coniaciense tardío al Santoniense temprano, este intervalo se caracteriza por tener valores de CaCO_3 relativamente bajos, los cuales no superan el 60%, con valores mínimos de 23,21% y máximos de 57,9%, con un promedio de alrededor de 40,61%. Mientras que el segundo (**Intervalo II**), el cual ocupa el Santoniense medio, se caracteriza por presentar valores muy variables de CaCO_3 , con mínimos de 2,2% y máximos de 86,6% con un promedio aproximado de 41,83%.

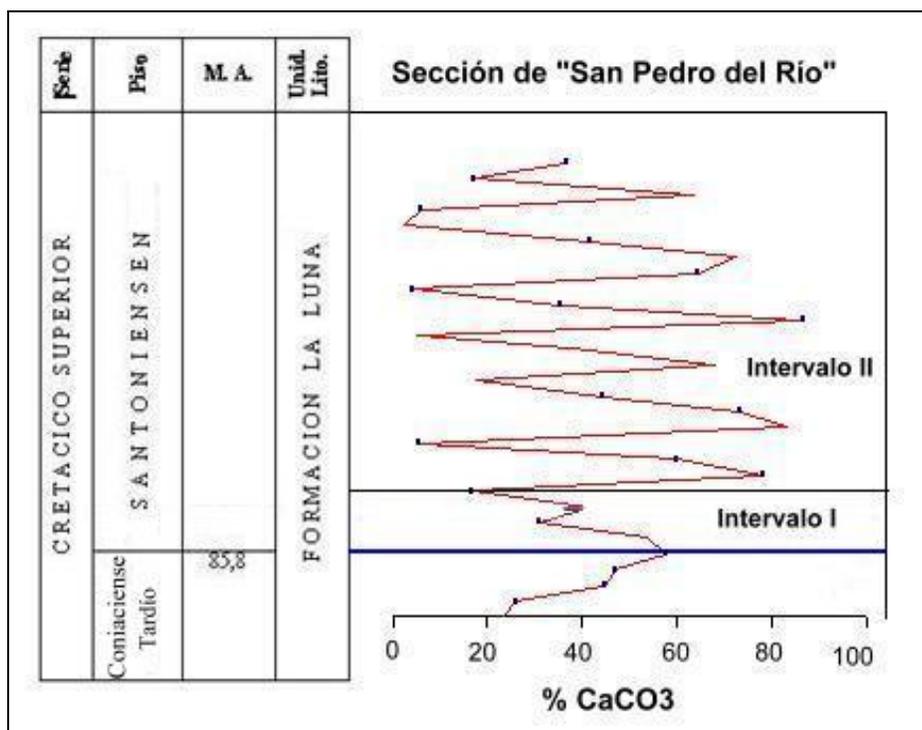


Figura 44, Comportamiento de la grafica de $\% \text{CaCO}_3$, en la sección de San Pedro del Río

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LA GRÁFICA DE CaCO_3 :

Para las rocas de la Formación La Luna en la sección de San Pedro del Río el CaCO_3 es un componente mayoritario, por lo tanto, generalmente el CaCO_3 estará en estas rocas en proporciones mayores al 20%.

Analizando el comportamiento de la representación gráfica del contenido de CaCO_3 se pueden reconocer dos intervalos:

- **Intervalo I** (ver Figura 44): abarca del Coniaciense tardío al Santoniense temprano y se caracteriza por presentar valores relativamente bajos de CaCO_3 los cuales varían entre 20 y 60%. Este primer intervalo coincide con el primer intervalo definido para describir el contenido de COT para esta sección, coincidiendo los valores bajos de CaCO_3 con valores altos de COT (ver Figura 45). Teniendo en cuenta tal relación para este intervalo, se observa como los valores bajos de % CaCO_3 y al altos en %COT en los sedimentos son típicos de ambientes con condiciones anóxicas o de baja oxigenación (siendo el oxígeno una de las variables que determinan la precipitación de CaCO_3).

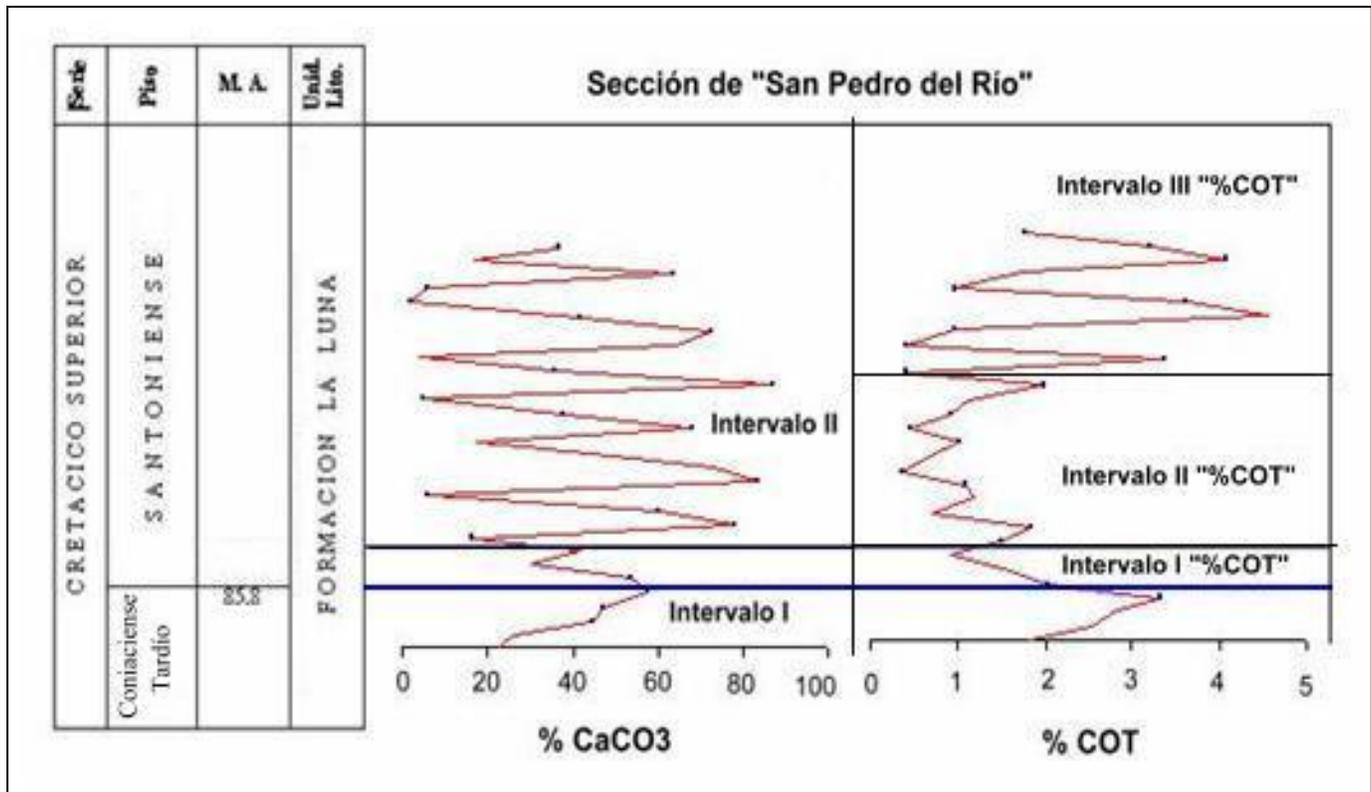


Figura 45, Comparación de la gráficas de %CaCO₃ y %COT para la sección de San Pedro del Río

- Intervalo II** (ver Figura 44): este abarca del Santoniense medio al tardío, se caracteriza por presentar un aumento en los valores de CaCO₃, ya que estos oscilan entre valores de 2,2% hasta 86,6% por lo tanto se dificulta el reconocimiento de un patrón concordante con el comportamiento general de la sección. Al examinar la grafica de la Figura 44, se observan periodos de alto contenido de CaCO₃ intercalado con periodos de muy bajo contenido de CaCO₃ (< 20%), esta tendencia se repite desde la parte media hasta el tope de la sección, por lo tanto se puede determinar un patrón cíclico de periodos de alto y bajo contenido

de CaCO_3 , estos intervalos son definidos por Dos Santos & Soto (Inédito), como producidos por procesos de silicificación extensiva.

Con la finalidad de establecer un patrón de comportamiento dentro de este intervalo no se toman en cuenta las muestras que presenten un contenido de CaCO_3 menor de 20% (debido a que luego de valores menores de 20%, el CaCO_3 deja de ser uno de los componentes de mayor proporción en la roca). Luego de normalizar los valores de la grafica de CaCO_3 , se observa una tendencia más clara donde el CaCO_3 presenta valores entre 20 y 90% (ver Figura 46), lo cual representa a un intervalo de predominancia carbonática.

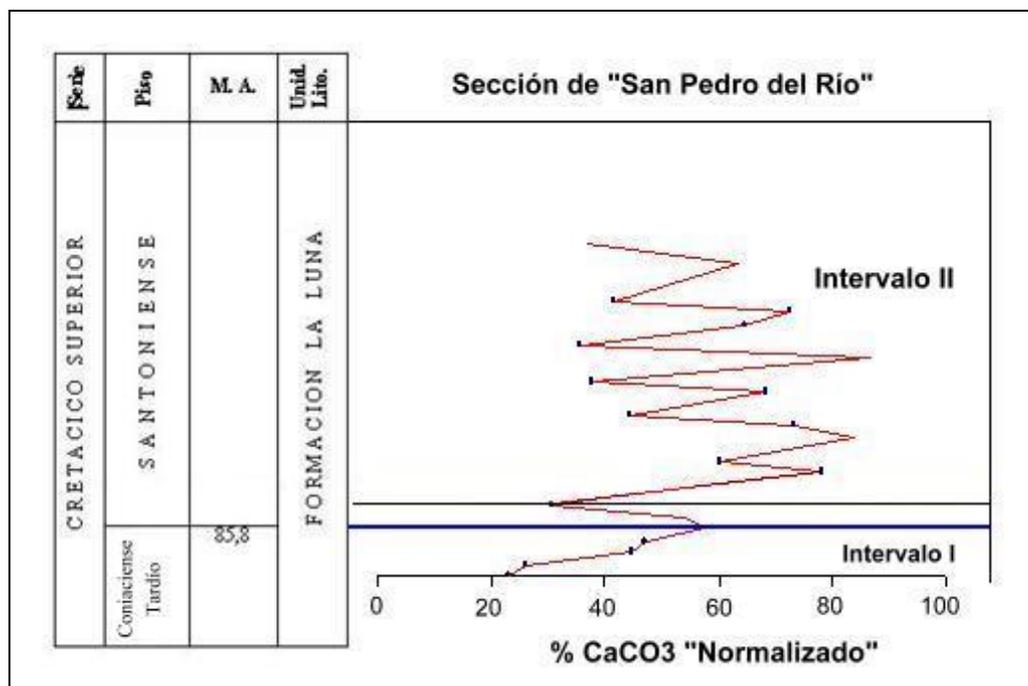


Figura 46, Gráfica de comportamiento normalizado del $\% \text{CaCO}_3$ en la sección de San Pedro del Río.

Al comparar los resultados obtenidos de las representaciones gráficas del contenido de CaCO_3 y COT, para este segundo intervalo, se observa la parte inferior del **Intervalo II**, coincide con el segundo intervalo definido para el %COT, donde se correlacionan los altos valores de CaCO_3 con los bajos contenidos de COT (ver Figura 45), mientras que hacia el tope de la sección valores altos tanto de CaCO_3 como de COT.

Teniendo en cuenta la relación entre los contenidos de CaCO_3 con los de COT, se observa como hacia la parte media de la columna se presentan condiciones de regular oxigenación, evidenciada por altos contenidos de CaCO_3 que produjo la inhibición de la preservación de materia orgánica, este periodo puede ser producto de pulsos regresivos dentro de la transgresión de alcance regional que se produjo durante todo el Cretácico tardío en la cuenca de Maracaibo. Mientras que hacia el tope de la sección se observa un intervalo que coincide con el tercer intervalo definido en el análisis del contenido de COT para esta sección, en esta parte existe coincidencia de valores altos de COT con valores considerablemente altos de CaCO_3 (solo en las muestras con valores mayores al 20%, las cuales no se encuentran silicificadas), donde el aumento de COT puede ser debido a una fuerte intensificación del aporte de materia orgánica, la cual se ve reflejada en un aumento del contenido de COT, el cual no se ve del todo reflejado en el registro, ya que los procesos de silicificación sufridos hacia el tope de la sección provocan

una disolución de materia orgánica produciendo así una alteración del contenido original de COT en la roca.

PRESIÓN DE DIOXIDO DE CARBONO (CO₂)

Un producto secundario del proceso utilizado para obtener las relaciones isotópicas son las presiones de CO₂, ya que al reaccionar las muestras pulverizadas con el HF (ácido fluorhídrico) sobresaturado a temperatura controlada durante un tiempo determinado en la línea de vacío (ver Figura 04), se obtiene un residuo sólido libre de carbonato de calcio.

Como subproducto de la reacción del ácido con la muestra se obtiene un residuo libre de CaCO₃, este compuesto debido a la reacción se ha disociado en CaO y CO₂ en forma gaseosa, encontrándose el mismo mezclado con moléculas de agua y otras impurezas. Al producirse esta reacción bajo las condiciones controladas de la línea de vacío se puede destilar y aislar el CO₂ en forma gaseosa determinando sus presiones para cada una de las muestras analizadas. Por lo tanto se entiende que las presiones medidas de CO₂ por cada muestra son directamente proporcionales a los contenidos de CaCO₃, es decir, a mayor presión de CO₂ se obtienen mayores contenidos de CaCO₃ y viceversa.

SECCIÓN “FLOR DE PATRIA”

DESCRIPCIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA GRÁFICA DE CO₂:

Los valores de las presiones de CO₂ registradas para las muestras de la sección de Flor de Patria, varían de 8,6 mbar a 17 mbar, obteniéndose un promedio para la sección de 12,8 mbar.

De base a tope se observa una tendencia a disminuir los valores de las presiones de CO₂. A partir de esta tendencia se han podido definir dos intervalos (ver Figura 47); el primero del Cenomaniense tardío al Coniaciense temprano, caracterizado este por presentar los valores más altos de las presiones de CO₂. El segundo intervalo va del Coniaciense temprano, el cual presenta valores cada vez menores de las presiones de CO₂, aunque cabe destacar que a finales de Coniaciense se presenta un aumento considerable de los valores de las presiones de CO₂, sin alterar esto la tendencia general de este intervalo.

ANÁLISIS DE LAS VARIACIONES DE LA GRÁFICA DE LAS PRESIONES

DE CO₂: Teniendo en cuenta la relación establecida entre las presiones de CO₂ y el contenido de CaCO₃, se observa como ambas se comportan de igual manera, por lo tanto se pueden definir dos intervalos de comportamiento, los cuales estarán presentes en ambas gráficas (ver Figura 48):

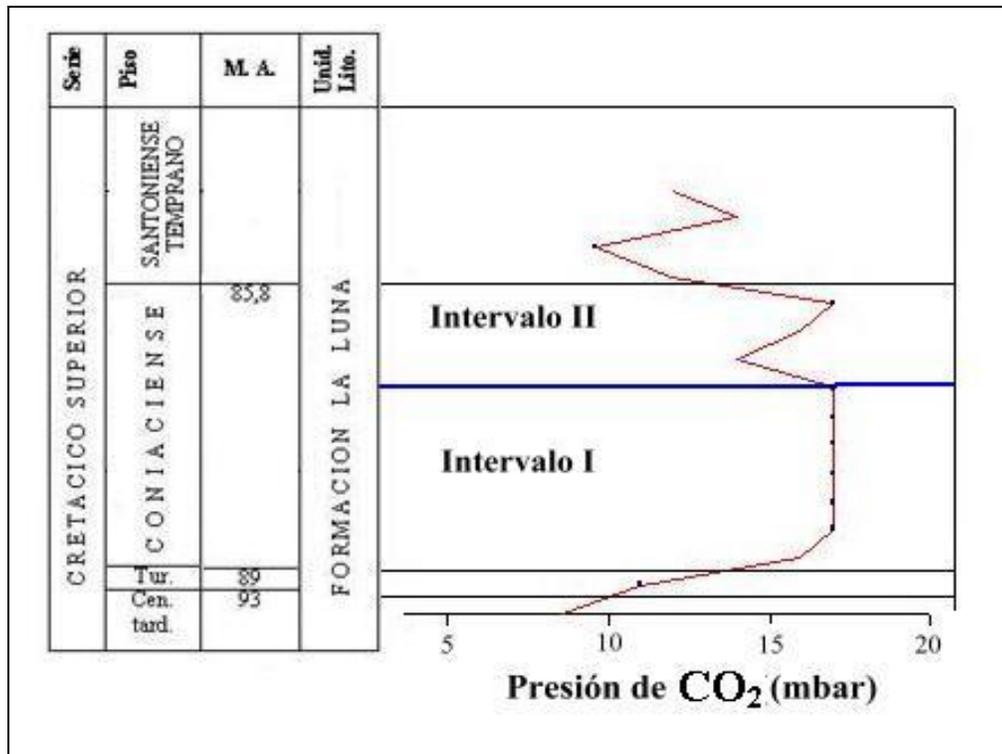


Figura 47, Representación gráfica de las presiones de CO₂ en la sección de Flor de Patria

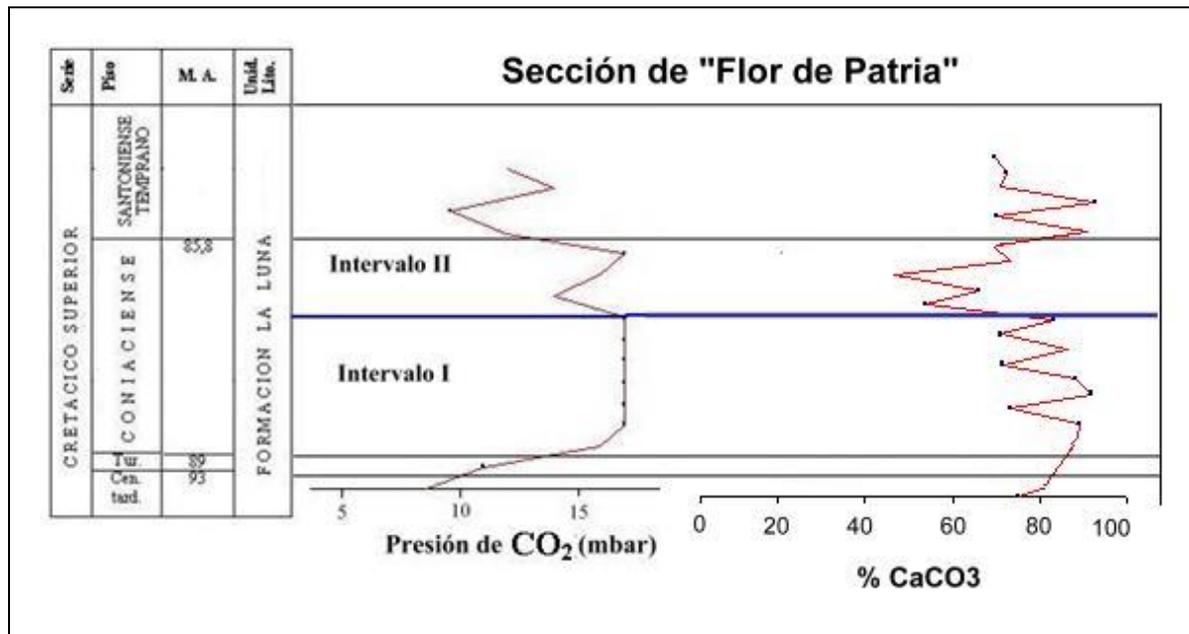


Figura 48, Comparación de los valores de CO₂ y CaCO₃ para la sección de Flor de Patria

El inferior (Intervalo I) va del Cenomaniense tardío al Coniaciense tardío, donde se presentan los valores más altos de las presiones de CO_2 que coinciden con los valores más altos de CaCO_3 , representando este intervalo los periodos de condiciones de regular oxigenación que propician la existencia de organismos que producen carbonatos de origen biogénico. El segundo intervalo (Intervalo II) va del Coniaciense tardío – Santoniense temprano, en donde se observa una disminución de las presiones de CO_2 que igualmente coinciden con la disminución de CaCO_3 , este cambio significativo de los valores de estas dos variables implica un cambio regresivo a condiciones más anóxicas, disminuyéndose de esta forma la presencia de vida dentro de la cuenca.

Cabe resaltar que dentro del Intervalo II a finales del Coniaciense se presenta un aumento de las presiones de CO_2 que de igual manera coincide con un aumento del contenido de CaCO_3 (ver Figura 48), el cual puede deberse a cambios ambientales de pequeña envergadura que pueden producir cambios en el nivel del mar (disminución) que propician aumento del contenido de oxígeno, tales cambios, repercuten en la acumulación de CaCO_3 y por ende un aumento de las presiones de CO_2 .

ISÓTOPOS ESTABLES DE OXIGENO ($\delta^{18}\text{O}$) Y CARBONO ($\delta^{13}\text{C}$)

SECCIÓN DE “FLOR DE PATRIA”

DESCRIPCIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LAS GRÁFICAS DE ISÓTOPOS DE $\delta^{18}\text{O}$ Y $\delta^{13}\text{C}$:

Al estudiar las relaciones isotópicas de oxígeno ($\delta^{18}\text{O}$) y carbono ($\delta^{13}\text{C}$) obtenidas para las muestras de la Formación La Luna en la sección de Flor de Patria, se observa como la gran mayoría de los valores obtenidos se encuentran por debajo del contenido estándar (PDB) comparado, para cada una de las muestras.

Se observa como los valores obtenidos de $\delta^{18}\text{O}$ oscilan entre $-10,22\text{‰}$ como mínimos y $-7,09\text{‰}$ como máximos, con un valor promedio de $-9,95$. Mientras que los valores de $\delta^{13}\text{C}$ oscilan entre $-9,82\text{‰}$ como mínimos y $0,13\text{‰}$ como máximos, con un promedio de alrededor de $-3,20\text{‰}$. El perfil de $\delta^{13}\text{C}$ se caracteriza por tener valores cercanos a cero e incluso algunas excursiones hacia valores positivos.

Al observar los perfiles de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^{13}\text{C}$ se determina fácilmente que estos presentan tendencias inversas entre sí (ver Figura 49). En el caso de la gráfica de $\delta^{13}\text{C}$ se pueden reconocer dos intervalos, uno inferior (Intervalo I) que se caracteriza por presentar valores más negativos de la relación $\delta^{13}\text{C}$, con valores

promedio de $-3,91 \text{ ‰}$, este intervalo se extiende del Cenomaniense tardío al Coniaciense tardío. Mientras que el segundo intervalo (Intervalo II) va del Coniaciense tardío al Santoniense temprano y se caracteriza por presentar valores cada vez menos negativos de $\delta^{13}\text{C}$ con un promedio de alrededor de $-2,49 \text{ ‰}$. En el caso de la gráfica de $\delta^{18}\text{O}$ se observa como de igual manera se pueden definir dos intervalos. El Intervalo I va del Cenomaniense tardío al Coniaciense tardío, presentando valores de alrededor de $-9,21 \text{ ‰}$. Mientras que el segundo intervalo (Intervalo II) que va del Coniaciense tardío al Santoniense temprano, tiene valores promedio de $-9,58 \text{ ‰}$. Al comparar los valores promedio en ambos intervalos se observa como el promedio del Intervalo II es ligeramente más negativo que el del Intervalo I (ver Figura 49).

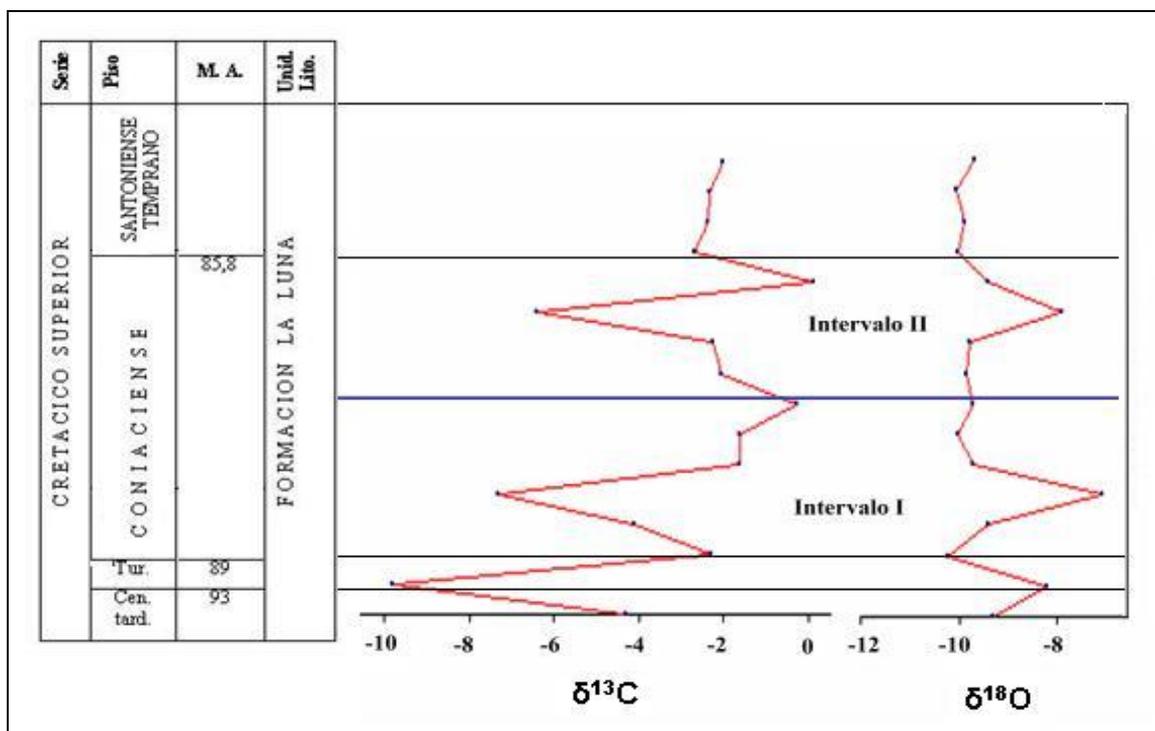


Figura 49, Comportamiento de las relaciones isotópicas de oxígeno y carbono en la sección de Flor de Patria.

Es importante mencionar que al comparar ambas gráficas ($\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{18}\text{O}$) se observa una relación inversa entre ambas, es decir, en el intervalo donde se presentan valores más negativos de $\delta^{13}\text{C}$ se reportan valores menos negativos de $\delta^{18}\text{O}$ y viceversa.

ANÁLISIS DE LAS VARIACIONES DEL COMPORTAMIENTO DE LAS GRÁFICAS DE $\delta^{13}\text{C}$ Y $\delta^{18}\text{O}$: Tal como se mencionó anteriormente el primer intervalo definido que va del Cenomaniense tardío al Coniaciense tardío, se caracteriza por presentar los valores más negativos de $\delta^{13}\text{C}$, la presencia de estos valores implican algunos periodos de exposición subaerea ó baja del nivel del mar, la cual ha quedado grabada durante la depositación de sedimentos (Drzewiecki & Simo; 1997), esto tiene influencia directa en la baja preservación de COT (ver Figura 50), dentro de este mismo intervalo se presentan valores relativamente bajos de $\delta^{18}\text{O}$, que implica baja salinidad de las aguas de la cuenca. Es importante mencionar que en los datos recabados para la sección en estudio de isótopos de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{18}\text{O}$ no se presenta una repuesta significativa de los valores isotópicos durante el limite Cenomaniense – Turoniense (limite C/T) a diferencia de lo reportado por Drzewiecki & Simo (1997) donde se reportan excursiones positivas de $\delta^{13}\text{C}$ y valores altos de COT.

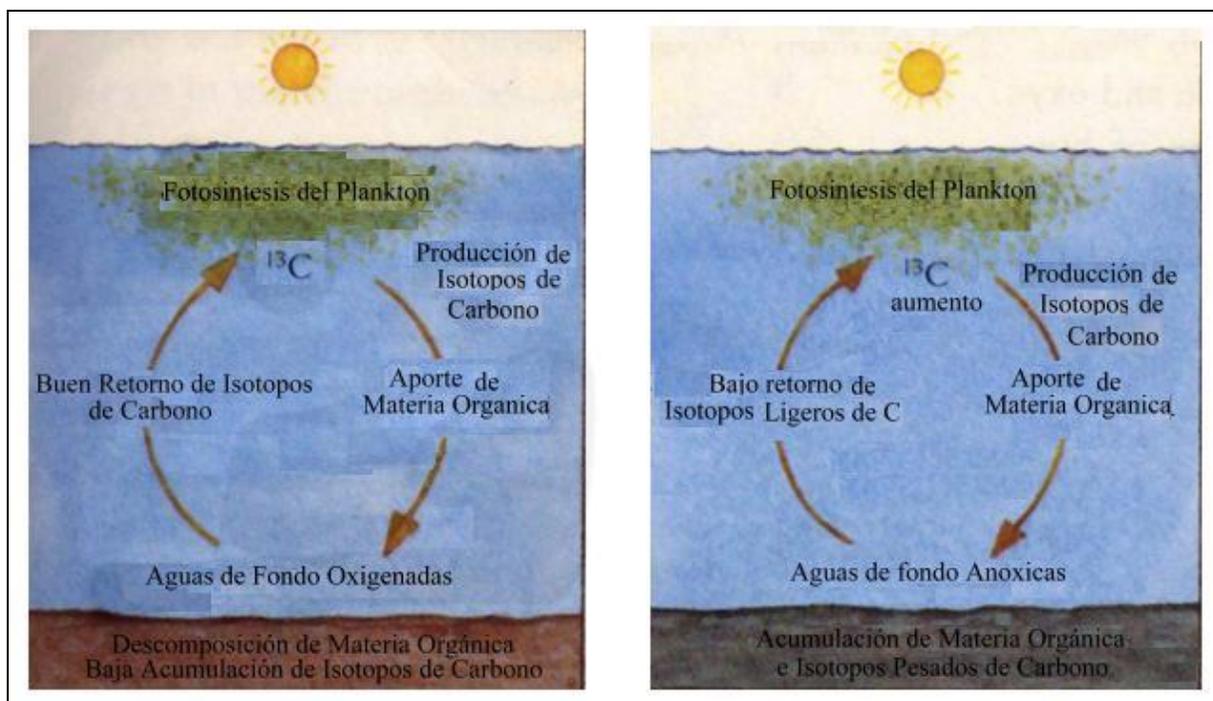


Figura 50, Ciclo de acumulación de los isótopos de carbono, tomado y modificado de Stanley S. (1999)

Para el intervalo Cenomaniense tardío – Coniaciense tardío, Madrid I. (2001) reporta valores altos de contenido de fauna plántica y béntica con la existencia de excursiones hacia valores mínimos de presencia de organismos (ver Figura 50). La abundancia de organismos reportada para este intervalo implica la existencia de condiciones necesarias para la existencia de estos, entre las cuales se puede mencionar buena oxigenación de las aguas y aporte necesario de nutrientes. Dentro de este mismo intervalo se presentan fluctuaciones en los valores isotópicos, contenido de COT y abundancia de organismos, tal como se observa en la Figura 49, este puede ser debido a alternancia de periodos de

alta oxigenación y aporte de nutrientes debidos a subidas del nivel de mar, con periodos de baja oxigenación y poco aporte de nutrientes.

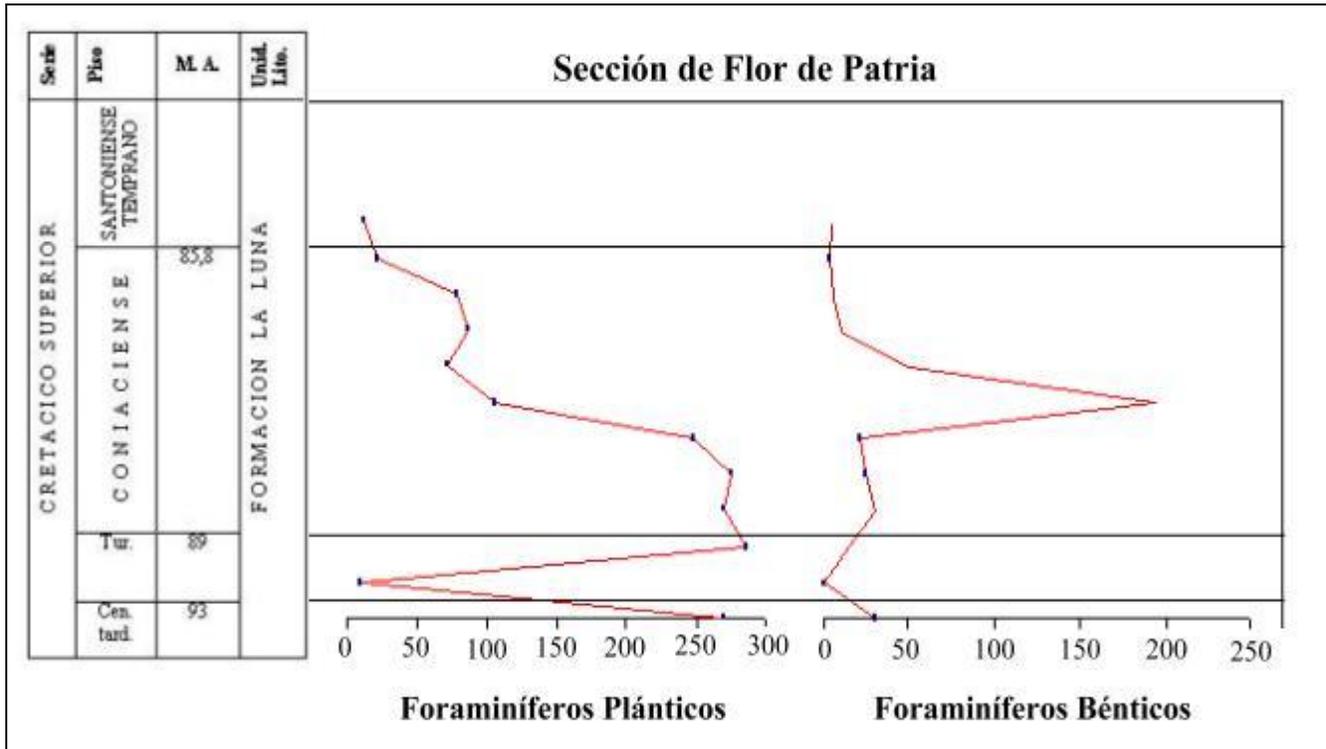


Figura 51, Abundancia de foraminíferos plánticos y bénticos en la sección de Flor de Patria, tomado y modificado de Madrid, I (2001).

En el segundo intervalo definido (Intervalo II), el cual va del Coniaciense tardío al Santoniense temprano, se presentan valores ligeramente más negativos de $\delta^{18}\text{O}$, lo cual significa que para este periodo existieron condiciones de salinidad mayores a las del intervalo anterior, el aumento de la salinidad esta directamente relacionado con la presencia de una cuenca restringida con poco intercambio de aguas y alta evaporación (ver Figura 52).

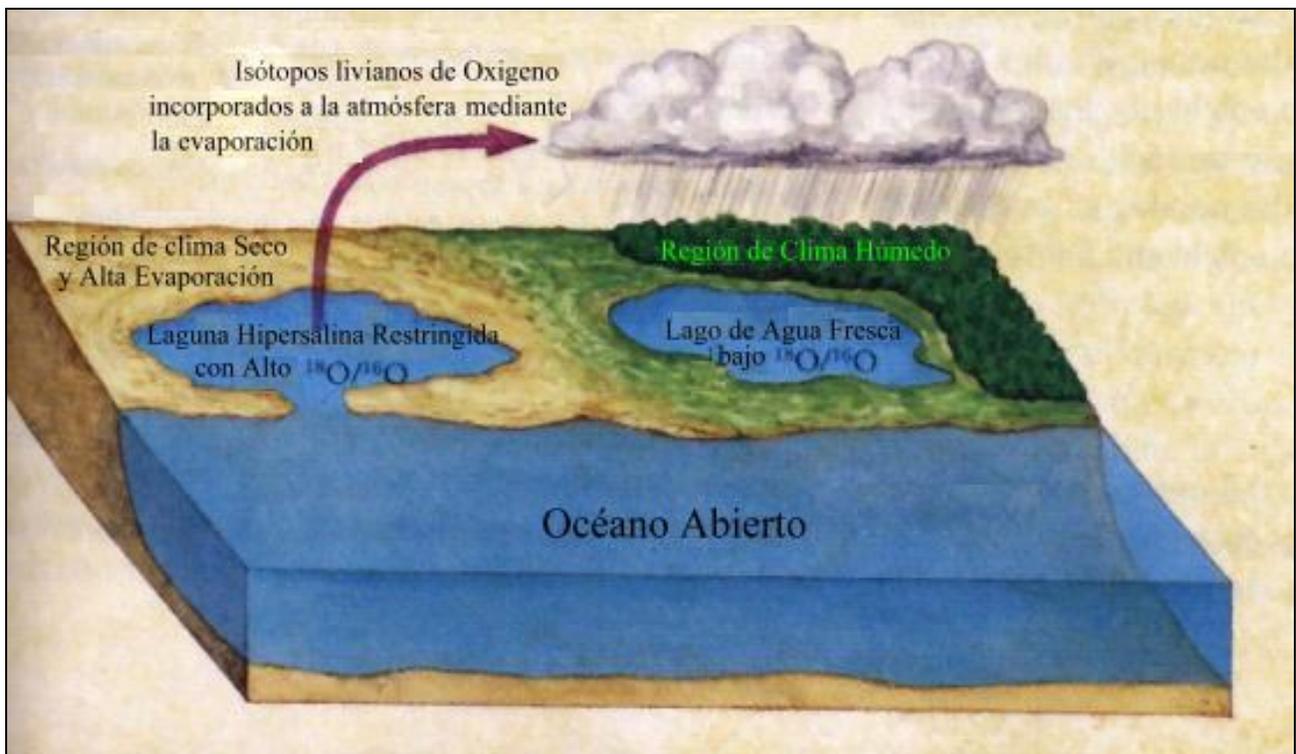


Figura 52, Efectos de la evaporación sobre la acumulación de isótopos de oxígeno, tomado y modificado de Stanley S. (1999)

De igual manera para este mismo intervalo se presentan valores cada vez menos negativos de $\delta^{13}\text{C}$ (ver Figura 49), tales valores cercanos a cero coinciden con valores altos de COT (Vera J, 1994), esta tendencia a coincidir estos valores es reportada en otros trabajos de alcance regional como Erlich *et al* (1999). Aunque para otros autores como Drzewiecki & Simo (1997) las excursiones hacia valores positivos de $\delta^{13}\text{C}$ puede estar influenciada por cambios producidos durante la diagénesis de los sedimentos, ya que algunos de los fluidos diagenéticos están enriquecidos en CaCO_3 , lo cual puede causar un ligero aumento del contenido original de carbonatos en los sedimentos.

Considerando la influencia de este factor como mínima dentro de la sección en estudio, ya que las excursiones hacia valores positivos de $\delta^{13}\text{C}$ en el intervalo Coniaciense tardío – Santoniense temprano son muy restringidas.

Debido a los valores presenten de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{18}\text{O}$, se puede interpretar para el Intervalo II (Coniaciense tardío – Santoniense temprano), se presentaron condiciones anóxicas (baja oxigenación) y de alta salinidad en una cuenca restringida tal como se observa en la Figura 52, esto provoca una mayor concentración de la materia orgánica y escasez de organismos durante este periodo (ver Figura 50).

SECCIÓN DE “SAN PEDRO DEL RÍO”

DESCRIPCIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LAS GRÁFICAS DE LOS ISOTOPOS DE $\delta^{13}\text{C}$ Y $\delta^{18}\text{O}$:

Los valores isotópicos obtenidos para las muestras de la Formación La Luna en la sección de San Pedro del Río, se caracterizan por presentar valores por debajo de del estándar de comparación, por lo tanto se obtendrán valores negativos de las relaciones isotópicas.

Los valores isotópicos de $\delta^{13}\text{C}$ se caracterizan por presentar valores que oscilan en máximos de $-1,41\text{ ‰}$ y mínimos de $-10,76\text{ ‰}$ con un promedio aproximado de $-3,3\text{ ‰}$.

Al observar la representación gráfica del $\delta^{13}\text{C}$ (ver Figura 53), se observa un comportamiento definido donde se pueden reconocer tres intervalos, los cuales presentan propiedades definidas:

- **Intervalo I:** se ubica en la base de la sección y va del Coniaciense tardío al Santoniense temprano, dentro de este intervalo se reportan los valores más altos de $\delta^{13}\text{C}$ (cerca de cero), los cuales se agrupan entre valores mínimos de $-3,74\text{ ‰}$ y máximos de $-1,41\text{ ‰}$ con un promedio de $-2,57\text{ ‰}$.
- **Intervalo II:** se encuentra ubicado en la parte media de la sección ocupando el Santoniense medio, este intervalo se diferencia de los demás por presentar los valores más bajos de $\delta^{13}\text{C}$ de la sección, los cuales oscilan entre valores mínimos de $-10,76\text{ ‰}$ y máximos de $-1,96\text{ ‰}$ con un promedio de $-4,86\text{ ‰}$.
- **Intervalo III:** ubicado hacia el tope de la sección, este se caracteriza por presentar valores de $\delta^{13}\text{C}$ ligeramente más altos que los obtenidos en el **Intervalo I**, teniendo valores mínimos de $-3,35\text{ ‰}$ y máximos de $-2,27\text{ ‰}$ con un promedio de $-2,95\text{ ‰}$.

En el caso de los valores isotópicos de ^{18}O , se observa como la representación grafica mostrada en la Figura 53, presenta valores que oscilan entre $-4,96\text{ ‰}$ como máximos y $-12,21\text{ ‰}$ como mínimos con un promedio de $-9,64\text{ ‰}$. De igual manera que en el caso anterior se pueden reconocer tres intervalos de comportamiento de la grafica de $\delta^{18}\text{O}$:

- **Intervalo I** (Coniaciense tardío – Santoniense temprano): Ubicado hacia la base de la sección, este intervalo tiene valores comprendidos entre -10 ‰ como mínimos y -8 ‰ como máximos.
- **Intervalo II** (Santoniense medio): Ubicado en la parte media de la sección, este intervalo se distingue por presentar los valores más altos de $\delta^{18}\text{O}$ con un rango entre $-7,56\text{ ‰}$ y $-10,91\text{ ‰}$ y un promedio de $-8,16\text{ ‰}$.
- **Intervalo III**: Se encuentra hacia el tope de la sección, dentro de este intervalo se reportan valores de $\delta^{18}\text{O}$ ligeramente más bajos que los reportados en el primer intervalo, los valores de este tercer intervalo están ubicados en un rango entre $-10,11\text{ ‰}$ y $-12,21\text{ ‰}$ con un promedio de $-10,92\text{ ‰}$.

Comparando las graficas de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{18}\text{O}$, se observan como (ver Figura 53) ambas graficas presentan un comportamiento opuesto entre sí.

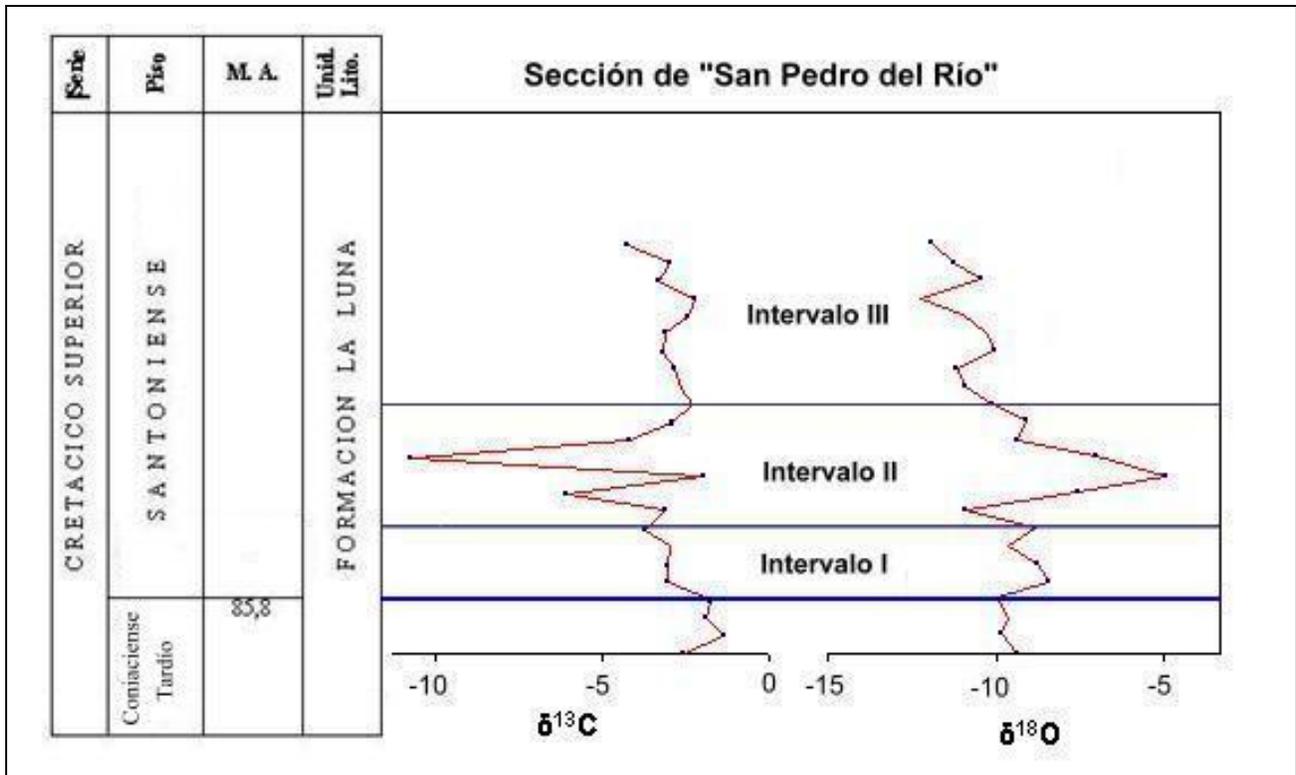


Figura 53, Comportamiento de las relaciones Isotópicas de oxígeno y carbono en la sección de San Pedro del Río.

ANÁLISIS DE LAS VARIACIONES DEL COMPORTAMIENTO DE LAS GRAFICAS DE $\delta^{13}\text{C}$ Y $\delta^{18}\text{O}$:

Al comparar las gráficas de $\% \text{CaCO}_3$, $\% \text{COT}$, $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{18}\text{O}$, se observa como en todas las gráficas menos en la de $\% \text{CaCO}_3$ (donde sólo se reconocen dos intervalos de comportamiento), se definen el mismo numero de intervalos, los

cuales presentan ciertas características que determinan diversas condiciones ambientales que serán aquí analizadas.

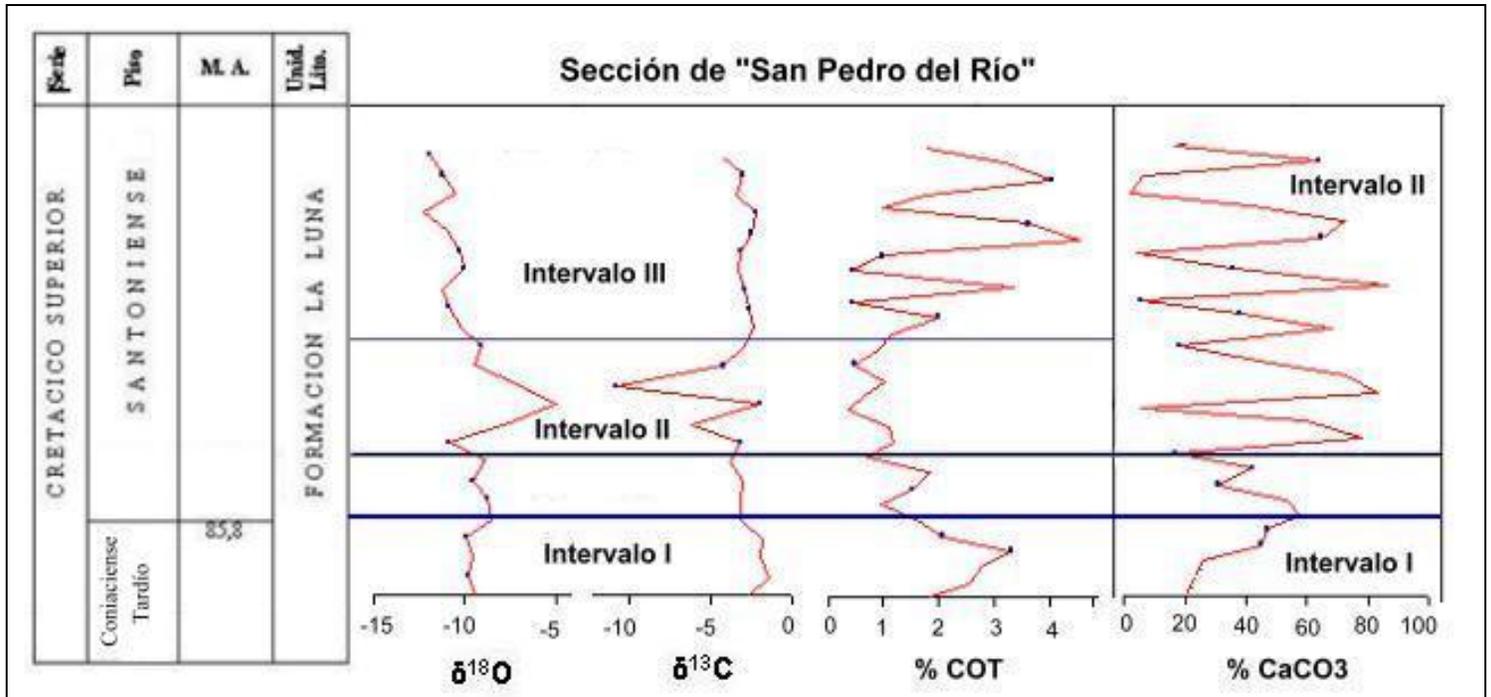


Figura 54, Comparación entre el comportamiento del %CaCO₃; %COT y isótopos de carbono y oxígeno en la sección de San Pedro del Río.

El **Intervalo I**, que va del Coniaciense tardío al Santoniense temprano, es común para las graficas comparadas en la Figura 54, se caracteriza por presentar los valores más altos (menos negativos) de $\delta^{13}C$, lo cual coincide con un intervalo de alto contenido de COT, tal como es indicado por Vera J. (1994), al igual que un intervalo de menor proporción de CaCO₃, este mismo intervalo muestra los valores bajos (más negativos) de $\delta^{18}O$ en comparación con los

mostrados en el resto de la sección, lo que implica que durante este intervalo se presentaron condiciones de alta salinidad, a partir de esto se interpreta que durante el Coniaciense tardío al Santoniense temprano se presentaron condiciones baja oxigenación y alta salinidad (Vera J; 1994), que provoca una buena preservación de materia orgánica evidenciado por la presencia de altos contenidos de COT, los cuales coinciden con valores altos de $\delta^{13}\text{C}$, tal como es reportado por Erlich *et al*; (2000), en un estudio de alcance regional, debido a esto no se reporta una alta precipitación de carbonatos dentro de este intervalo.

De igual manera la existencia de las condiciones anóxicas planteadas para este intervalo, pueden ser corroboradas fácilmente, mediante el uso de las concentraciones de foraminíferos béticos, mostrados en la Figura 55, los cuales son muy escasos en la parte baja de la sección (Kertnuz V; Inédito), por la falta de oxígeno en el fondo de la cuenca, lo cual no permitió su desarrollo en el **Intervalo I**.

Durante el **Intervalo II** (Santoniense medio), se reportan cambios en el comportamiento de las gráficas comparadas en la Figura 54, ya que se observa un cambio hacia valores más negativos de $\delta^{13}\text{C}$ que corresponde con una disminución significativa del contenido de COT, por otro lado se tienen valores menos negativos de $\delta^{18}\text{O}$, que significan una disminución de la salinidad de las aguas de fondo provocado por el intercambio de aguas oxigenadas con aguas anóxicas de fondo (Mongenot *et al*, 1996), el aumento de la oxigenación

provocado por este intercambio genera una mayor precipitación de CaCO_3 , la cual se hace común en el resto de la sección, por lo tanto tales condiciones provocan un aumento del contenido de foraminíferos béticos (Kertnuz V.; Inédito), ya que hacia el fondo de la cuenca se presentó una mejor oxigenación que permitió un mayor desarrollo de estos organismos, tal como se observa en la Figura 55.

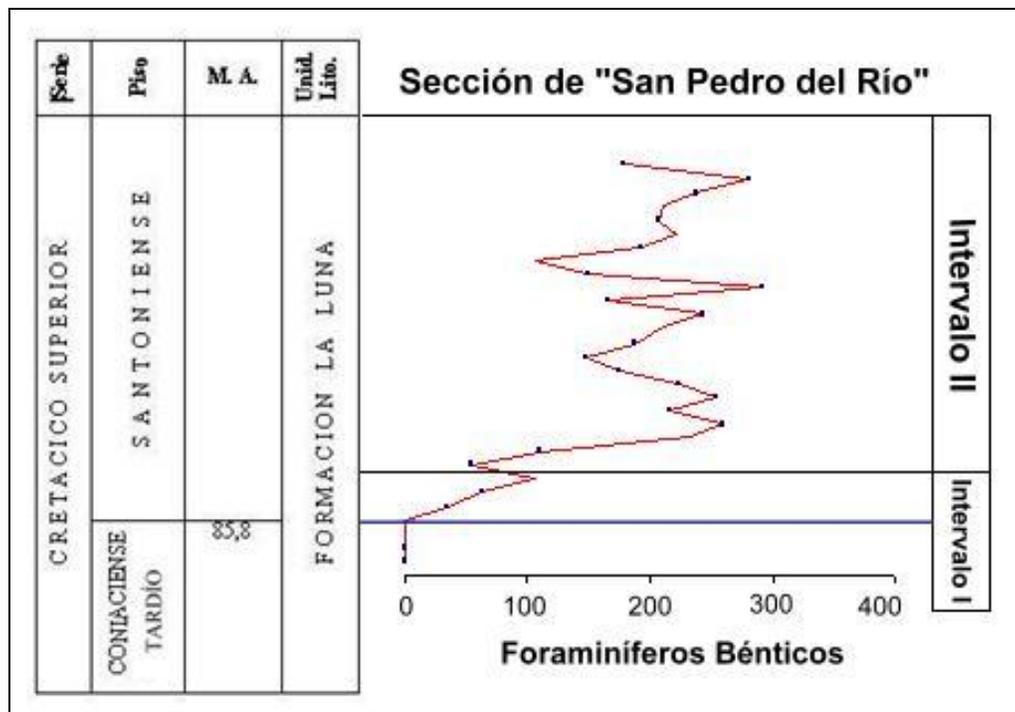


Figura 55, Contenido de foraminíferos béticos para la sección de San Pedro del Río, tomado y modificado de Kertnuz, V (Inédito).

Por lo tanto, se puede decir que a partir de Santoniense medio, se produce una disminución significativa de las condiciones anóxicas que se presentaban en la cuenca, debido a mayor presencia de oxígeno a las aguas de fondo

produciendo, como se mencionó anteriormente, una disminución de la salinidad de las aguas de fondo, menor concentración de materia orgánica y mayor precipitación de CaCO_3 .

En el **Intervalo III**, se producen condiciones muy parecidas a las descritas para el primer intervalo (en comportamiento isotópico), con valores ligeramente menores de $\delta^{13}\text{C}$ y valores de COT más altos que en el **Intervalo I** y un contenido de CaCO_3 relativamente alto. Atendiendo al comportamiento químico presentado en este intervalo, se puede decir, que durante este periodo, se presentaron condiciones anóxicas de intensidad muy parecidas, aunque ligeramente menores a las existentes durante el **Intervalo I** (debido a la significativa presencia de CaCO_3 durante este intervalo), mientras que el comportamiento del COT muestra una amplia presencia de materia orgánica aportada a la cuenca durante este periodo, la cual fue mucho mayor a la presentada en los demás periodos.

El comportamiento descrito en este intervalo no puede ser observado en la gráfica de contenido de foraminíferos béticos (Figura 55), por lo tanto se puede inferir que las condiciones de anoxia no variaron hacia el tope de la sección, por lo tanto el aumento del contenido de COT reportado puede ser debido a un incremento del aporte de materia orgánica a la cuenca.

DESCRIPCIÓN DE LOS ELEMENTOS A UTILIZAR

Para el estudio de geoquímica de la Formación La Luna en las secciones de Flor de Patria y San Pedro del Río, se determinaron las concentraciones de diversos elementos químicos, tales como: hierro (Fe), vanadio (V), níquel (Ni), manganeso (Mn), zinc (Zn), rubidio (Rb), cromo (Cr), cobre (Cu), fósforo (P), aluminio (Al), bario (Ba), sodio (Na), calcio (Ca), potasio (K), titanio (Ti), silicio (Si), entre otros.

Cada uno de estos elementos tiene propiedades distintas, lo cual provoca un aumento o disminución de sus concentraciones en los sedimentos, debido a que cada uno de ellos tiene comportamiento distinto bajo diversas condiciones químicas, que determinan en gran manera el comportamiento ambiental de una determinada región.

Como se mencionó anteriormente, bajo ciertas condiciones, los elementos químicos suelen presentar distintos comportamientos, provocando esto un aumento o disminución de sus concentraciones, pudiendo comportarse, bien sea, como elementos mayoritarios, minoritarios o traza. El contenido de éstos en los sedimentos queda grabado en las rocas a lo largo de todo el registro geológico.

Para este tipo de trabajo, de caracterización quimioestratigráfica, es de gran importancia el uso de los denominados elementos traza, los cuales se encuentran en concentraciones menores al 0,1% en peso. Debido a la poca abundancia de este tipo elementos en las rocas y a su sensibilidad química, pequeños cambios en sus concentraciones son interpretadas como variaciones en las condiciones de depositación.

Las interpretaciones realizadas acerca de las concentraciones de diversos elementos en distintos ambientes, los cuales presentan comportamientos químicos distintivos que facilitan el aumento o disminución de éstos, son realizadas a partir de estudios en sedimentos recientes, depositados en cuencas actuales, de las cuales se tiene conocimiento exacto del ambiente de depositación reinante y sus características químicas.

Tomando los datos de estos estudios como promedio y atendiendo al principio del “uniformismo”, el cual propone la existencia de leyes naturales universales e inviolables, las cuales no cambian en el curso de los tiempos (Stanley S.; 1999), es decir, que los procesos que ocurren hoy en día son los mismos que ocurrieron a lo largo del registro geológico.

Por lo tanto, se puede extrapolar que al presentarse concentraciones de elementos parecidas a las establecidas en el promedio en rocas de otra época geológica, se puede interpretar que al momento de la depositación de los

sedimentos existieron las condiciones ambientales y químicas propicias para que se presentaran tales concentraciones de elementos.

Para las interpretaciones realizadas en este trabajo se tomó en cuenta los patrones de concentración de elementos establecidas por Wedepohl (1971), el cual comparó datos de concentraciones de ciertos elementos en muestras de lutitas alrededor del mundo (para el trabajo de Wedepohl; 1971, se tomo un espacio muestral de 277 muestras). Otro de los patrones utilizados es el planteado por Vine & Tourtelot (1970), en el cual se trabajó con las concentraciones de elementos en lutitas negras (Black Shales) en diversas localidades, con un espacio muestral de 779 muestras.

ELEMENTO	CONCENTRACIÓN (‰) (Wedepohl; 1971)	CONCENTRACIÓN (‰) (Vine & Tourtelot; 1970)
Bario (Ba)	580	300
Cadmio (Cd)	10	No determinada
Cobalto (Co)	19	10
Cromo (Cr)	90	100
Cobre (Cu)	45	70
Molibdeno (Mo)	3	10
Níquel (Ni)	68	50
Plomo (Pb)	20	20
Estroncio (Sr)	300	200
Vanadio (V)	130	150
Zinc (Zn)	95	300

Tabla 28, Estándar de concentraciones de elementos químicos en ppm.

Al comparar las concentraciones de cada uno de estos elementos para las secciones en estudio con los estándares propuestos por Wedepohl (1971) y por Vine & Tourtelot (1970), se puede deducir con facilidad si las rocas de la Formación La Luna y en las secciones estudiadas en este trabajo, presentan un enriquecimiento o no de estos elementos. Esto ayuda a determinar las características ambientales que marcaron la depositación de las rocas en estudio, una vez conocidos las características ambientales de las rocas propuestas en el estándar.

ELEMENTO	CONCENTRACIÓN (‰) (Wedepohl; 1971)	CONCENTRACIÓN (‰) (Vine & Tourtelot; 1970)	CONCENTRACIÓN (‰) SECCIÓN DE FLOR DE PATRIA
Bario (Ba)	580	300	275
Cadmio (Cd)	10	No determinada	No determinada
Cobalto (Co)	19	10	16
Cromo (Cr)	90	100	87
Cobre (Cu)	45	70	52
Molibdeno (Mo)	3	10	No determinada
Níquel (Ni)	68	50	50
Plomo (Pb)	20	20	No determinada
Estroncio (Sr)	300	200	182
Vanadio (V)	130	150	674
Zinc (Zn)	95	300	430

Tabla 29; Comparación de la concentración de los estándares (ppm) y las concentraciones obtenidas para la sección de Flor de Patria.

Al observar la Tabla 29, se determina que dentro de los elementos que presentan un enriquecimiento en la sección de Flor de Patria de la Formación La Luna, según los estándares planteados para las lutitas analizadas por Wedepohl (1971), se puede mencionar al cobre (Cu), vanadio (V) y zinc (Zn), los cuales tienen concentraciones superiores o parecidas a las propuestas

como estándar para las lutitas negras (Black Shales) dadas por Vine & Tourtelot (1970), indicando esto, que la depositación de los sedimentos de la Formación La Luna en la sección de Flor de Patria ocurrió en un ambiente rico en materia orgánica, el cual es necesario para que se produzcan las lutitas negras. Las altas concentraciones de los elementos anteriormente mencionados concuerda con lo propuesto por Davis *et al* (1999), donde señalan a tales elementos como típicos en la composición de los sedimentos ricos en materia orgánica.

ELEMENTO	CONCENTRACIÓN (‰) (Wedepohl; 1971)	CONCENTRACIÓN (‰) (Vine & Tourtelot; 1970)	CONCENTRACIÓN (‰) SECCIÓN DE SAN PEDRO DEL RÍO
Bario (Ba)	580	300	259
Cadmio (Cd)	10	No determinada	No determinada
Cobalto (Co)	19	10	92
Cromo (Cr)	90	100	77
Cobre (Cu)	45	70	20
Molibdeno (Mo)	3	10	No determinada
Níquel (Ni)	68	50	44
Plomo (Pb)	20	20	No determinada
Estroncio (Sr)	300	200	129
Vanadio (V)	130	150	331
Zinc (Zn)	95	300	366

Tabla 30; Comparación de la concentración de los estándares (ppm) y las concentraciones obtenidas para la sección de San Pedro del Río.

Al comparar los valores promedios de los elementos aquí mostrados en la Tabla 30, con los estándares propuestos por Wedepohl (1971) y Vine & Tourtelot (1970), se observa como para la sección de San Pedro del Río se presenta un enriquecimiento en ciertos elementos como por ejemplo, vanadio (V) y zinc (Zn), los cuales se acumulan en cantidades considerables en sedimentos ricos en materia orgánica (Davis *et al*; 1999).

A diferencia de los elementos anteriormente nombrados, se observa como el bario (Ba) se acumula en cantidades relativamente bajas en comparación con los estándares propuestos en la tabla 30, este déficit en el contenido de Ba de las rocas en la sección de San Pedro del Río, indica que durante la depositación de los sedimentos existió una baja productividad orgánica, ya que el mencionado elemento se acumula en ambientes de alta productividad orgánica (Mongenot *et al*; 1996).

Al comparar los valores promedios de los elementos analizados con los estándares propuestos, se observa como; el ambiente de depositación de los sedimentos en la sección de San Pedro del Río fue la propicia para que existiera la preservación de materia orgánica.

CARACTERÍSTICAS DE LA ROCA FUENTE

Antes de iniciar cualquier disertación acerca de la geoquímica de las rocas de la Formación La Luna en las secciones en estudio, es necesario tener conocimiento acerca de las características de la roca fuente o protolito, donde se da inicio al ciclo sedimentario. Como punto de inicio de este estudio se tomó en cuenta el tipo de roca (según su origen) de donde provienen los sedimentos que conforman las rocas de la Formación La Luna y el tipo de meteorización que las afectó.

ANÁLISIS DE PROVENIENCIA: Una de las aplicaciones más extendidas y conocidas de los elementos traza, es la determinación de la fuente de sedimentos, para ello se utilizan como marcadores quimioestratigráficos elementos químicos contrastantes en su composición en rocas félsicas o máficas, es decir, mediante la asociación o relación entre elementos típicos de un tipo de roca en específico, se puede establecer con facilidad el origen de la roca parental.

Existen muchas relaciones que se han hecho en distintos trabajos para conocer la naturaleza de la roca fuente a partir de la composición química de los sedimentos que se han depositado y transformado en una nueva roca sedimentaria. Para el caso del estudio aquí realizado se tomó en cuenta la relación establecida en el trabajo de Saito (1998), quien propuso que la

proporción entre Na y Fe (Na/Fe), puede estimar la influencia volcánica, la cual se establece mediante la presencia de valores bajos de Na/Fe ya que en los sedimentos de origen volcánico existe una mayor proporción de hierro (Fe) que de Sodio (Na). Mientras que los valores altos de la relación Na/Fe estiman la existencia de una mayor influencia plutónica, ya que en las rocas de este tipo hay una mayor predominancia de sodio (Na) que de hierro (Fe).

Para la sección de **Flor de Patria**, se estableció la relación Na/Fe (ver Figura 56), y tomando en cuenta lo planteado por Saito (1998) en su trabajo, se pudo, determinar que la fuente de aporte dominante en la sección de Flor de Patria es eminentemente plutónica ya que a lo largo de la sección estudiada se reportan generalmente valores menores a 0,5 de la relación Na/Fe, aunque hacia la base y hacia el tope se observan picos en esta relación (ver Figura 56), lo cual puede ser debido principalmente a eventos intermitentes de actividad volcánica, la cual se ve reflejada en la sección de estudio, debido a la presencia de altos, mediante la extensión de tales excursiones se puede inferir, que la actividad volcánica es de corta duración y de intensidad menor ya que no afecta en gran manera el patrón de sedimentación en la sección en estudio.

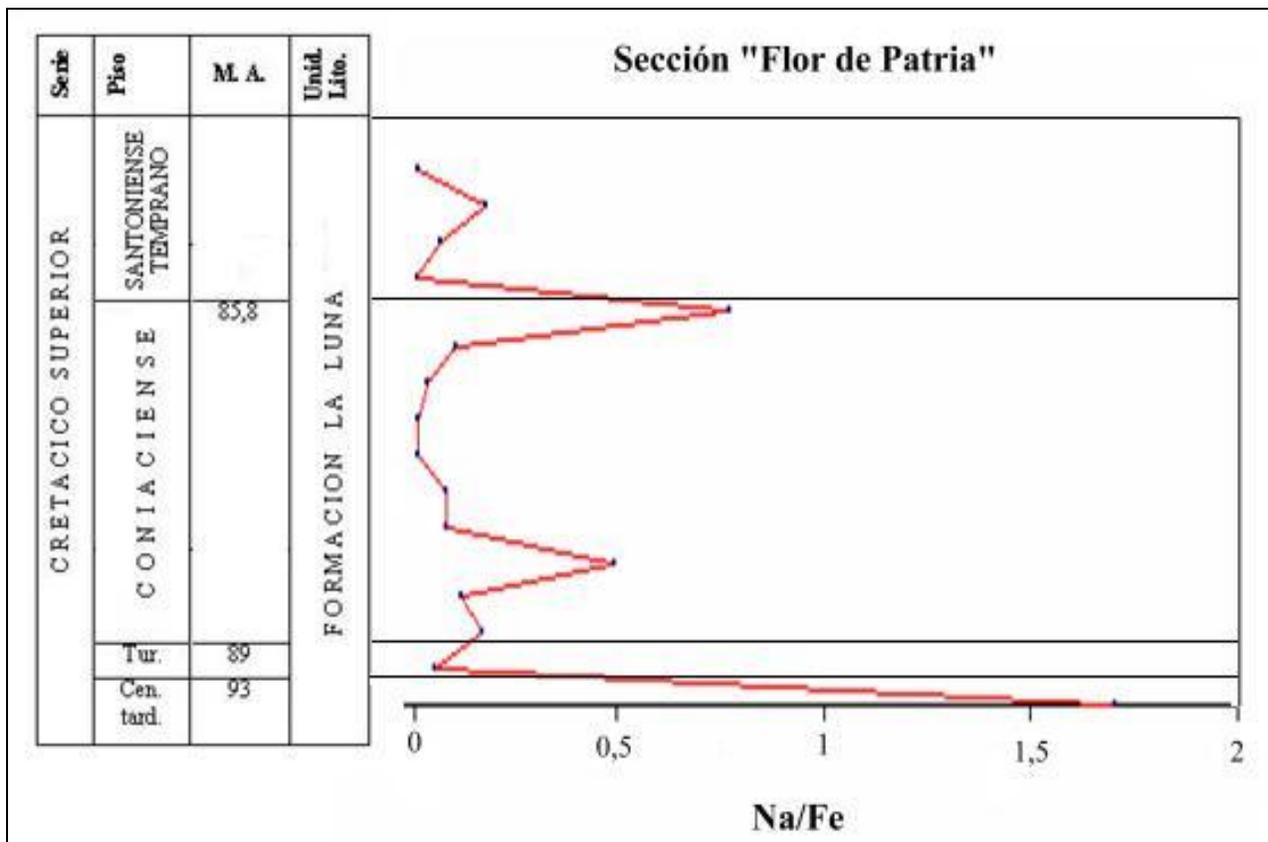


Figura 56, Relación Na/Fe para la sección de Flor de Patria.

Para la sección de **San Pedro del Río**, al observar la grafica de la relación Na/Fe (ver Figura 57) y atendiendo a los parámetros establecidos por Saito (1998), se determina como los sedimentos que se depositaron en esta sección, provienen de un área (fuente de aporte) que se encuentra conformada por rocas ígneas plutónicas, ya que los valores de la relación Na/Fe a lo largo de la sección están comprendidos entre 0,2 y 0,6 aunque hacia la parte media y superior de la sección se observan discrepancias de los valores antes mencionados, ya que allí se reporta un aumento significativos de la relación Na/Fe hacia valores superiores a 1 (ver Figura 57), estos máximos reportados

en la sección pueden ser debidos a eventos de corta duración de actividad volcánica.

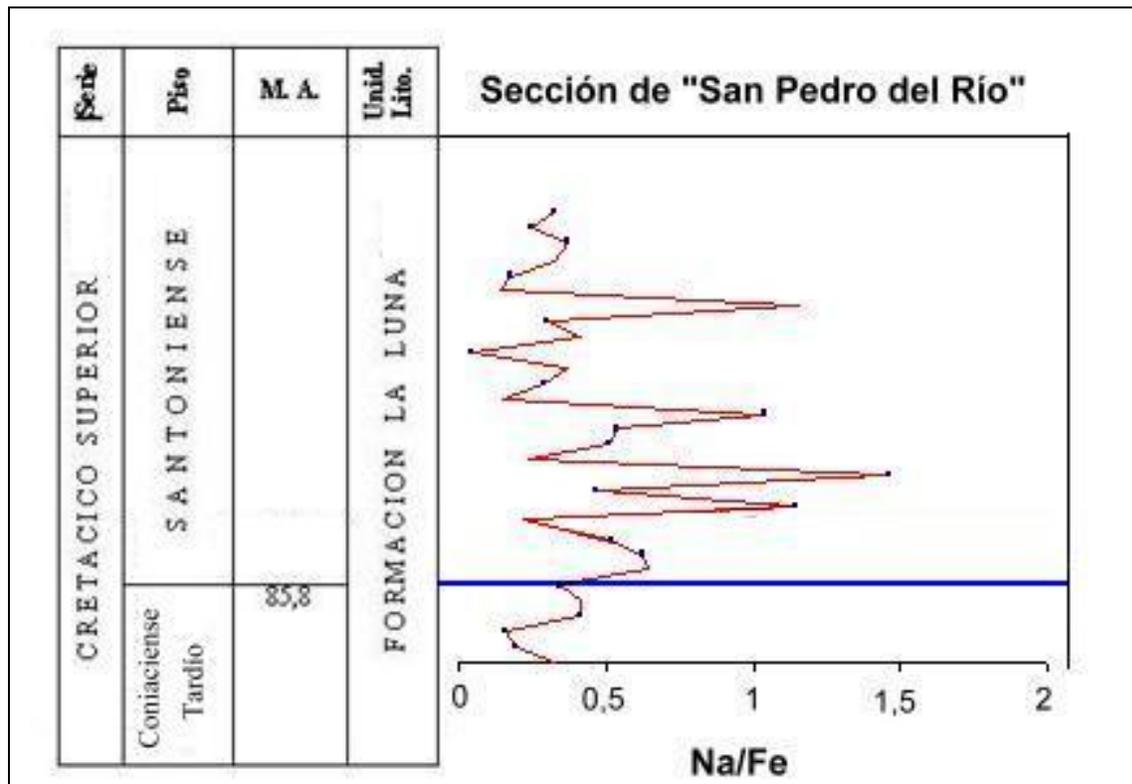


Figura 57, Relación Na/Fe para la sección de San Pedro del Río

TIPO DE METEORIZACIÓN QUE AFECTÓ A LA ROCA FUENTE: este es otro de los factores que son tomados en cuenta para el estudio preliminar acerca del origen de los sedimentos que generaron las rocas de la Formación La Luna en las secciones en estudio. El grado de meteorización que afectó a la roca fuente es de gran importancia en este tipo de estudio, ya que la meteorización es el primer proceso que se lleva a cabo al iniciarse el ciclo sedimentario, y debido a

su intensidad o tipo se producirá cierto enriquecimiento o empobrecimiento en algunas especies químicas y minerales.

Como es sabido, la meteorización esta gobernada por los factores climáticos existentes en el área fuente; en regiones o localidades frías y/o con baja humedad la meteorización física será predominante, mientras que en áreas cálidas y húmedas es dominante la meteorización química (Alberdi & Martínez; 1999), aunque ambos tipos se presentan simultáneamente, pero con la supremacía de alguna de ellas.

Si el nivel de meteorización alcanzado en la fuente fue lo suficientemente avanzado (meteorización química pronunciada) o si prevaleció preferentemente la meteorización física, se pueden diferenciar una de la otra, a partir de algunas relaciones geoquímicas sensibles a este fenómeno, entre las cuales se puede mencionar el perfil potasio-aluminio (K/Al) y la gráficas que vinculan las relaciones logarítmicas del Al/K y el Al/Si.

Para la sección se **Flor de Patria**, al establecer las relaciones planteadas, se observa como la gráfica K/Al presenta valores bajos no superiores a 0,25 (ver Figura 58), siendo este menor al promedio para las lutitas planteado por Wedepohl (1971). Tomando en cuenta el trabajo realizado por Saito (1998), donde usa esta relación para determinar cambios en las condiciones de meteorización, los cuales son planteados de la siguiente manera; al superar los

valores de la relación K/Al el promedio de esta misma relación para las lutitas (0,36), se infiere un dominio de la meteorización física. Mientras que al no superar los valores promedios, se infiere la preponderancia de la meteorización química.

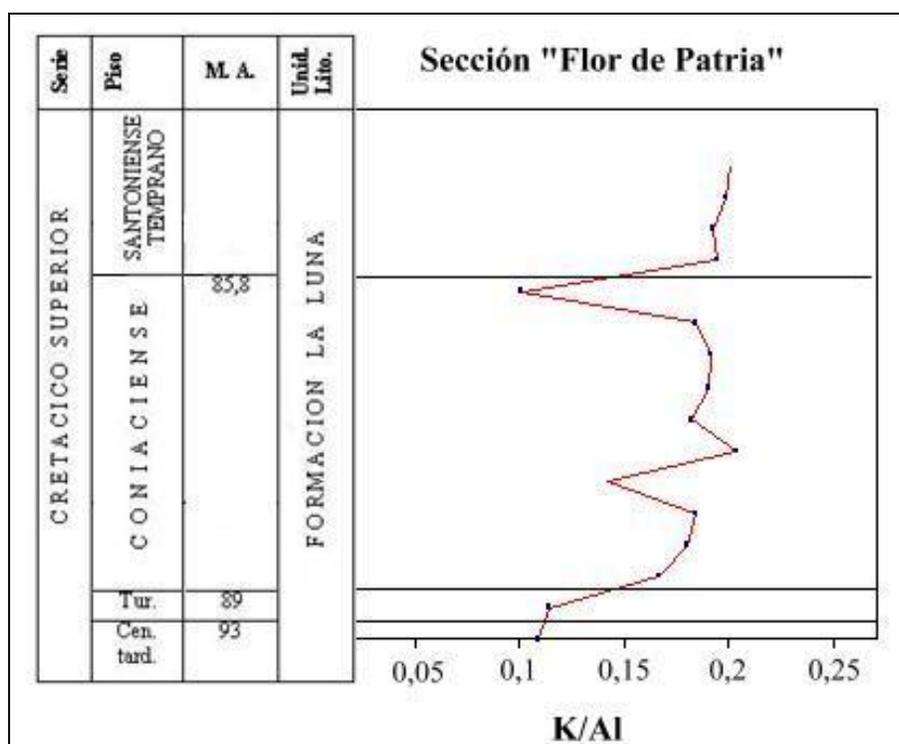


Figura 58, Gráfica de la relación K/Al para la sección de Flor de Patria.

Tomando en cuenta los valores obtenidos en la gráfica de la Figura 58, se observa como estos no sobrepasan los datos promedio, mediante esto, se puede inferir que en el área fuente la meteorización dominante fue química, lo que implica, tal como se mencionó anteriormente, que en el área fuente el clima fue cálido (Alberdi & Martínez; 1999).

Al observar el comportamiento de la gráfica K/AI para la sección de **San Pedro del Río**, se determina como esta relación no supera el valor de 0,3 siendo este menor a 0,36, planteado por Wedepohl (1971) para sedimentos finos, siendo este valor, límite entre los campos de afectación entre la meteorización física y química

Tomando en cuenta los valores presentados por la relación K/AI par la sección de San Pedro del Río (ver Figura 59), se determina, como la fuente de sedimentos está dominada por la meteorización química, lo cual implica la presencia de un clima cálido (Alberdi & Martínez; 1999).

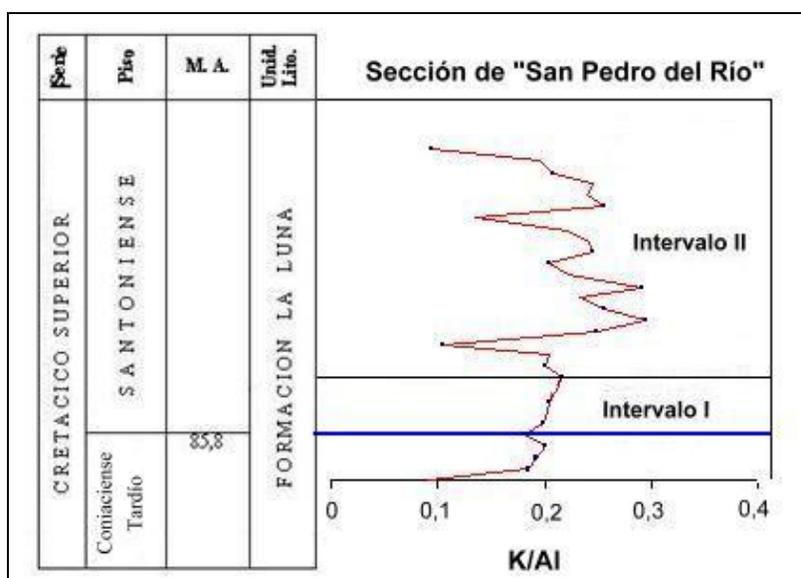


Figura 59, Gráfica de la relación K/AI para la sección de San Pedro del Río.

De forma más específica, se observa en la gráfica de la relación K/Al mostrada en la Figura 59, la existencia de dos patrones de comportamiento de ésta. El primer patrón ó **Intervalo I**, está ubicado hacia la parte baja de la sección donde se aprecian bajos valores de la relación K/Al, por lo tanto se infiere que durante este intervalo se presentaron condiciones de meteorización química más intensas a la presentada hacia el tope de la sección, esto se traduce en la existencia de un clima más cálido al que se presenta hacia el tope de la sección. El segundo patrón ó **Intervalo II**, se extiende de la parte media hacia el tope de la sección, dentro de este se reconocen valores más altos de la relación K/Al dentro de la sección (sin superar el valor límite de 0,36), por lo tanto se infiere que durante este periodo se presentó una meteorización química de menor intensidad que la presentada en el patrón anterior, por lo tanto las condiciones climáticas serán menos cálidas que las identificadas en el patrón anterior.

A parte de la relación anteriormente realizada, también se pueden establecer otro tipo de gráficos que ayuden a dilucidar el tipo de meteorización que se presentó en la roca fuente, tal como es el planteado por Alberdi & Martínez (1999), donde vinculan los logaritmos de las relaciones elementales de Al/K y Al/Si, es decir, Log (Al/K) vs. Log (Al/Si) , donde al obtener valores en el campo izquierdo se infiere la existencia de una meteorización eminentemente química, mientras que al obtener valores en el campo derecho se plantea la predominancia de una meteorización física.

En la sección de **Flor de Patria**, se observa como los valores tienden a agruparse en la parte superior izquierda de la grafica (ver Figura 60), lo que demuestra que en la mencionada sección la meteorización dominante fue química, esto no implica que en ningún momento se desligó la meteorización química de la física, es decir, que dejó de presentarse la meteorización física por la predominancia de química, sino que, debido a las condiciones climáticas presentes en el área de estudio (clima eminentemente cálido y húmedo) existió la predominancia de la meteorización química por sobre la física, la cual se presentó con menor influencia.

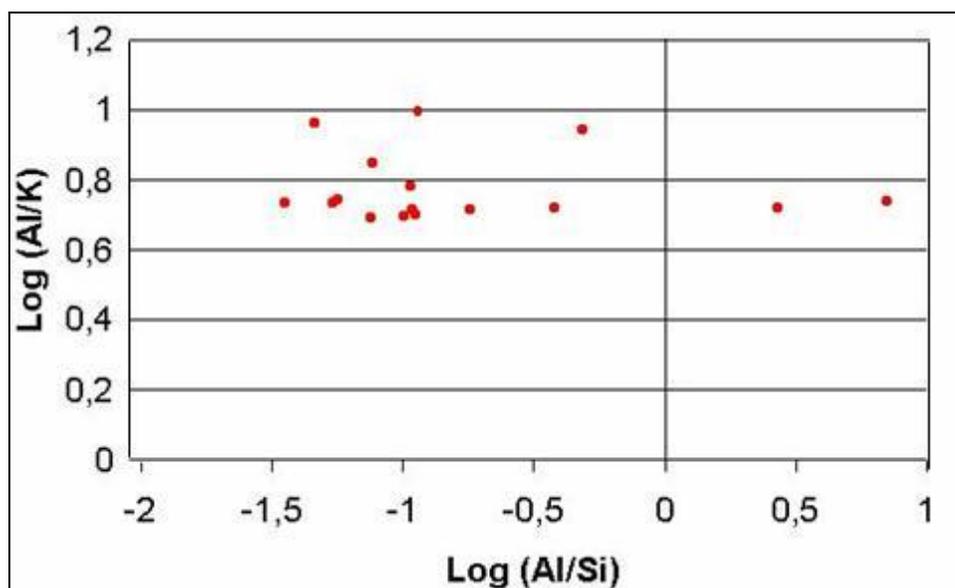


Figura 60, Gráfica Log (Al/K) vs. Log (Al/Si) para la sección de Flor de Patria.

Para la sección de **San Pedro del Río**, se observa como los valores de la gráfica Log(Al/K) vs. Log (Al/Si), tienden a agruparse hacia la parte superior izquierda de la gráfica (ver Figura 61), lo cual demuestra que en el área de

aporte de sedimentos para la sección de San Pedro del Río, al igual que en la sección de Flor de Patria, se presentaron condiciones de meteorización química dominante.

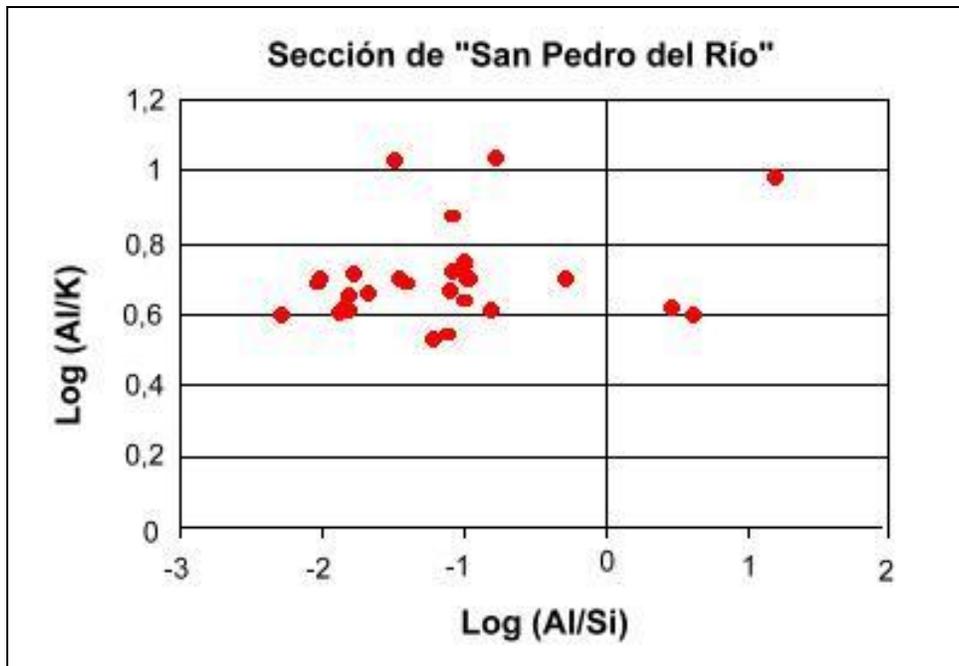


Figura 61, Gráfica de los Log (Al/Si) vs. Log (Al/K) para la sección de San Pedro del Río.

Para ambas secciones en estudio se definieron similares condiciones de meteorización del área fuente, por lo tanto, se puede establecer que debido a esto, la similitud litológica y a la proximidad geográfica de ambas secciones, al área fuente de sedimentos para las secciones de Flor de Patria y San Pedro del Río son las mismas.

INDICADORES DE CONDICIONES ANÓXICAS

El comportamiento que presentan las gráficas de ciertos elementos, tanto minoritarios como traza, los cuales son utilizados para determinar la existencia o no de condiciones anóxicas durante la depositación de los sedimentos son: níquel (Ni), vanadio (V), zinc (Zn), cromo (Cr), hierro (Fe), cobre (Cu) y rubidio (Rb), los cuales presentan variaciones de contenidos a lo largo de las secciones que representan cambios en las condiciones anóxicas.

El aumento en las concentraciones de los elementos antes nombrados implica la existencia de condiciones anóxicas, siendo este aumento consecuencia de las características biogeoquímicas del medio (Davis *et al*; 1999), entre las cuales se pueden mencionar las siguientes:

- Incorporación primaria de nutrientes o metales esenciales por los organismos (Bioacumulación).
- Adsorción de especies metálicas específicas por partículas orgánicas.
- Precipitación de iones metálicos con afinidad a facies sulfurosas en sedimentos ricos en materia orgánica.

También se ha reportado, el enriquecimiento de aguas oceánicas en iones metálicos, el aporte de rocas de origen continental, las cuales mediante procesos de meteorización y erosión son incorporados a las cuencas

oceánicas. La actividad hidrotermal es considerada como otra fuente de relativa importancia en el enriquecimiento en contenido de iones metálicos. Por lo tanto, la ocurrencia y el aumento de ciertas especies metálicas en los sedimentos son de gran ayuda para el establecimiento de condiciones ambientales, climáticas y tectónicas entre otras, que reinaron en una cuenca durante un periodo de tiempo determinado, la cual quedó reflejada en los sedimentos.

SECCIÓN DE “FLOR DE PATRIA”: con la finalidad de comprender las variaciones de las condiciones anóxicas para la sección en estudio, se han interpretado las variaciones en los contenidos de elementos tales como; Cr, Rb, Zn, Ni, Fe, V, Cu, los cuales son sensibles a variaciones en las condiciones anóxicas.

Numerosos estudios de autores como Drzewiecki & Simo (1997), han demostrado que los elementos aquí utilizados, además de otros, se concentran en lutitas depositadas bajo condiciones anóxicas.

Comportamiento similar presentan ciertos elementos sensitivos a las condiciones redox (entre los que podemos incluir el Cu, Cr, Zn y Fe), los cuales pueden ser incorporados durante la precipitación de los carbonatos. Las variaciones en los elementos sensibles a las condiciones redox, pueden reflejar variaciones en las concentraciones de oxígeno de las aguas donde se precipitaron tales elementos.

Al comparar los perfiles de los elementos sensitivos a las condiciones redox (Cr, Cu, Rb, Zn, Ni, Fe, V, mostrados en la Figura 62 y 63), se observan comportamientos muy parecidos, es decir, los perfiles de estos elementos correlacionan de forma directa y tienen una misma tendencia de aumento de sus concentraciones hacia el tope de la sección.

El primer patrón definido (**Intervalo I**) va del Cenomaniense tardío al Coniaciense tardío (ver Figuras 62 y 63) y se caracteriza por la presencia de valores bajos en el contenido de elementos allí mostrados en comparación con los promedios establecidos por Wedepohl (1971) y mostrados en la Tabla 31.

ELEMENTO	PROMEDIO (‰) SECCIÓN DE FLOR DE PATRIA	PROMEDIO (‰) ESTABLECIDO POR WEDEPOHL (1971)	VALORES NORMALIZADOS (‰)
Cu	26	45	0.58
V	280	130	2.15
Cr	23	90	0.26
Rb	6	No determinado	Indeterminado
Zn	214	95	2.25
Ni	13	68	0.19
Fe	1210	No determinado	Indeterminado

Tabla 31, Concentraciones promedio de elementos para el Intervalo I, en la sección de Flor de Patria.

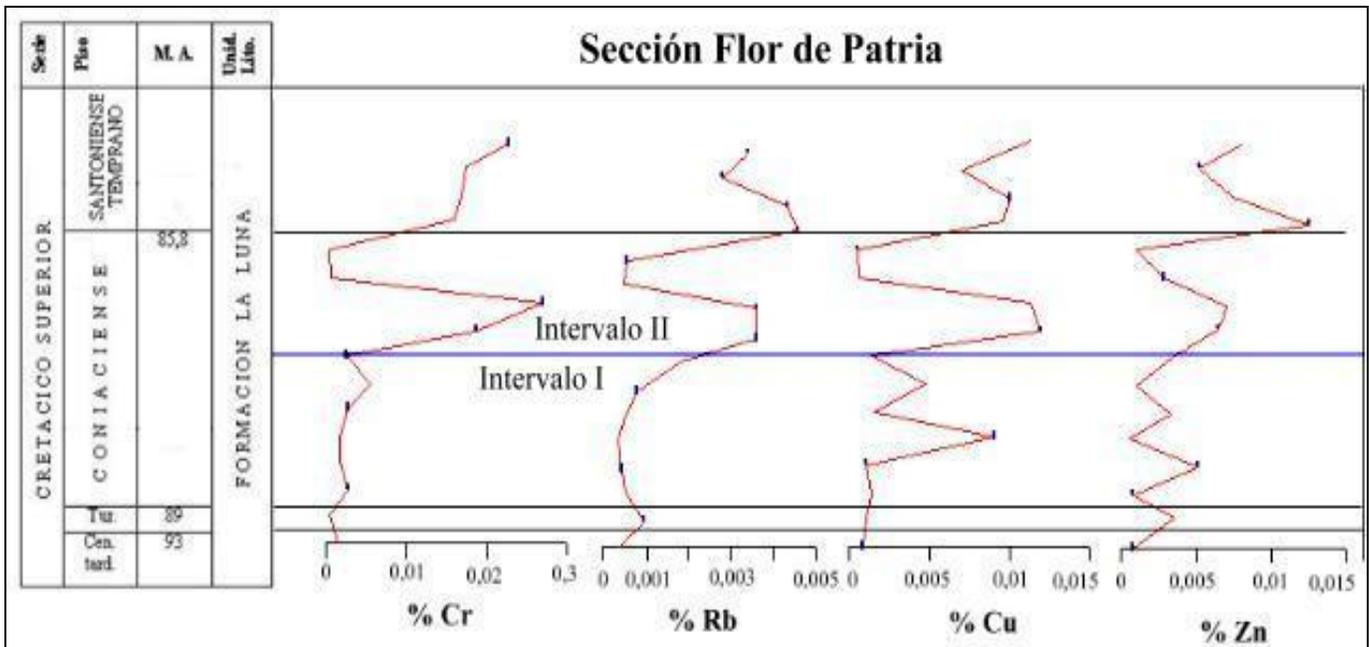


Figura 62, Gráficas del comportamiento de Cr, Rb, Cu, Zn, en la sección de Flor de Patria.

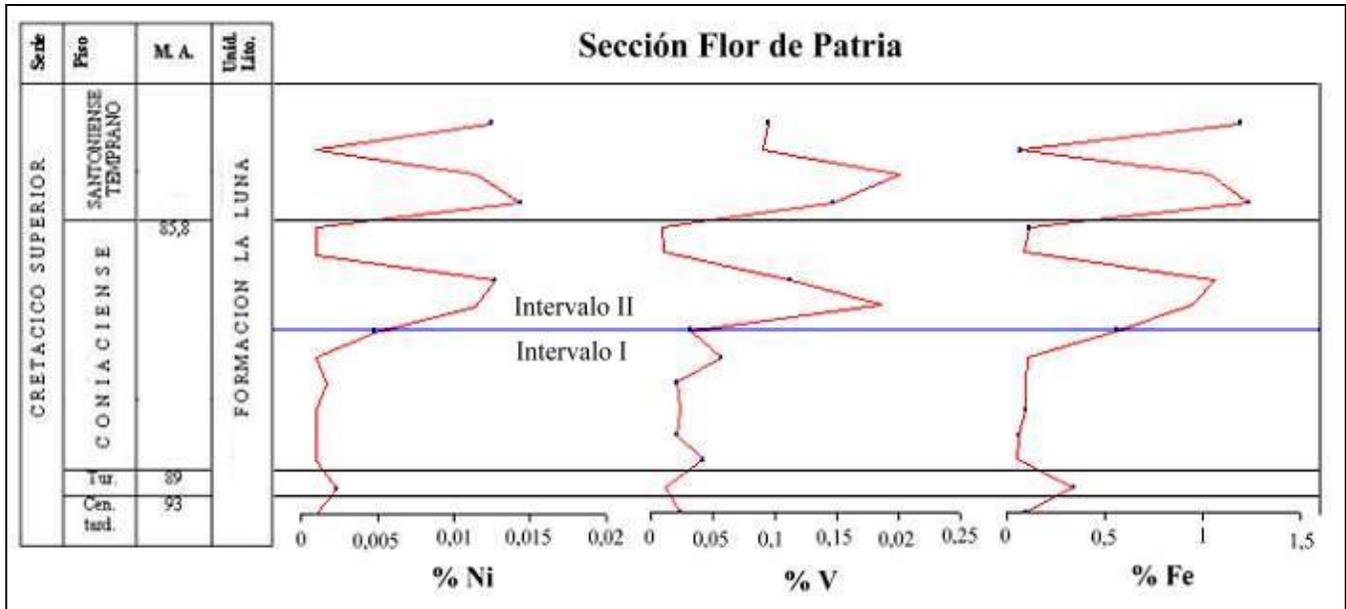


Figura 63, Gráficas del comportamiento de Ni, V y Fe en la sección de Flor de Patria.

Los patrones de comportamiento observados en las gráficas anteriores, al igual que la tabla de concentraciones promedio mostrada anteriormente (Tabla 31), demuestra una carencia en el contenido de los elementos estudiados, en comparación de las concentraciones promedio dada por Wedepohl (1971), lo cual implica que este intervalo presenta condiciones de baja anoxicidad al igual que condiciones positivas de redox.

El segundo patrón definido (**Intervalo II**) en la sección de estudio va del Coniaciense tardío al Santoniense temprano, este periodo se caracteriza por presentar valores altos en los contenidos de elementos aquí comparados.

ELEMENTOS	PROMEDIO (‰) ESTABLECIDO POR WEDEPOHL (1971)	PROMEDIO (‰) SECCIÓN DE FLOR DE PATRIA	VALORES NORMALIZADOS (‰)
Cu	45	78	1.73
Zn	95	598	6.29
V	130	1064	8.18
Cr	90	149	1.66
Rb	No determinado	23	Indeterminado
Ni	68	78	1.15
Fe	No determinado	7710	Indeterminado

Tabla 32, Concentraciones promedio de Elementos para el Intervalo II, en la sección de Flor de Patria.

Al comparar los promedios de concentraciones de elementos dados en la Tabla 32, se observa un enriquecimiento en los mencionados elementos, los cuales son sensibles a los cambios en las condiciones redox y a la anoxia.

Por lo tanto tal enriquecimiento, según lo afirmado por Davis *et al;* (1999), implica la existencia de condiciones anóxicas y valores redox negativos, lo cual significa un bajo contenido de oxígeno libre en el medio sedimentario, tales condiciones facilitan la preservación de la materia orgánica en este periodo (Coniaciense tardío – Santoniense temprano).

Desde un punto de vista más exhaustivo, a partir de los datos arrojados por las gráficas de los elementos estudiados se realiza una división de la sección de Flor de Patria en “**subunidades geoquímicas**” (Davis *et al;* 1999), las cuales se encuentran en una jerarquía menor a los dos patrones o intervalos principales anteriormente definidos y explicados.

Estas “subunidades geoquímicas” (ver Figura 64 y 65), son definidas con la finalidad de reconocer los cambios de menor envergadura y poca duración que pudieron afectar los patrones de mas amplio rango previamente establecidos.

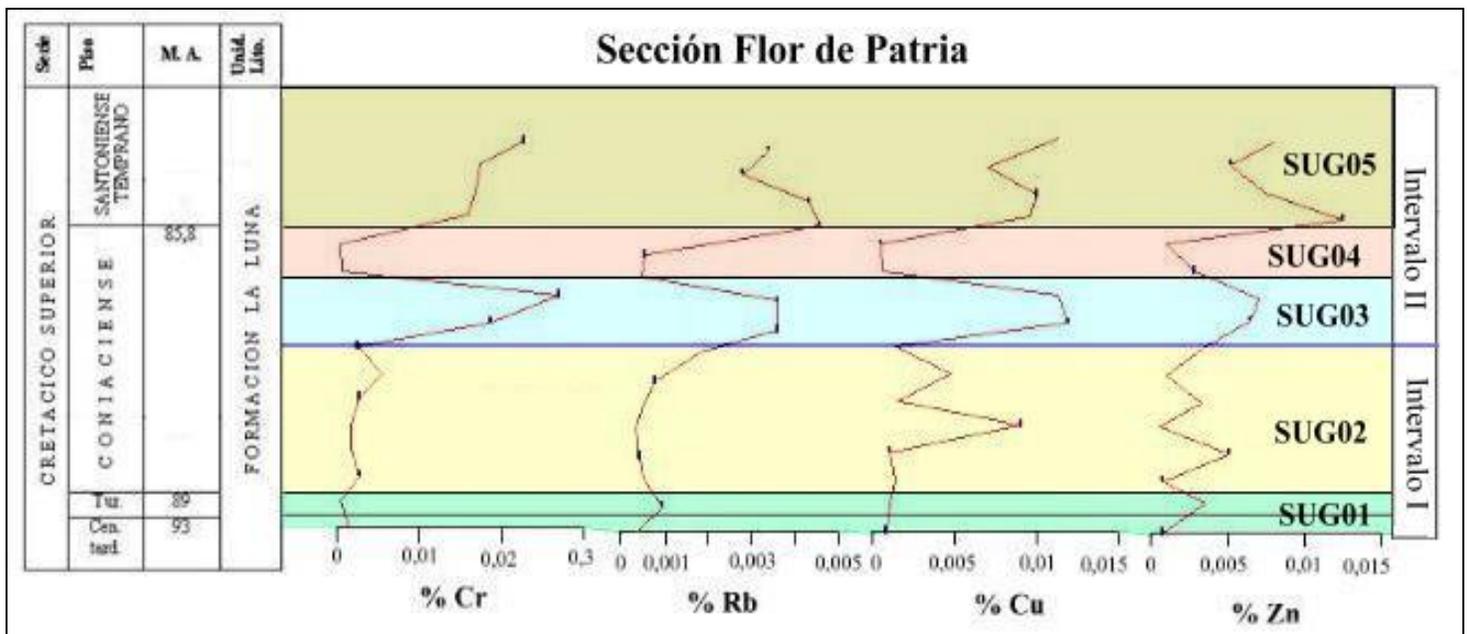


Figura 64, Gráficas de las “subunidades geoquímicas” definidas para la sección de Flor de Patria.

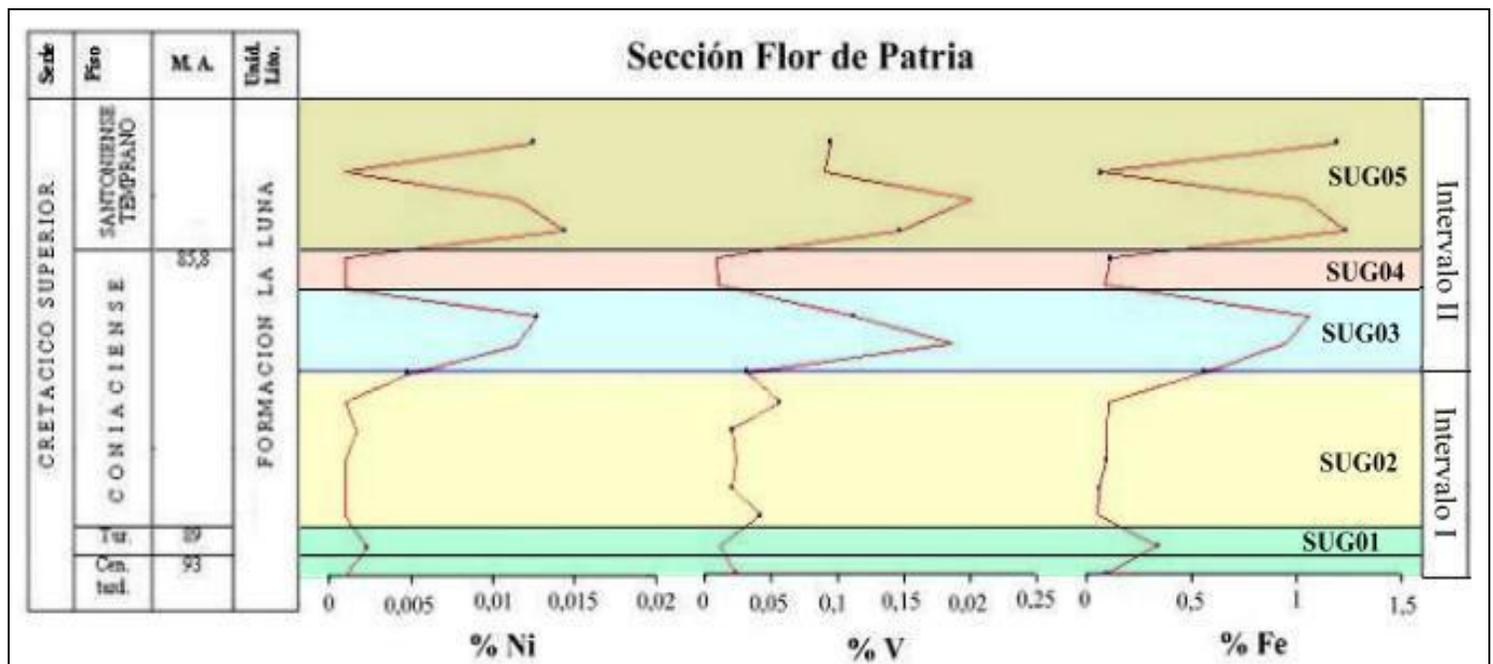


Figura 65, Gráficas de las “subunidades geoquímicas” definidas para La sección de Flor de Patria.

Las unidades “subunidades geoquímicas” definidas para la sección de Flor de Patria (ver Figura 64 y 65), tienen las siguientes características:

- **SUBUNIDAD GEOQUÍMICA 01 (SUG01):** Se encuentra ubicada en la base de la sección y se incluye dentro del primer patrón general definido (**Intervalo I**, Cenomaniense tardío – Coniaciense tardío), por lo tanto presenta valores bajos de contenido promedio de los elementos dados por Wedepohl (1971). A pesar de ello se reconoce un aumento relativo del contenido de algunas de las especies metálicas analizadas (Rb, Zn, Ni y Fe). Este aumento se presenta luego del límite Cenomaniense – Turoniense (C/T), el cual es reportado como un evento de pronunciada deficiencia de oxígeno en los océanos del mundo (Drzewiecki & Simo; 1997), lo cual generó un periodo de alta preservación de materia orgánica en zonas donde se presentaron las condiciones necesarias, a diferencia de lo que se observa en la sección de Flor de Patria, donde para este periodo (límite C/T) se reportan contenidos mínimos de COT. Este evento es reportado de forma más tardía para esta sección, y teniendo una baja repercusión en el aumento de las condiciones anóxicas de la sección, evidenciado por la baja concentración en las especies metálicas analizadas.
- **SUBUNIDAD GEOQUÍMICA 02 (SUG02):** Se encuentra ubicada dentro del primer patrón general definido (**Intervalo I**), siendo esta subunidad la

expresión típica del primer patrón descrito (**Intervalo I**), caracterizado por la existencia de valores promedio de concentración de metales por debajo del promedio establecido por Wedepohl (1971).

- **SUBUNIDAD GEOQUIMICA 03 (SUG03):** Es perteneciente al segundo patrón general definido en la sección de Flor de Patria (**Intervalo II**, Coniaciense tardío – Santoniense temprano), y esta al igual que la **Subunidad Geoquímica 05 (SUG05)** se caracteriza por presentar valores de contenido de metales promedio mayores a los establecidos por Wedepohl (1971), implicando esto la existencia de condiciones anóxicas en las aguas de la cuenca en ese periodo en específico.
- **SUBUNIDAD GEOQUÍMICA 04 (SUG04):** se encuentra ubicada dentro del segundo patrón definido (**Intervalo II**), y a diferencia de las características descritas para el segundo patrón en esta subunidad se reportan valores mínimos en el contenido de los metales analizados. Esta variación de los contenidos de las especies metálicas, puede ser debida a varios factores, entre los cuales se puede mencionar: la existencia de condiciones de oxigenación intermitentes dentro de la cuenca y la presencia de un periodo regresivo de corta duración y de afectación local. Este periodo de disminución dramática de las condiciones anóxicas debe influir de manera considerable en la

concentración de la materia orgánica para este periodo, ya que al comparar con la gráfica de COT, para este intervalo se reportan valores mínimos de contenido de COT.

Al realizar comparaciones entre elementos con características contrastantes entre sí, se pueden establecer diversas relaciones entre especies metálicas que ayuden a reconocer diversas características ambientales. Para establecer estas relaciones, es condición necesaria, comparar entre elementos que sean; uno altamente movilizable en un determinado ambiente o bajo ciertas condiciones químicas y otro que se comporte de manera químicamente inmóvil en el mismo ambiente (Alberdi & Martínez; 1997).

Para determinar variaciones en las condiciones anóxicas, generalmente son utilizadas relaciones interelementales como Fe/Mn, V/Ni, V/(V+Ni), V/Cr, etc.

El hierro (Fe) y el manganeso (Mn) comúnmente presentan altas concentraciones en la interfase de anoxia / disoxia; siendo el Fe comúnmente incorporado en los carbonatos que precipitan en condiciones anóxicas y el manganeso es muy comúnmente incorporado en sedimentos marinos en forma de óxido (Drzewiecki & Simo; 1997), entonces debido a estas características la relación Fe/Mn, es extremadamente sensitiva a cambios en las condiciones redox (Eh).

Por lo tanto esta relación es consistente con lo interpretado anteriormente a partir de otros elementos. Presentándose una correlación directa entre la gráfica de Fe/Mn (ver Figura 66) y las demás gráficas utilizadas para determinar las variaciones de las condiciones anóxicas a lo largo de la sección, pudiéndose inclusive notar cambios de menor envergadura en las condiciones anóxicas, los cuales son reportadas en las subunidades geoquímicas anteriormente definidas.

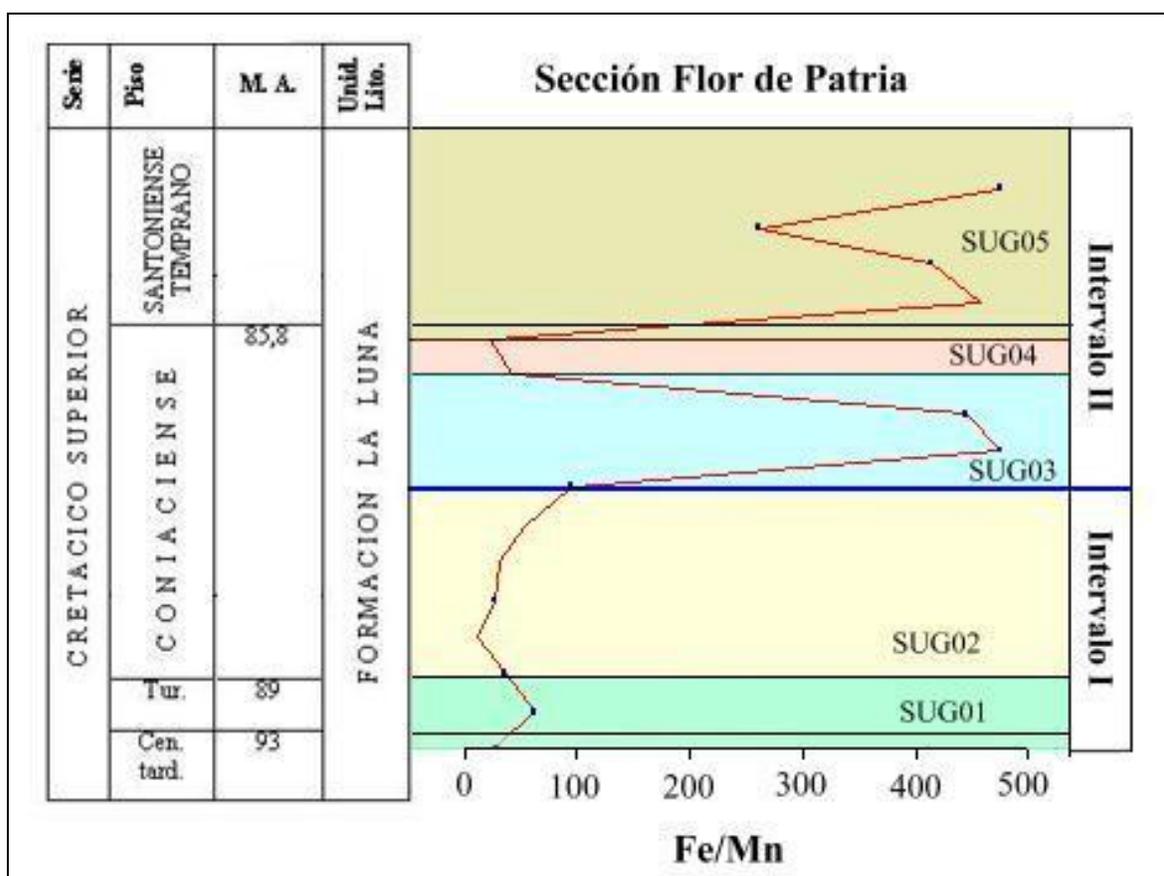


Figura 66; Gráfica de la relación Fe/Mn para la sección de Flor de Patria.

Hacia la base correspondiente a la **SUG01**, la gráfica de la Figura 66, muestra un pequeño aumento de la relación Fe/Mn posterior al límite Cenomaniense – Turoniense (C/T), el cual está ubicado dentro del **Intervalo I**, el cual se caracteriza por presentar baja anoxicidad.

Hacia el tope de la sección se reconoce el **Intervalo II**, que se caracteriza por presentar condiciones anóxicas, aunque dentro de este mismo intervalo en la **SUG04**, hay una disminución crítica y repentina de los valores de la relación Fe/Mn, lo cual implica un fuerte cambio hacia condiciones más oxigenadas, esta inflexión de la gráfica se ha reportado para las demás gráficas analizadas, implicando esto, cambios cíclicos y de corta duración de las condiciones ambientales.

Otra de las relaciones ampliamente utilizadas para dar indicios de anoxia es $V/(V+Ni)$, la cual es utilizada en distintos trabajos (Alberdi & Martínez; 1997, Mongenot *et al*; 1996, Davis *et al*; 1999, entre otros), como un aproximado muy directo a uno de los atributos químicos de gran importancia utilizado para determinar el rol de la anoxia en una sección, el cual es conocido como el Índice de Pirritización (DOP, por sus siglas en inglés).

El DOP es una medida del grado o nivel de anoxia alcanzado por un sedimento y se mide a través de la cantidad de pirita que pudo formarse, conociendo el hierro disponible. El DOP se calcula mediante la relación:

$$\text{DOP} = \frac{[\text{Fe}_p]}{[\text{Fe}_p] + [\text{Fe}_r]} \quad \begin{array}{l} [\text{Fe}_p] = \text{Hierro Pirítico} \\ [\text{Fe}_r] = \text{Hierro Reactivo} \end{array}$$

Figura 67, Fórmula para el cálculo del índice de piritización (DOP), tomada de Alberdi & Martínez; 1997.

Siendo el hierro reactivo aquel que es extraíble con ácido clorhídrico diluido y correspondiente esencialmente al hierro siderita, mientras que el hierro pirítico solo es extraíble con ácido nítrico concentrado, capaz de destruir por oxidación la estructura de la pirita.

A partir de la relación mostrada en la Figura 67, se obtendrá un perfil muy parecido al obtenido mediante la reacción matemática $V/(V+Ni)$. El mencionado perfil (ver Figura 68), se comporta de manera muy similar a las gráficas anteriormente estudiadas, coincidiendo los intervalos de mayores valores de COT y condiciones de mayor anoxia con los valores más altos de los índices de piritización, obtenidos mediante la relación $V/(V+Ni)$.

De igual manera en el trabajo de Davis *et al*; (1999) se interpreta, que cambios menores en los valores de la relación $V/(V+Ni)$, son debidos a cambios en el grado de estratificación en la columna de agua, los cuales tienen influencia directa sobre la anoxia durante la depositación.

Por lo tanto los intervalos que presentan valores menores de la relación $V/(V+Ni)$, coincidirán con periodos de menor estratificación de la columna de agua, que producirá condiciones de menor anoxia, generando esto como consecuencia intervalos de menor contenido de COT.

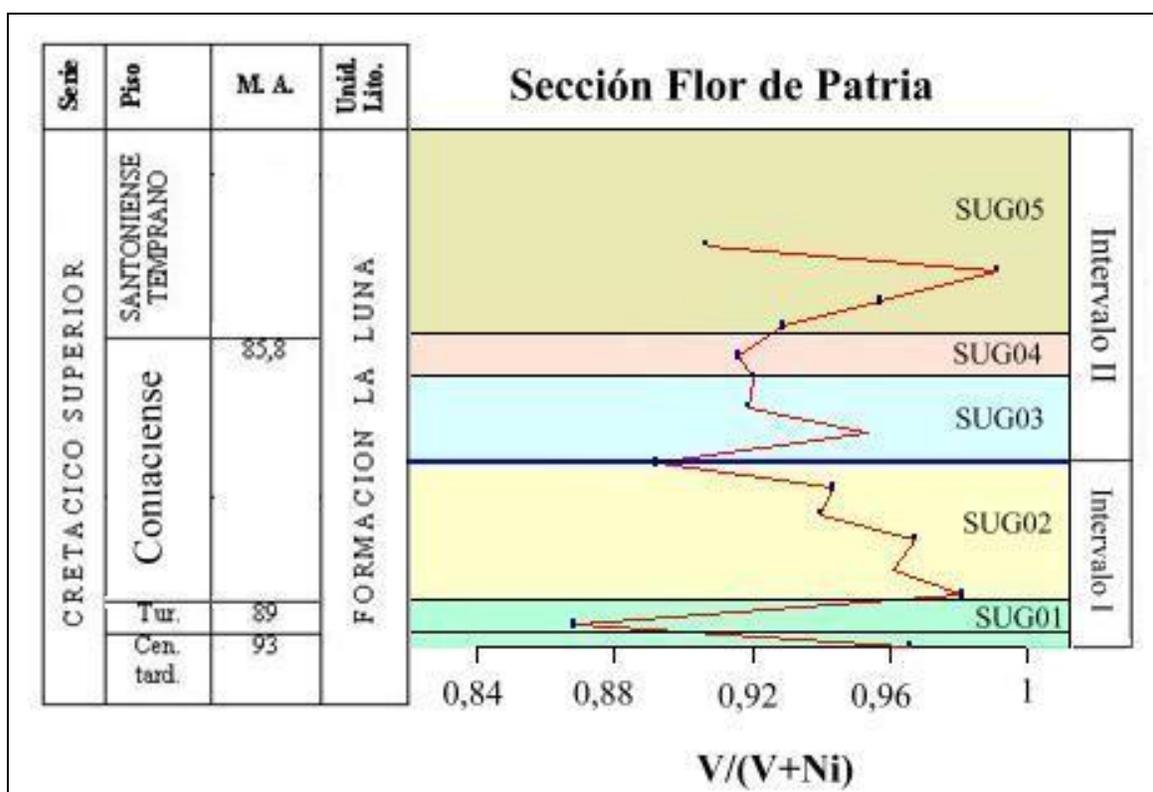


Figura 68, Gráfica de la relación $V/(V+Ni)$ para la sección de Flor de Patria.

En la gráfica de la Figura 68, se observa como en esta relación establecida para identificar el grado de piritización a lo largo de la sección, se pueden reconocer, los dos intervalos anteriormente descritos, al igual que la subunidades geoquímicas anteriormente definidas.

Por lo tanto, al poder reconocer todas estas divisiones en las distintitas gráficas, realizadas para establecer variaciones en las condiciones geoquímicas en la sección, se puede establecer con facilidad que cada uno de estos intervalos corresponde con una condición ambiental y geoquímica definida.

SECCIÓN DE “SAN PEDRO DEL RÍO”: al igual que en la sección anterior, se utilizaron los mismos elementos (Fe, Zn, Ni, V, Cu, Rb, entre otros), para poder interpretar las variaciones de las condiciones anóxicas en la sección de San Pedro del Río, los cuales son sensibles a las variaciones de las condiciones redox y abundantes en sedimentos ricos en materia orgánica, reflejando de esta forma el contenido de oxígeno en el fondo de la cuenca.

Comparando el contenido de los elementos mostrados en las Figura 69 y 70, se observa una buena correlación entre ellos, presentando todos estos elementos un comportamiento muy parecido.

De acuerdo a lo mostrados en las Figuras 69 y 70, se han podido reconocer dos patrones o intervalos principales, los cuales servirán para describir las variaciones en las condiciones anóxicas existentes al momento de la depositación de los sedimentos.

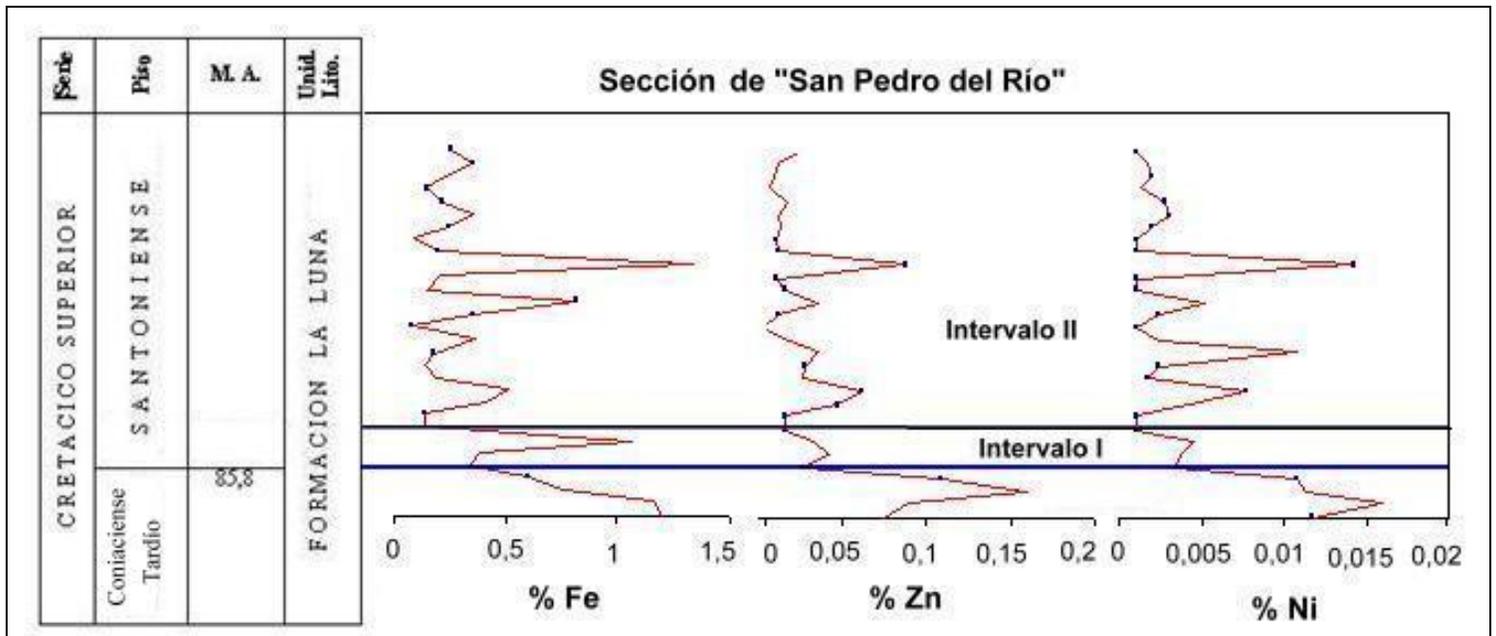


Figura 69, Comportamiento de las gráficas de %Fe, %Zn y %Ni para la sección de San Pedro del Río.

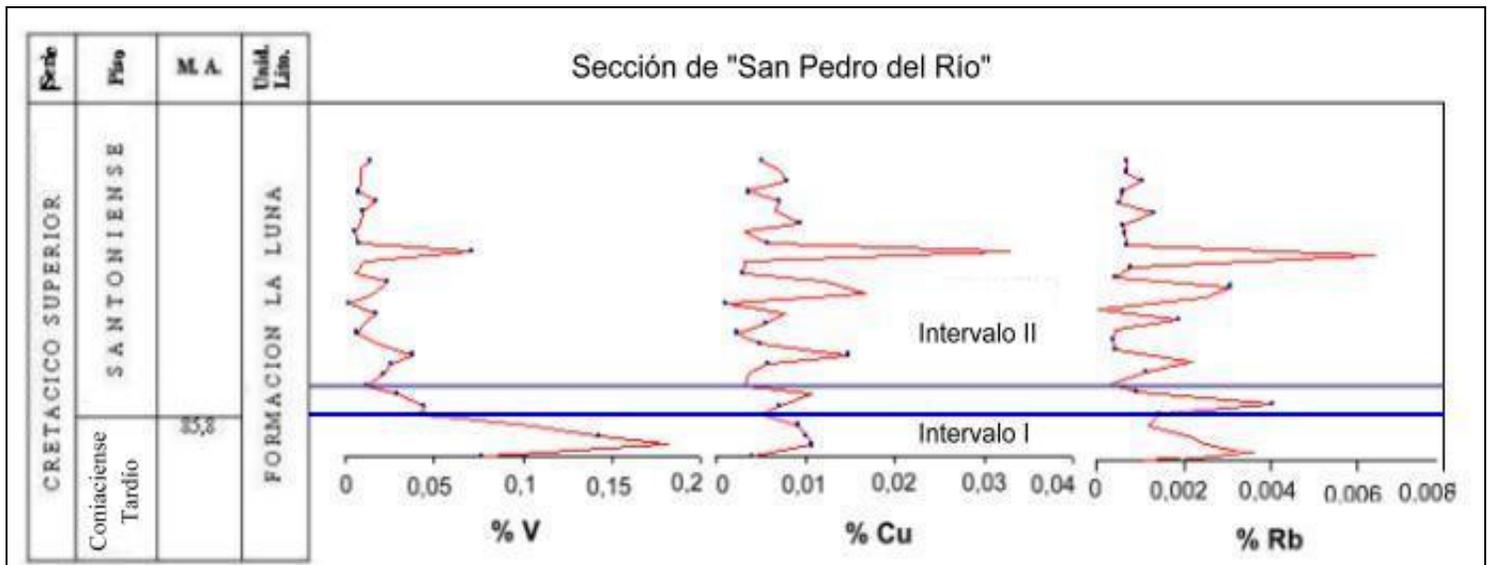


Figura 70, Comportamiento de las gráficas de % V, % Cu, y % Rb para la sección de San Pedro del Río.

El **Intervalo I** (Coniaciense tardío – Santoniense temprano), que se encuentra ubicado en la base de la sección, presenta valores altos de concentraciones de elementos sensitivos a cambios en las condiciones anóxicas y redox en comparación del estándar planteado por Wedepohl (1971), tal como se muestra en la Tabla 33.

ELEMENTO	PROMEDIO (‰) SECCIÓN DE “SAN PEDRO DEL RÍO”	PROMEDIO (‰) ESTABLECIDO POR WEDEPOHL (1971)	VALORES NORMALIZADOS (‰)
Cu	52	45	1.16
V	790	130	6.08
Cr	604	90	6.71
Rb	22	No Determinado	Indeterminado
Zn	690	95	7.26
Ni	78	68	1.15
Fe	7090	No Determinado	Indeterminado

Tabla 33, Concentraciones promedio de elementos para el Intervalo I, en la sección de San Pedro del Río.

Al comparar los promedios de contenido de los elementos analizados con los promedios establecidos por Wedepohl (1971), mostrado en la Tabla 33, se determina que las muestras de la sección de San Pedro del Río, en el **Intervalo I** (Coniaciense tardío – Santoniense temprano), presentan un enriquecimiento en el contenido de los elementos allí mostrados, los cuales según diversos autores, son sensibles a cambios en las condiciones redox y anoxia, en un medio sedimentario, por lo tanto debido a tal enriquecimiento, se puede afirmar que durante este intervalo la depositación de los sedimentos se realizó bajo condiciones de bajo contenido de oxígeno, Mongenot *et al*; (1996), la baja

oxigenación del medio permitió la preservación de la materia orgánica que fue aportada a la cuenca.

El **Intervalo II** (Santoniense temprano – Santoniense tardío), ocupa de la parte media hasta el tope de la sección, este intervalo se caracteriza por presentar una mayor variabilidad en los contenidos de los elementos analizados, intercalándose valores relativamente altos (menores a los reportados en el **Intervalo I**) con valores mínimos de contenido de estas especies metálicas.

Al comparar los promedios de algunos de estos elementos con el estándar planteado para las lutitas planteado por Wedepohl (1971), mostrado en la Tabla 34, se observa como las muestras de la sección de San Pedro del Río en este segundo intervalo, presentan contenidos muy próximos y en algunos casos menores a lo propuestos en este estándar.

ELEMENTO	PROMEDIO (‰) SECCIÓN DE "SAN PEDRO DEL RÍO"	PROMEDIO (‰) ESTABLECIDO POR WEDEPOHL (1971)	VALORES NORMALIZADOS (‰)
Cu	16	45	0.36
V	160	130	1.23
Cr	76	90	0.84
Rb	13	No Determinado	Indeterminado
Zn	230	95	2.42
Ni	76	68	1.12
Fe	3194	No Determinado	Indeterminado

Tabla 34, Concentraciones promedio de elementos para el Intervalo II, en la sección de San Pedro del Río.

La proximidad en los valores mostrados en la Tabla 34, indica que durante el **Intervalo II**, se presentaron condiciones de buena oxigenación en la cuenca, la cual no permitió una alta depositación de estos elementos, los cuales son abundantes en sedimentos depositados bajo condiciones anóxicas.

Comparando los valores de contenido promedio de los elementos aquí analizados para cada una de los intervalos definidos (ver Tabla 34), se observa una carencia en el contenido de estos elementos durante el **Intervalo II**. Esta carencia implica una disminución significativa de las condiciones anóxicas dentro del **Intervalo II**, en comparación con las presentadas en el **Intervalo I**.

ELEMENTO	CONTENIDO (‰) PROMEDIO EN EL INTERVALO I	CONTENIDO (‰) PROMEDIO EN EL INTERVALO II
Cu	52	16
V	790	160
Cr	604	76
Rb	22	13
Zn	690	23
Ni	78	76
Fe	7090	3194

Tabla 35, Comparación de los contenidos promedio de elementos para los intervalos definidos en la sección de San Pedro del Río

Debido a la variabilidad de los contenidos de los elementos estudiados (V, Ni, Fe, Zn, Cu, Rb, Cr) en las muestras analizadas es necesario establecer diversas subdivisiones (subunidades geoquímicas) de los intervalos anteriormente descritos, los cuales son una respuesta directa a cambios

ambientales de de menor envergadura y poca duración que se dieron dentro de la cuenca.

La sección de San Pedro del Río ha sido dividida en siete (07) subunidades con características específicas (ver Figuras 71 y 72).

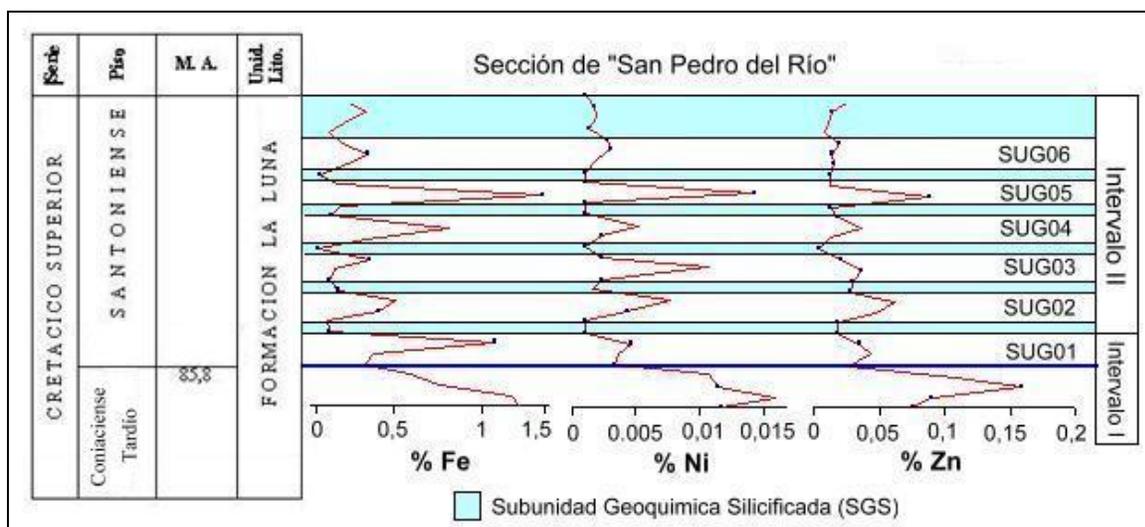


Figura 71, Gráfica de las "subunidades geoquímicas" definidas para la sección de San Pedro del Río.

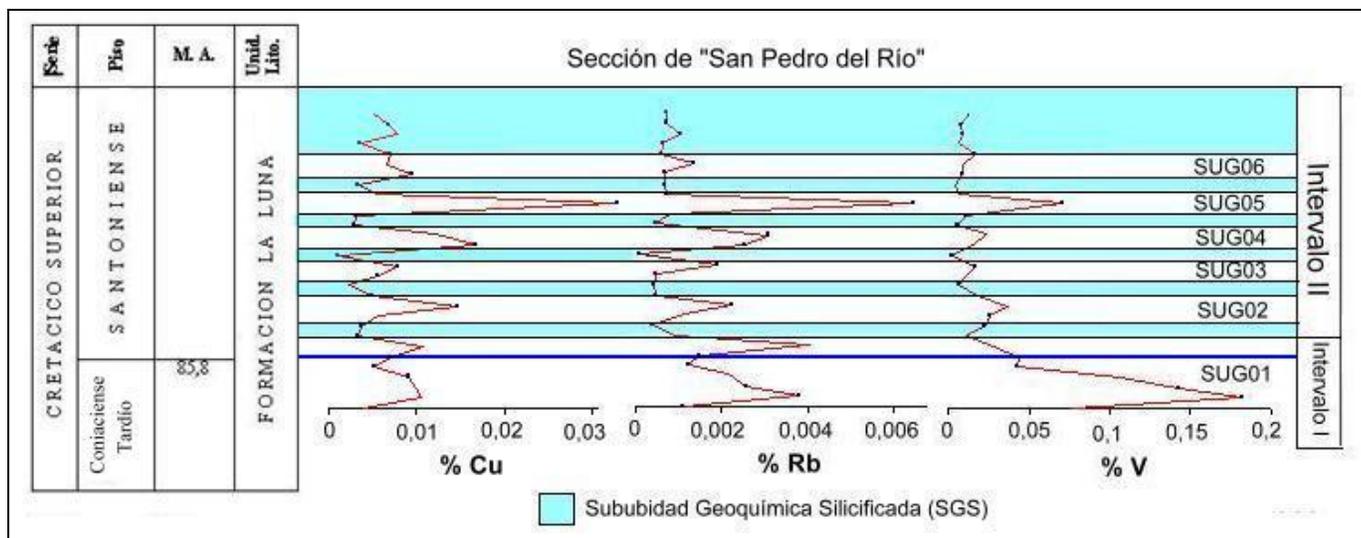


Figura 72, Gráfica de la "subunidades geoquímicas" definidas para la sección de San Pedro del Río.

La **Subunidad Geoquímica 01 (SUG01)**, se encuentra ubicada hacia la base de la sección y abarca todo el primer intervalo, por lo tanto esta se va a caracterizar por presentar valores considerablemente altos de las variedades metálicas aquí analizadas, ubicándose por encima de los valores promedio establecidos por Wedepohl (1971). El aumento del contenido general de elementos dentro de esta subunidad, implica la presencia de condiciones anóxicas a lo largo de esta subunidad.

La **Subunidad Geoquímica 02 (SUG02)**, presenta valores de contenido de elementos ligeramente más altos a los estándares de comparación planteados por Vine & Tourtelot (1970) y Wedepohl (1971), sin llegar a registrar valores tan altos como los reportados para la **SUG01**. Al igual que esta subunidad, dentro de la sección se presentan otras subunidades como son la **SUG03** y **SUG05**, las cuales registran contenidos de elementos parecidos a los analizados en la **SUG02**, por lo tanto, estas presentaran condiciones cada vez menos intensas de anoxia, de allí que durante estos periodos se registren los menores valores de COT debido a una presencia cada vez más abundante de oxígeno libre en el fondo de la cuenca.

Cabe resaltar que dentro de la **SUG05**, se presentan los valores más altos de en los contenidos de elementos sensitivos a las condiciones redox dentro del segundo intervalo, llegando a concentraciones muy próximas a las presentadas en el intervalo anterior, por lo tanto se identifica un aumento de las condiciones

anóxicas durante este corto periodo, este cambio de la tendencia en el intervalo puede ser producto de pulsos en la transgresión ocurrida durante el Cretácico.

Las **SUG04** y **SUG06**, ubicadas dentro del segundo intervalo, presenta valores mínimos en los contenidos de los elementos sensibles a las variaciones de las condiciones anóxicas, siendo estas incluso más bajas que los valores propuestos por Vine & Tourtelot (1970), por lo tanto estos dos intervalos (**SUG04** y **SUG06**), presenta las condiciones de menor anoxicidad dentro de toda la sección.

Cada una de las subunidades aquí descritas, se encuentran separadas entre sí por pequeños intervalos, donde las muestras están diagenéticamente alteradas producto de procesos de silicificación extensiva (Dos Santos & Soto; Inédito), estos intervalos son denominados como “**subunidad geoquímica silicificada**” (**SGS**), esta subunidad tiene una presencia cíclica dentro del **Intervalo II** de la sección y dentro de esta se perciben altos valores de silicio (Si) y muy bajas concentraciones de especies metálicas.

Al realizar la relación Fe/Mn se pueden reconocer variaciones en las condiciones redox de la sección.

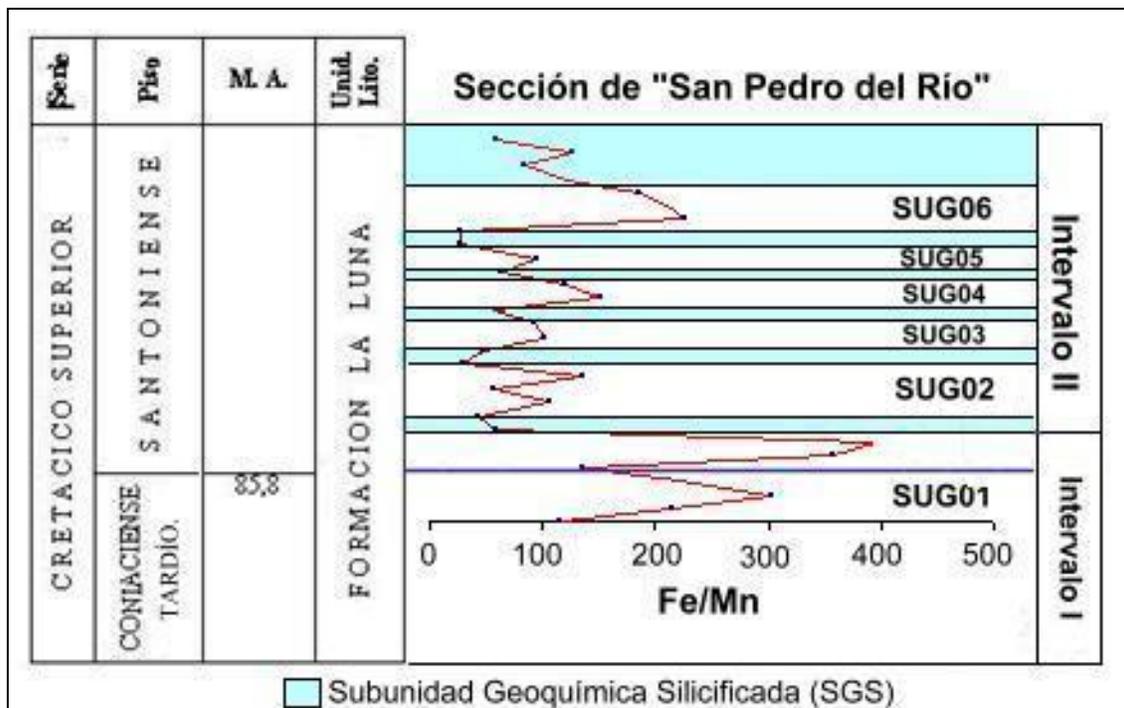


Figura 73, Gráfica de la relación Fe/Mn para la sección de San Pedro del Río.

A partir de esta representación gráfica mostrada en la Figura 73, se pueden reconocer con facilidad los dos intervalos anteriormente definidos, siendo el **Intervalo I**, el que presenta los mayores valores, demostrando por lo tanto escasez de oxígeno durante este intervalo (Drezewiecki & Simo; 1997), mientras que el **Intervalo II** contiene los valores más bajos de la relación Fe/Mn, lo cual implica menores condiciones anóxicas que las presentadas durante el intervalo anterior (mayor contenido de oxígeno). Dentro del **Intervalo II** se pueden reconocer con facilidad la subunidades anteriormente descritas, allí se aprecia la tendencia de aumento del contenido de oxígeno hacia el tope de

la sección, al igual que la **SGS**, las cuales muestran un aumento dramático del contenido de oxígeno en la cuenca.

Otra de las relaciones elementales utilizadas es $V/(V+Ni)$, la cual es una aproximación muy cercana al Índice de Piritización (DOP), la cual es una medida del grado de anoxia alcanzado en una sección.

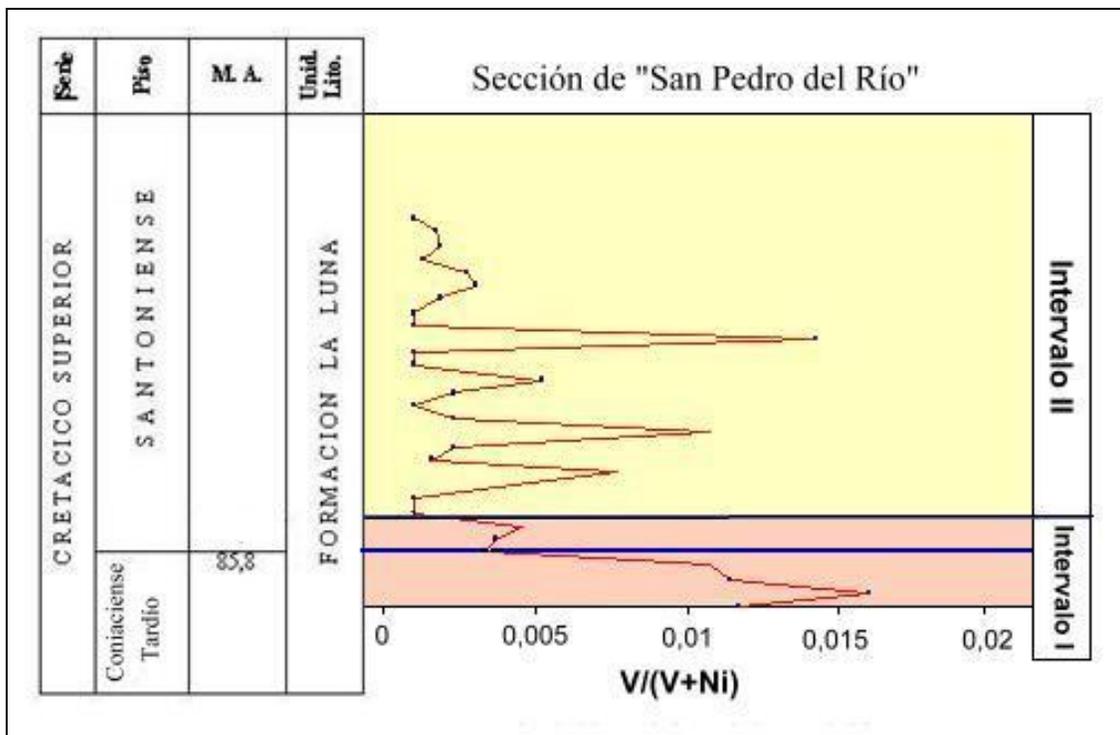


Figura 74, Gráfica de la relación $V/(V+Ni)$ para la sección de San Pedro del Río.

Al observar la gráfica de la relación $V/(V+Ni)$ mostrada en la Figura 74, se observa una buena correlación con los perfiles de los elementos utilizados anteriormente, donde se pueden reconocer los dos intervalos definidos, los

cuales se caracterizan por presentar condiciones de alta anoxia (**Intervalo I**), intercalado con otro de bajas condiciones anóxicas (**Intervalo II**), en esta gráfica se puede reconocer las subunidades geoquímicas las cuales están separadas entre sí por periodos de baja relación $V/(V+Ni)$, estos periodos coinciden con la **subunidad geoquímica silicificada (SGS)**, la cual tiene se presenta de manera cíclica dentro de la sección, lo cual indica periodos cortos y cíclicos de muy baja anoxia.

INDICADORES DE APORTE CLÁSTICO

En base al origen presentan las rocas, estas se han diferenciado en dos grandes grupos, los cuales son; rocas de origen clástico y rocas carbonáticas. Siendo estas últimas las que se originan, mediante procesos de precipitación de ciertos componentes químicos. Mientras que las rocas clásticas se generan mediante la depositación de sedimentos que se han generado en otras áreas.

Antes de dar inicio a cualquier disertación acerca del aporte clástico, es de gran ayuda establecer de forma sintetizada, lo que implica tal término.

Se conoce como aporte clástico, a los sedimentos que se originan mediante procesos de meteorización o desgaste de rocas denominadas fuentes, los cuales producirán un conjunto de detritos de características químicas de gran semejanza a la de las rocas de donde provienen, los cuales serán trasportados

mediante procesos de erosión, en donde tales detritos presentaran variaciones tanto físicas como químicas (siempre existiendo vestigios acerca de su origen), hasta ser depositados en una cuenca, y mediante otros procesos (litificación y diagénesis) son transformados en rocas sedimentaria clásticas. (González, F., 1982).

La influencia del aporte clástico en los sedimentos que conforman las rocas estudiadas, es de gran importancia, ya que mediante estos se puede tener una idea aproximada acerca del tipo de sedimentación existente, al igual que el tipo de clima en el área.

El comportamiento que presentan ciertos elementos (que según sus proporciones son trazas, minoritarios y mayoritarios), son utilizados para determinar el grado de influencia que tuvo el aporte clástico sobre la sedimentación de las rocas estudiadas.

Los elementos que son utilizados con esta finalidad, se caracterizan por estar presentes en asociaciones minerales que existen en las áreas fuentes, y mediante el aumento de su contenido en las rocas en estudio se puede inferir con gran facilidad un aumento de aporte clástico a la cuenca.

SECCIÓN DE “FLOR DE PATRIA”: Al comparar el contenido reportado de elementos como silicio (Si), sodio (Na), aluminio (Al), carbonato de calcio (CaCO_3) y carbono orgánico total (COT), en la sección, se observa que se encuentran en mayor proporción que otras especies químicas y otras relaciones geoquímicas.

Para la gran mayoría de las muestras analizadas en esta sección se observa que la relación Si/Al (Figura 75), supera el valor promedio mínimo de 3,5 establecido por Wedepohl (1971), lo que indica que el Al y el Si que son los elementos de origen terrígeno, de mayor importancia en el aporte sedimentario dentro de la sección estudiada.

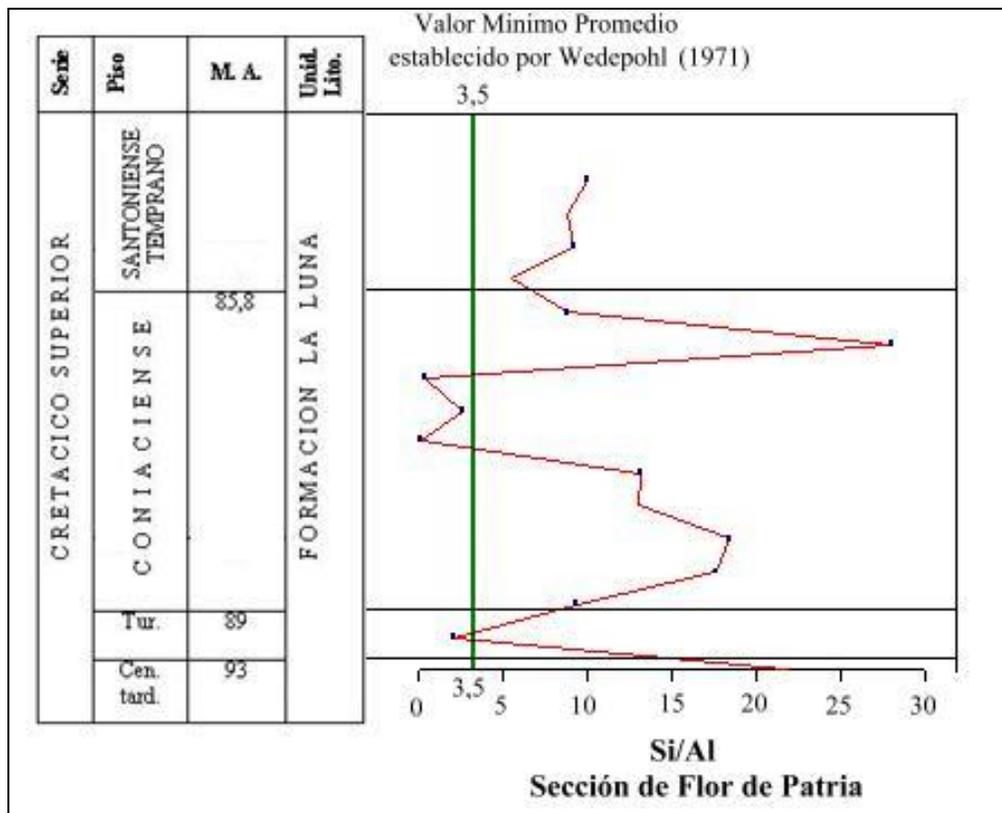


Figura 75, Gráfica de la relación Si/Al en la sección de Flor de Patria.

Al comparar las concentraciones obtenidas de elementos como: Al, Si, Na, Ti, K, etc., se observa como para cada uno de estos elementos se puede definir dos patrones dominantes dentro de la sección en estudio, los cuales indican características propias de la sección acerca de los principales aportes sedimentarios dentro de la sección de Flor de Patria.

La primera tendencia definida (**Intervalo I**), se caracteriza por presentar valores bajos de los elementos anteriormente mencionados (Al, Si, Na, K, Ti y Ca), tal como se observa en la Figuras 76 y 77, esto indica un mínimo en el aporte de

sedimentos de origen terrígeno en este intervalo, el cual se extiende del Cenomaniense tardío al Coniaciense tardío.

El segundo patrón (**Intervalo II**) va del Coniaciense tardío al Santoniense temprano y se caracteriza por presentar valores máximos en los elementos aquí comparados (ver Figuras 76 y 77).

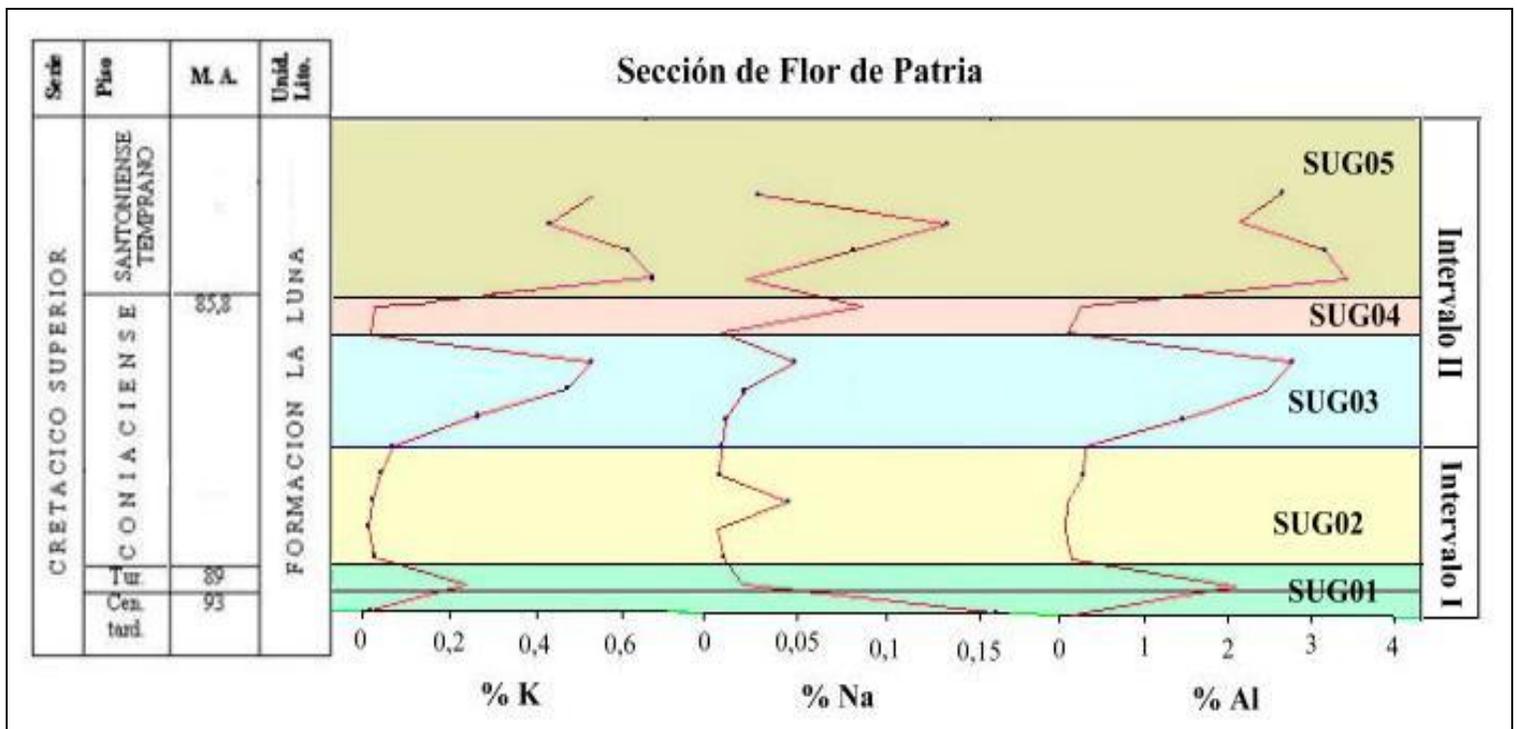


Figura 76, Gráfica del comportamiento del K, Na y Al para la sección de Flor de Patria.

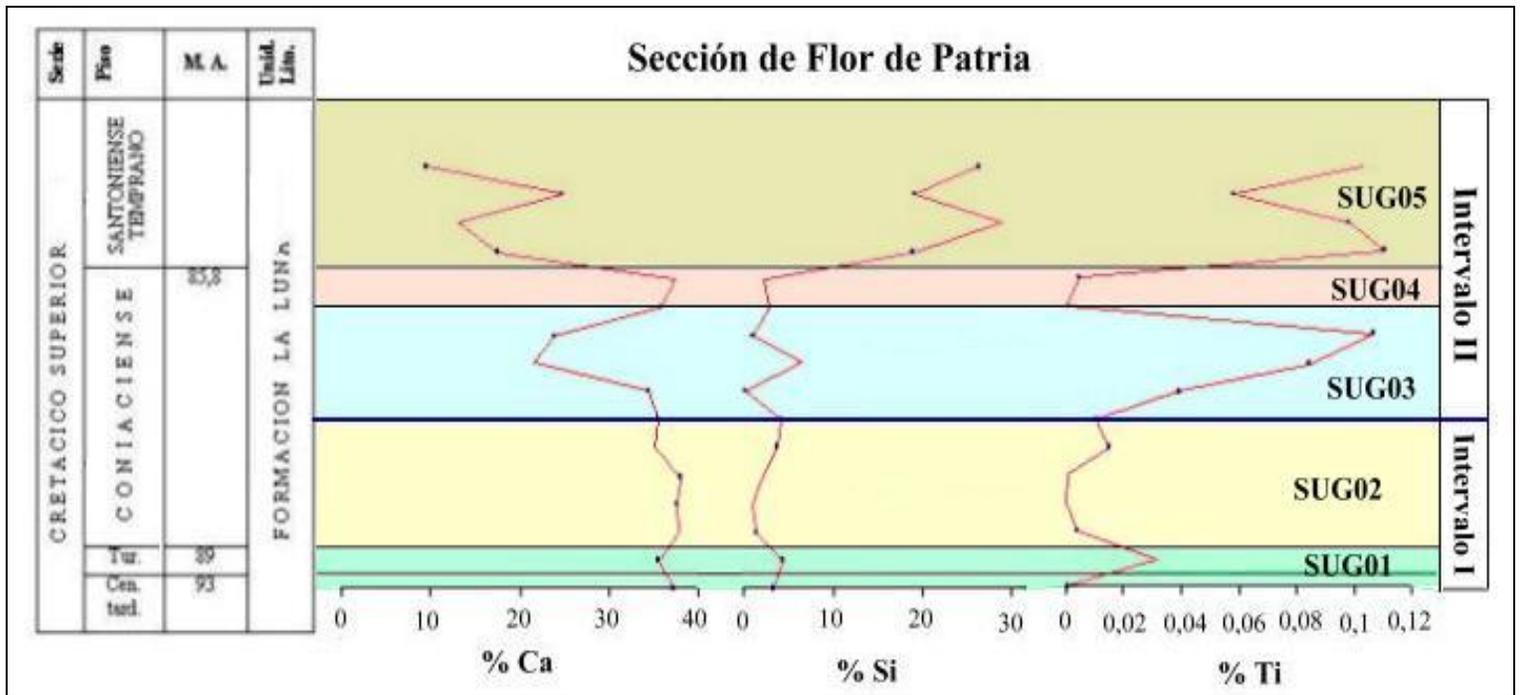


Figura 77, Gráfica del comportamiento del Ca, Si y Ti en la sección de Flor de Patria

De forma general las tendencias anteriormente definidas corresponden de forma directa con los intervalos establecidos para describir las condiciones anóxicas en la misma sección, al igual que con las subunidades geoquímicas anteriormente definidas. Lo cual al establecer una rápida inspección visual, correlaciona de forma directa entre sí, es decir, los intervalos de mayores condiciones anóxicas coinciden con intervalos de mayor aporte terrígeno.

De forma específica se observa como hacia la base de la sección se presenta una relación inversa, como es esperado entre los indicadores del aporte clástico y los indicadores de las condiciones anóxicas de la sección. Ya que en la **SUG01**, se observa como las condiciones anóxicas fueron de menor intensidad,

mientras que el aporte clástico fue máximo provocando de esta manera una menor preservación de la materia orgánica (Erlich *et al*; 2000).

Mientras que en la **SUG02** (ver Figura 78), donde los valores mínimos de aporte clástico coinciden con valores relativamente altos de contenido de COT (correspondientes al intervalo de regular potencial generador de hidrocarburos propuesto por Peters K. E.; 1986, en la Tabla 24).

Debido a las relación anteriormente determinada y de acuerdo a lo establecido por Erlich *et al* (2000) y lo determinado mediante los análisis isotópicos de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^{13}\text{C}$, se interpreta como para el **Intervalo I** que va del Cenomaniense tardío al Coniaciense tardío, se presenta un clima cálido de poca evaporación, produciendo esto relativamente baja humedad y baja salinidad de las aguas de la cuenca, provocando de esta manera una baja concentración de materia orgánica. (ver Figura 78).

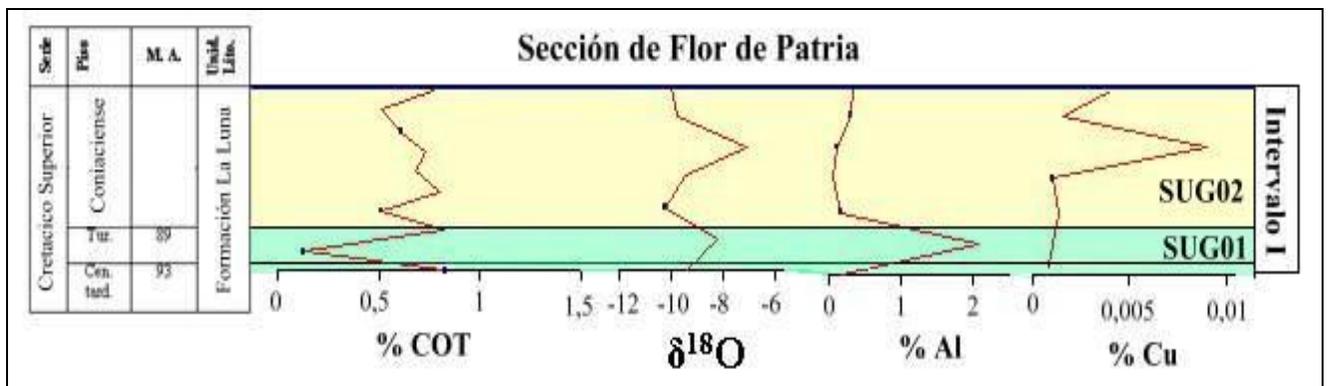


Figura 78, Comparación entre indicadores de condiciones anóxicas y aporte clástico para la sección de Flor de Patria.

Para el **Intervalo II** (Coniaciense tardío – Santoniense temprano), se determinó como las condiciones anóxicas se intensifican en la sección en estudio, coincidiendo esto, con las mayores concentraciones de clásticos para la misma sección.

El aumento del aporte clástico dentro del **Intervalo II** (Coniaciense tardío – Santoniense temprano) puede ser generado por varios factores, entre los cuales se puede mencionar: cambios en la fuente detrítica, debido a la influencia de una segunda fuente de aporte clástica, o también, la reactivación de una mayor actividad erosiva producida por cambios climáticos relevantes en las áreas fuente, siendo esta última, la hipótesis más acertada para explicar los cambios anteriormente mencionados, ya que al correlacionar los perfiles de Fe, Ti y Al en la Figura 79, se observa un comportamiento similar entre mencionadas gráficas, indicando tal correlación que la composición de la fuente detrítica que aportó sedimentos en la sección de Flor de Patria de la Formación La Luna se mantuvo relativamente constante a lo largo de toda la sección (Davis *et al*; 1999).

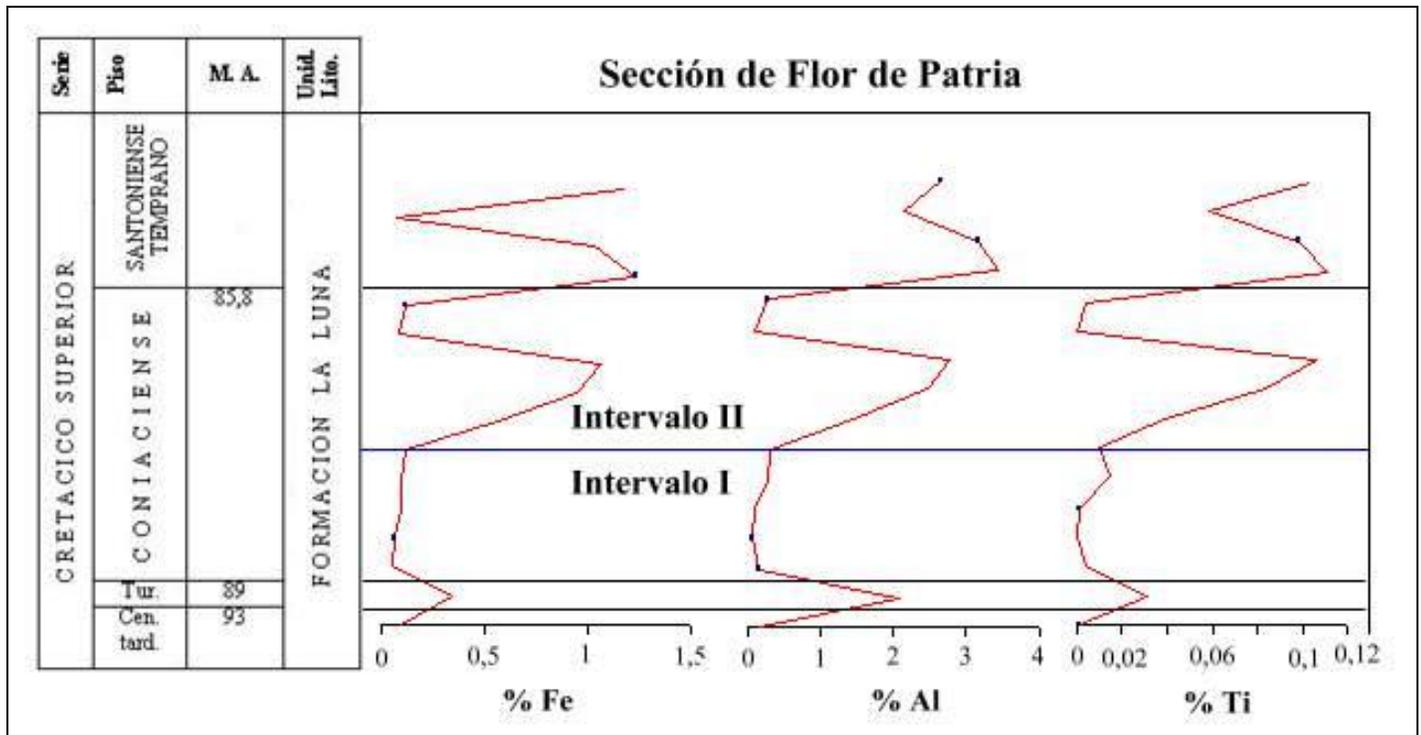


Figura 79, Comparación del comportamiento del Fe, Al y Ti para la sección de Flor de Patria.

De igual manera se presentan indicios acerca de un aporte volcánico relativamente importante para la sección de Flor de Patria, el cual puede ser evidenciado por la relación interelemental Ti/Al (Davis *et al*; 1999). El aporte volcánico es uno de los factores que puede hacer variar de manera significativa el aporte clástico dentro de una sección, ya que el total del aporte clástico en una sección está compuesta por una fracción terrígena y una volcánica.

$$\text{Total del Aporte Clástico} = \text{Aporte Terrígeno} + \text{Aporte Volcánico}$$

Al examinar la gráfica Ti/Al de la Figura 80, se observa como el aporte volcánico aumenta a finales del Coniaciense temprano, ubicándose este aumento dentro

de la **SUG02**, el mencionado aumento se mantiene relativamente constante durante el resto de la sección. Este cambio en el aporte volcánico refleja el inicio de un cambio climático a nivel regional, ya que afectó toda la configuración sedimentaria del área.

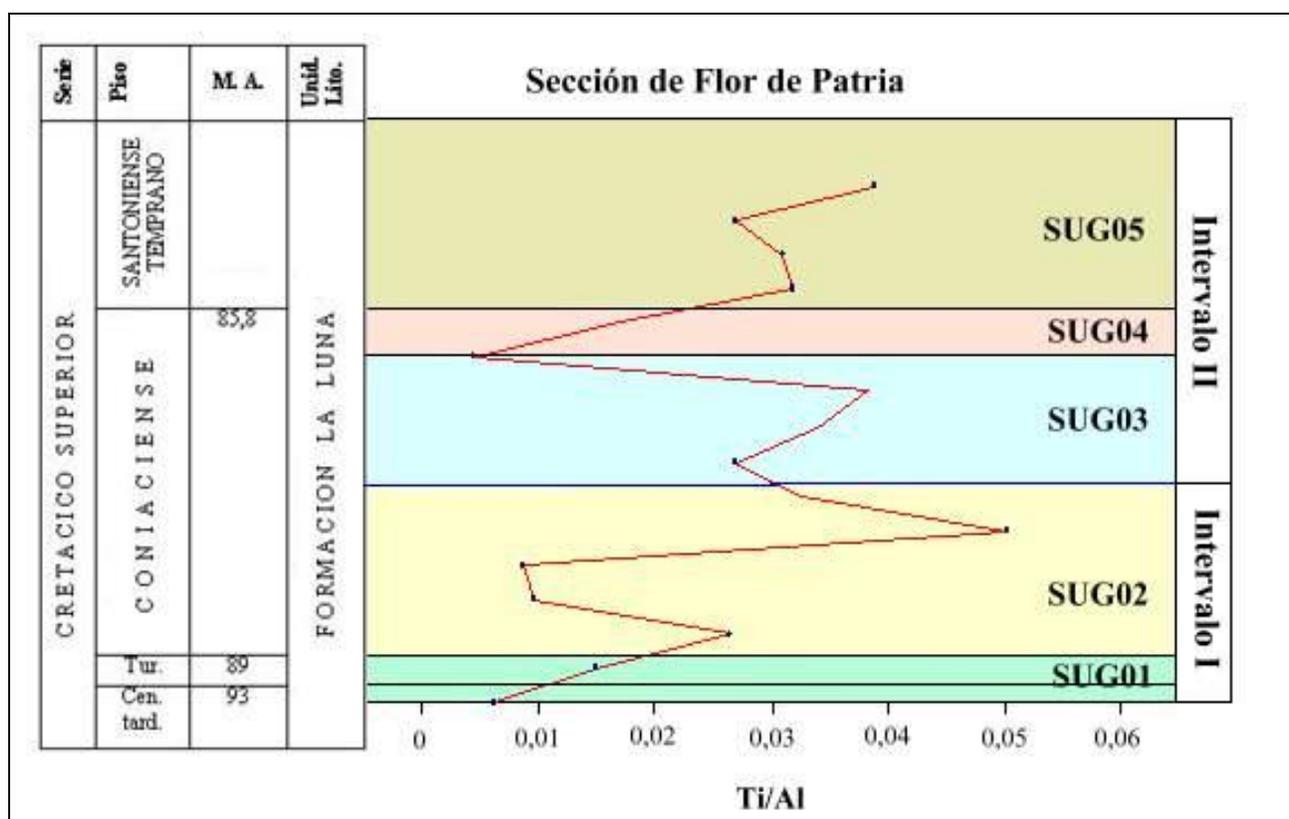


Figura 80, Grafica de la relación Ti/Al para la sección de Flor de Patria.

Otros elementos que son regularmente utilizados para indicar la influencia del aporte clástico en una cuenca son el potasio (K), el sodio (Na), y el calcio (Ca), los cuales son ampliamente utilizados para determinar los cambios composicionales de la fuente de aporte. Tal es el caso de la comparación de los perfiles de Na y K, los cuales al presentar una buena correlación entre sí,

implican una composición uniforme del aporte detrítico (Davis *et al*; 1999), lo cual implicaría la influencia de una sola fuente clástica, se puede pensar que las pequeñas desviaciones observadas en la gráfica de Na y K de la Figura 81, pueden ser debidas a alteraciones diagenéticas, junto con la alteración provocada por la acción de la meteorización sufridas por las rocas estudiadas en afloramiento.

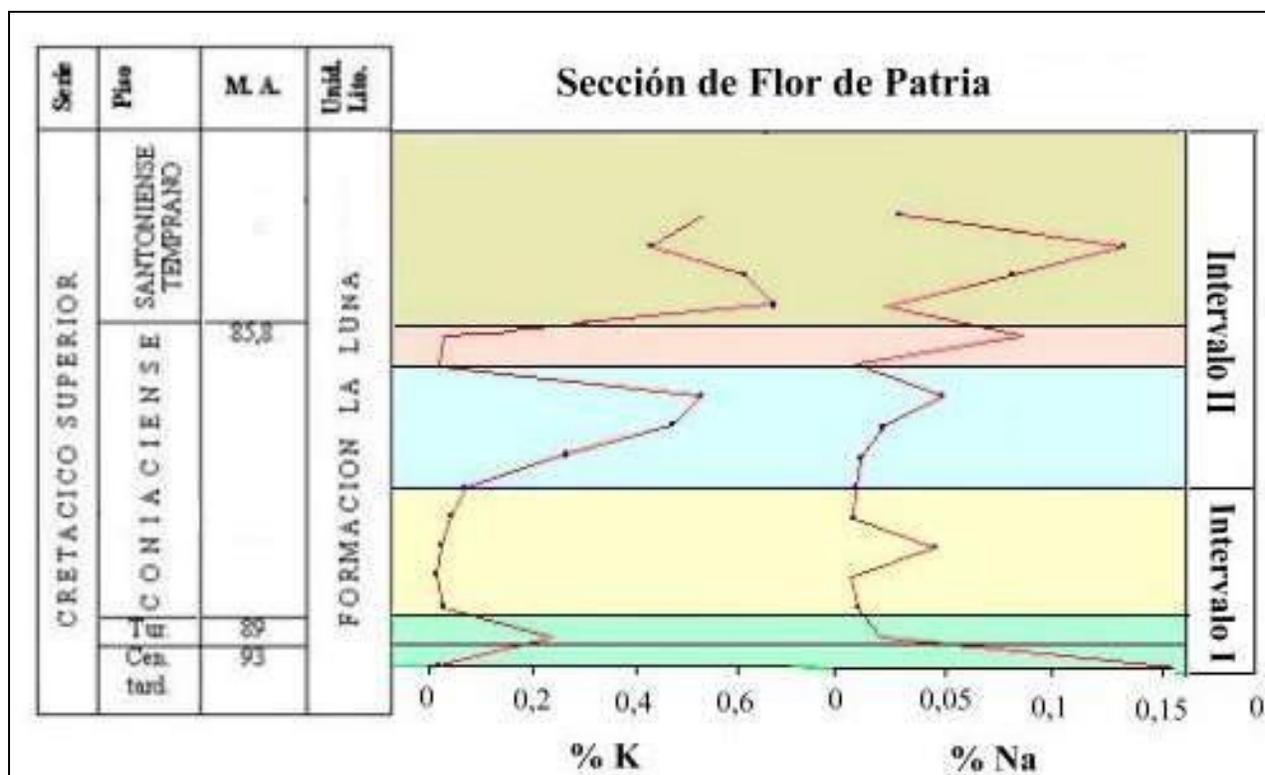


Figura 81, Comparación del comportamiento de K y Na para la sección de Flor de Patria.

Al estudiar la gráfica de Ca en la Figura 82, se observa como la misma presenta una tendencia inversa a la presentada por las demás gráficas analizadas, este

cambio es debido a la influencia que tiene el contenido de CaCO_3 sobre el contenido de Ca. Este cambio en el patrón de comportamiento de las gráficas de Ca y CaCO_3 (ver Figura 82), es debida a la naturaleza composicional de las rocas de la sección, ya que al compararlas con la gráfica de Si en la Figura 82, se observa como las muestras hacia la base de la sección son más calcáreas y menos silíceas, mientras que hacia el tope son más silíceas y menos calcáreas. Correspondiendo esta tendencia con la descripción de las muestras realizadas en afloramiento y por la descripción petrográfica detallada de la sección realizada por Madrid I.; (2001).

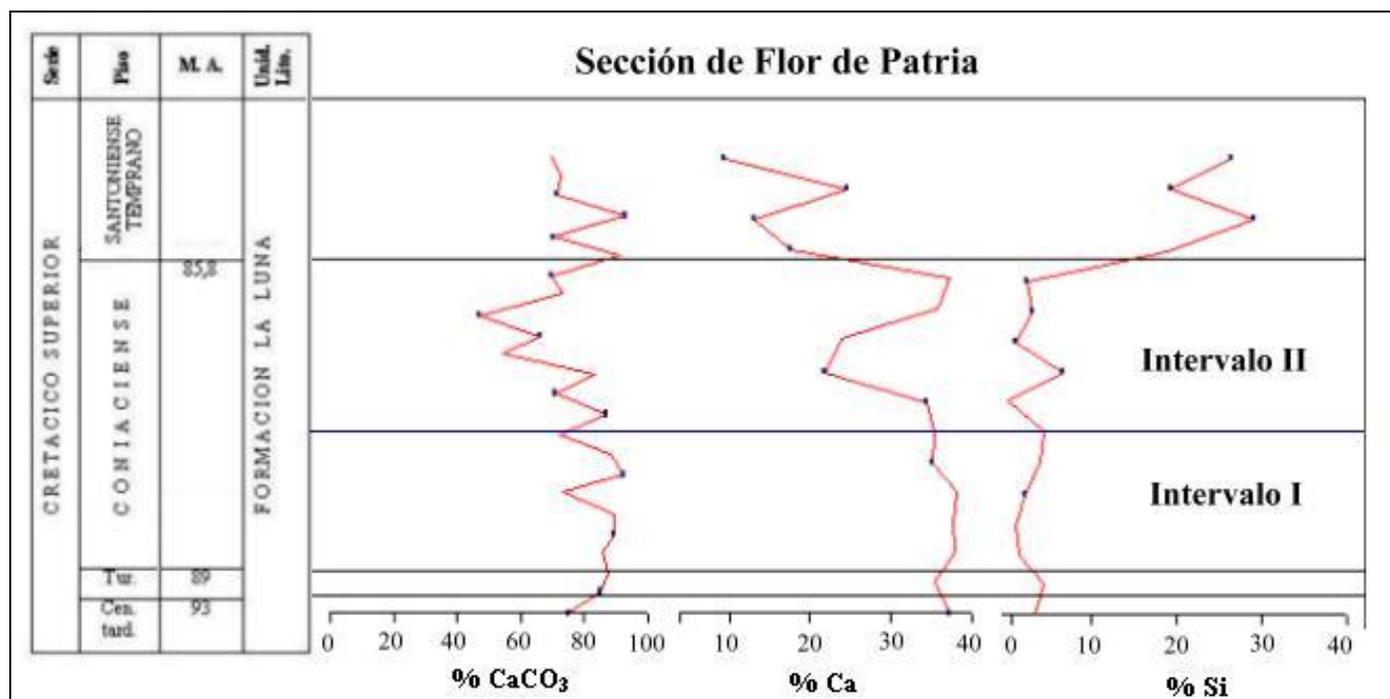


Figura 82, Comparación del comportamiento del CaCO_3 , Ca y Si para la sección de Flor de Patria.

El cambio climático propuesto en el **Intervalo II** (Coniaciense tardío – Santiense temprano), provoca un intercambio efectivo de las aguas superficiales de la cuenca con aguas bajas en oxígeno y de alta salinidad, produciendo esto las condiciones necesarias para que exista una regular presencia de organismos plánticos (ver Figura 51), junto con un mayor aporte clástico.

Las condiciones anteriormente descritas sólo existieron en las capas más superficiales de agua, mientras que hacia las aguas de fondo se presentaron condiciones anóxicas, con poca presencia de nutrientes y por lo tanto escasez de organismos bénticos, tal como se aprecia en la Figura 51. Estas características son típicas de cuencas con estratificación en las capas de agua, lo cual existió a lo largo de gran parte del Cretácico en la cuenca de Maracaibo (Berner, R., 1981).

SECCIÓN DE “SAN PEDRO DEL RÍO”: mediante una rápida comparación de los porcentajes de los elementos analizados (ver Figuras 85 y 86), se observa como los principales componentes de las rocas de la Formación La Luna en la sección de San Pedro del Río son; el silicio (Si), aluminio (Al), calcio (Ca), hierro (Fe) y el COT, resaltando dentro de todos estos componentes el silicio (Si) con un contenido promedio para la sección de 20,79% y el carbonato de calcio (CaCO_3) con un contenido promedio de 41,52%, demostrando esto que la

sección esta conformada tanto por componente silicios como por carbonáticos, siendo este ultimo el más abundante, la presencia mayoritaria de estos dos componentes indica la existencia de una considerable influencia clástica, lo cual puede ser observado en la Figura 83, donde se comparan las gráficas de Si y Ca, demostrando estas una correlación inversa que significa que cuando hay dominio de depósitos silicios hay un mínimo de aporte carbonático y viceversa.

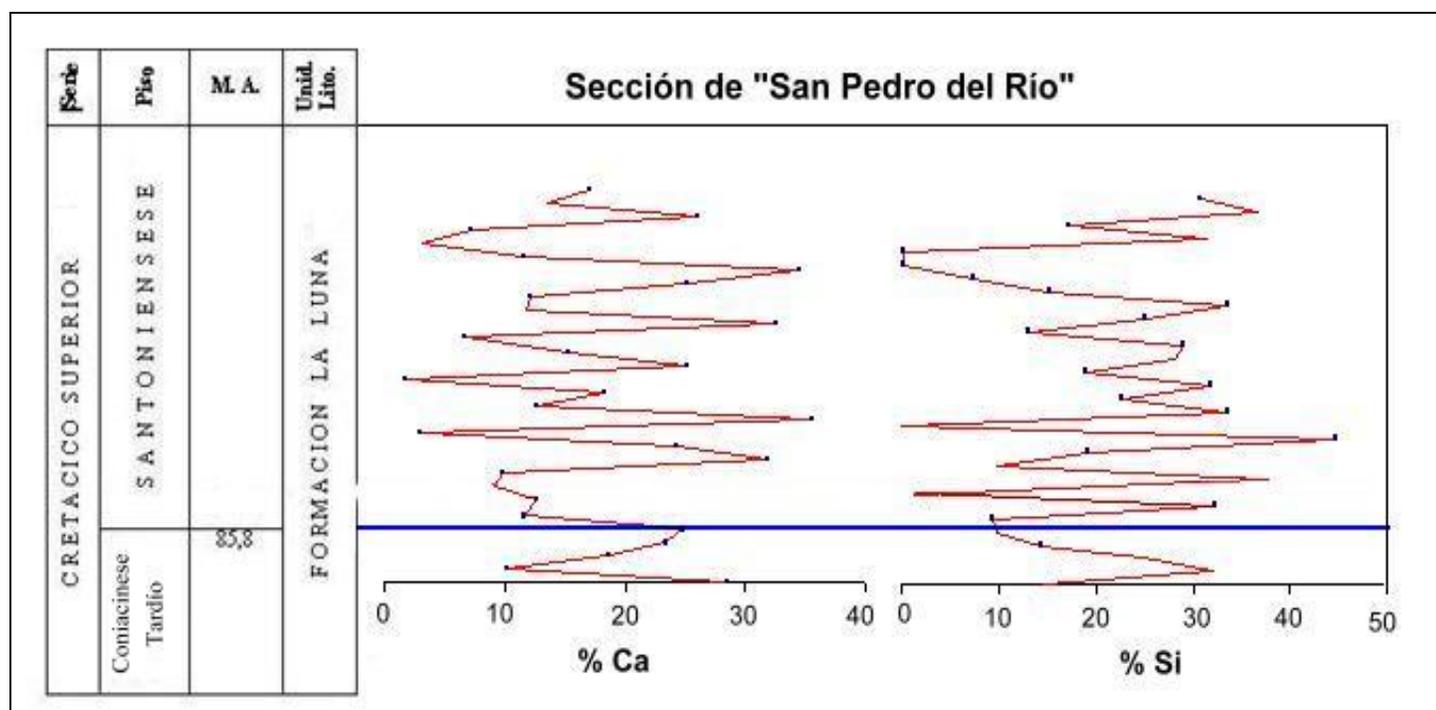


Figura 83, Comparación del comportamiento de la gráficas de Ca y Si para la sección de San Pedro del Río.

Al comparar las gráficas de Si y Ni (ver Figura 84), se observa una correlación inversa entre ambas gráficas pudiéndose reconocer de esta forma los intervalos de comportamiento previamente definidos.

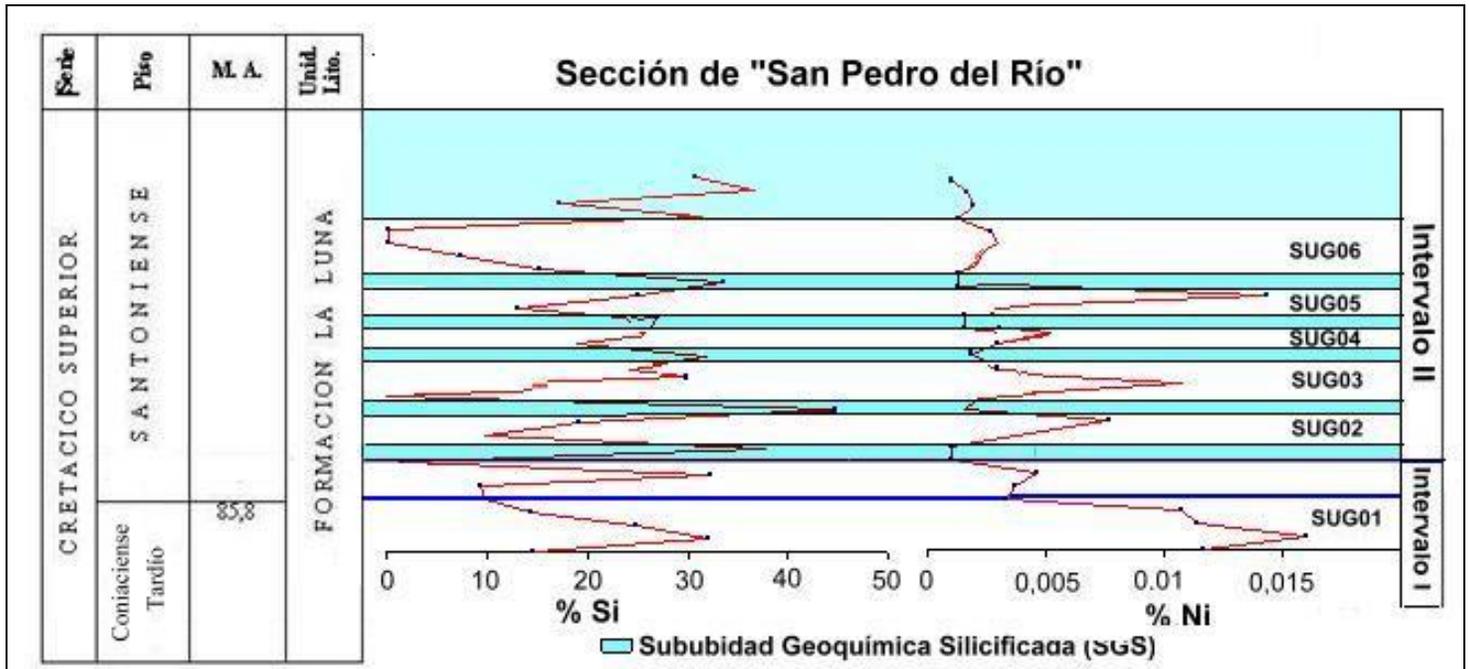


Figura 84, Comparación del comportamiento de las gráficas de Si y Ni para la sección de San Pedro del Río.

El **Intervalo I**, va del Coniaciense tardío al Santoniense temprano, en este intervalo se presentan condiciones de alta anoxia, coincidiendo con valores relativamente bajos de Si (entre 10 – 35%), lo cual implica que durante este periodo existió un regular aporte clástico simultáneamente con condiciones anóxicas hacia el fondo de la cuenca, ambas condiciones se presentaron debido a la estratificación de la columna de agua, donde las capas superficiales presentaron un regular aporte clástico, mientras que las aguas de fondo presentaron condiciones anóxicas (alta salinidad y escasa presencia de oxígeno), lo cual es identificado mediante los análisis de isótopos de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^{13}\text{C}$.

El **Intervalo II** (Santoniense temprano – Santoniense tardío), se diferencia del anterior por presentar contenidos más altos de Si, junto con periodos recurrentes de altos y bajos contenidos tanto de Si como de Ni, a partir de este comportamiento se puede reconocer con facilidad las subunidades geoquímicas definidas previamente. Tal como se observa en la Figura 84, se advierte como la **subunidad geoquímica silicificada (SGS)** coinciden con periodos de altos valores de Si y bajos de Ni, donde las subunidades que presentan bajos contenidos de Si tienen las menores condiciones anóxicas reconocidas mediante altos valores de Ni.

Al comparar las gráficas de Ti, Si, Na, Al (ver Figura 85), se observa como la mayoría de estas presentan un comportamiento similar, a diferencia de la representación gráfica del contenido de Si, en el cual se determina un comportamiento inverso. Mediante la comparación de la gráficas de los elementos anteriormente nombrados (ver Figura 85), se pueden reconocer los intervalos de comportamiento previamente definidos.

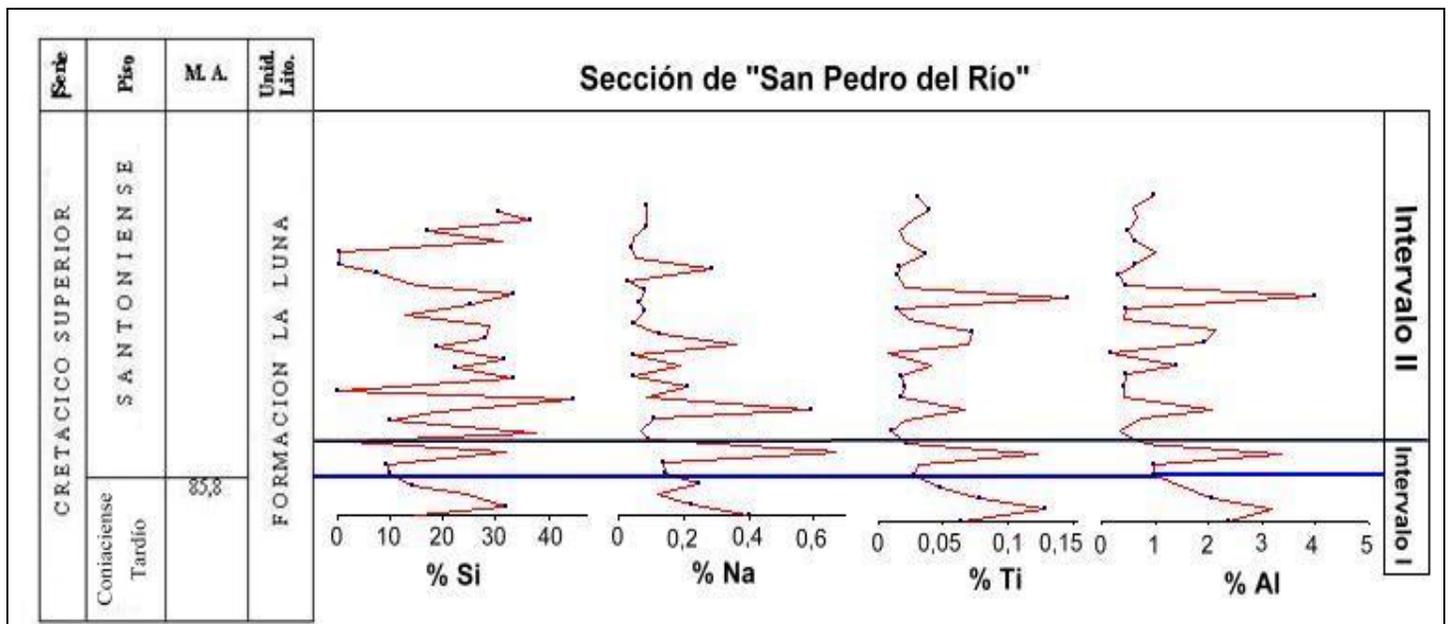


Figura 85, Comparación del comportamiento de las gráficas de Si, Na, Ti y Al para la sección de San Pedro del Río.

El **Intervalo I**, se caracteriza por presentar valores considerablemente altos y constantes de los elementos comparados en la Figura 85, lo cual implica un regular aporte clástico, la existencia de este aporte clásticos durante el **Intervalo I**, demuestra que durante el Coniaciense tardío al Santoniense temprano, las aguas de la cuenca se encontraban estratificadas, con condiciones de fondo anóxicas que permitieron la preservación de la materia orgánica que es aporta a la cuenca, mientras que hacia el tope de la columna de agua existió una regular oxigenación y aporte clástico.

El **Intervalo II**, presenta una mayor variabilidad en los valores de los elementos comparados en la Figura 85, al igual que una y una disminución continua de los mismos hacia el tope de la sección. En estas gráficas se pueden reconocer las

subunidades anteriormente definidas, donde la **subunidad geoquímica silicificada (SGS)** se reconoce por la existencia de valores altos de Si y bajos de Al, Ti y Na, los cuales se encuentran inhibidos debido a la alta depositación de Si que se produjo durante estos intervalos. En las demás subunidades el patrón de comportamiento de estos elementos (Al, Ti y Na) refleja una disminución relativa del aporte clástico, al igual que cambios en los patrones de sedimentación.

Existen otros elementos que son utilizados para analizar diversas variaciones en el aporte clástico, como son el K, Fe, Al, los cuales son utilizados junto a otros para determinar cambios composicionales en la fuente de aporte de los sedimentos.

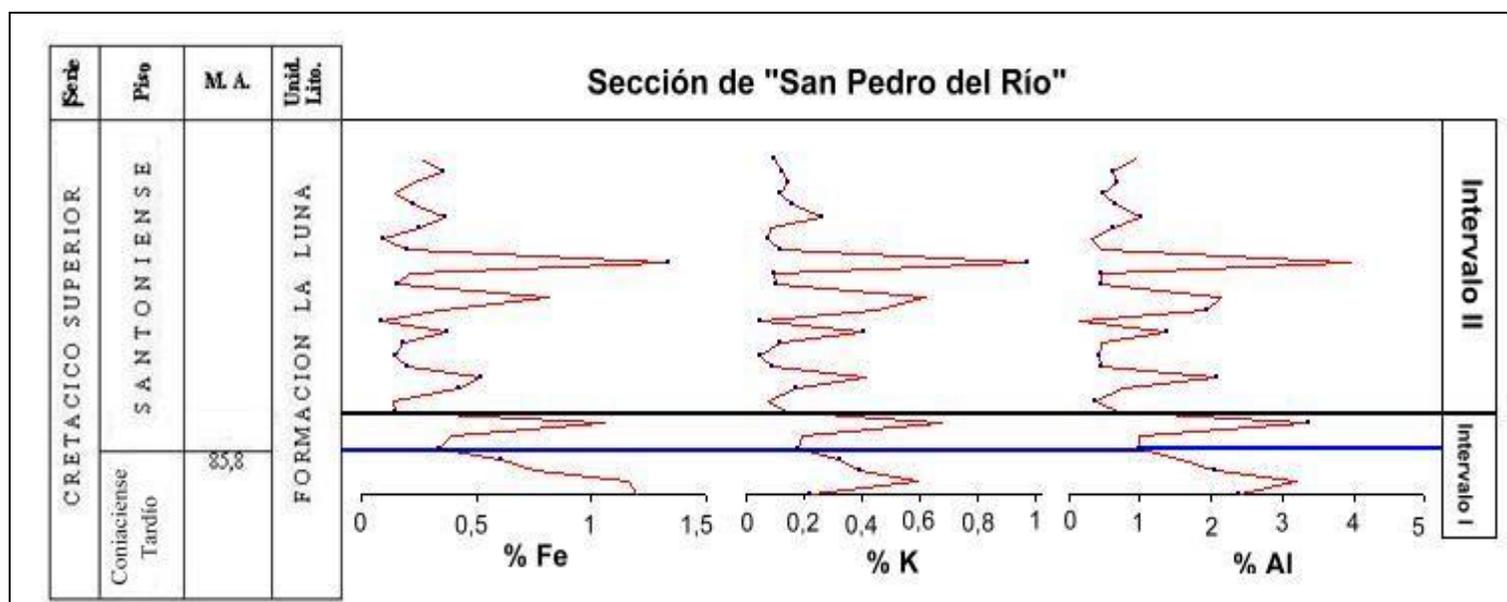


Figura 86, Comparación del comportamiento de las gráficas de Fe, K y Al para la sección de San Pedro del Río.

Al comparar los perfiles de estos elementos se observa una buena correlación entre ellos, por lo tanto se determina que durante la depositación de los sedimentos en la sección de San Pedro del Río existió la influencia de una misma fuente de aporte detrítico, ya que no se observa cambios repentinos en los patrones de las gráficas comparadas en la Figura 86.

Tomando en cuenta los datos obtenidos del análisis de las Figuras utilizadas anteriormente (83, 84, 85, 86), se observa una correlación directa entre los indicadores de condiciones anóxicas y los indicadores de aporte clástico, esto implica que en el periodo donde hay alta anoxia existe un regular aporte clástico, configuración esta producida por la estratificación de las aguas de la cuenca. Este comportamiento implica que las condiciones ambientales que determinaron la efectividad del aporte clástico son relativamente independientes de las condiciones reinantes en el fondo de la cuenca, producto de la estratificación de la columna de agua (Mongenot *et al*; 1996).

Por lo tanto se propone que para que existan variaciones de las condiciones de fondo de cuenca es necesario la influencia de cambios en las condiciones de circulación oceánica (Erlich *et al*; 2000), provocada por cambios climáticos de carácter global ó por cambios de la configuración estructural a nivel regional, tal como es propuesto para este periodo por Cooney & Lorente (1997).

Otro de los factores que puede intervenir de manera significativa en el aporte clástico dentro de un sección es el aporte de origen volcánico, el cual puede ser analizado de manera aproximada mediante la relación Ti/Al (Davis *et al*; 1999).

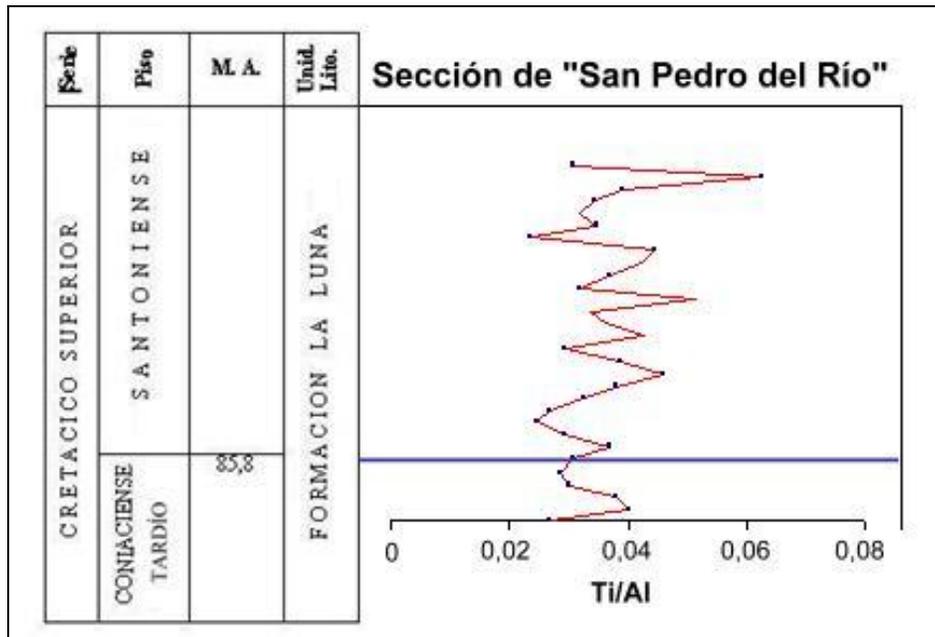


Figura 87, Relación Ti/Al para la sección de San Pedro del Río.

La grafica de la relación Ti/Al para la sección estudiada, mostrada en la Figura 87, indica que a lo largo de esta el aporte volcánico fue continuo, presentándose algunos aumentos de carácter periódicos, los cuales coinciden la **subunidad geoquímica silicificada (SGS)** definida anteriormente, por lo tanto se puede inferir que parte de la sílice aportada en este sección proviene de una fuente volcánica, la cual presenta periodos cíclicos de actividad

INDICADORES DE PRODUCTIVIDAD ORGÁNICA

La productividad orgánica es una de las características de mayor importancia para establecer las propiedades paleoambientales elementales que ayudan a caracterizar una sección en estudio.

La productividad primaria está relacionada directamente con la presencia de nutrientes en suficiente cantidad como para mantener una alta población de microorganismos y algas.

Para determinar estas características mediante la herramienta geoquímica son utilizados varios elementos que se comportan como minoritarios o traza, entre estos destacan el fósforo (P) y el bario (Ba) entre otros, los cuales son utilizados en varios trabajos como los de Mongenet *et al* (1996), Drzewiecki & Simo (1997), Davis *et al* (1999), etc. Para poder utilizar estos elementos con la finalidad de establecer las características que definen las propiedades orgánicas de una sección en estudio, se deben normalizar estos elementos (P y Ba) con el contenido de Aluminio (Al) en la sección, con la finalidad de eliminar la influencia del aporte clástico en el contenido de estos elementos (Mongenot *et al*; 1996).

SECCIÓN DE FLOR DE PATRIA: Luego de normalizar las concentraciones de P y Ba para la sección de Flor de Patria y al comparar los resultados obtenidos

se observa como se presenta una correlación directa entre ambas gráficas. Donde los valores más altos de las mencionadas relaciones se observan hacia la base, con una tendencia a disminuir los valores hacia el tope.

Al comparar los valores de contenido de Ba para la sección de Flor de Patria con los valores promedio para las lutitas negras (Black Shales) establecidas por Vine & Tourtelot (1971) y el promedio general para las lutitas dado por Wedepohl (1970) en la Tabla 36, se observa como los valores obtenidos para la sección en estudio son ligeramente menores a los establecidos por el promedio dado por Vine & Tourtelot (1971) y al compararlos con los valores dados por Wedepohl (1970) se determina una diferencia considerable entre ambos valores de contenido de Ba. Esta diferencia entre los valores de Ba obtenidos para la sección de Flor de Patria y los patrones de comparación implica que las condiciones químicas que marcan la existencia del Ba en los sedimentos fueron muy distintas en la sección en estudio que en los patrones comparados.

ELEMENTO	PROMEDIO (⁰ / ₁₀₀) SECCIÓN DE FLOR DE PATRIA	PROMEDIO (⁰ / ₁₀₀) ESTABLECIDO POR WEDEPOHL (1971)	PROMEDIO (⁰ / ₁₀₀) ESTABLECIDO POR VINE <i>et al</i> (1970)
Ba	275	580	300

Tabla 35, Comparación de los contenidos promedio (ppm) de Ba para la sección de Flor de Patria.

Como se mencionó anteriormente, uno de los indicadores de la productividad primaria es el Ba (Mongenot *et al*; 1996), por lo tanto al existir bajas cantidades de Ba en la sección estudiada se infiere que productividad primaria en la sección de Flor de Patria es de menor envergadura que en los patrones de comparación, produciendo esto poca abundancia de nutrientes y por ende una escasa existencia de microorganismos.

Al comparar las gráficas de P y Ba (previamente normalizadas) en la Figura 88, se observa como hacia la base de la sección, en el **Intervalo I** (Cenomaniense tardío – Coniaciense tardío), se presentan los valores más altos de ambas gráficas, lo que significa que en este intervalo se presentaron la mayor cantidad de nutrientes que propiciaron una alta productividad primaria.

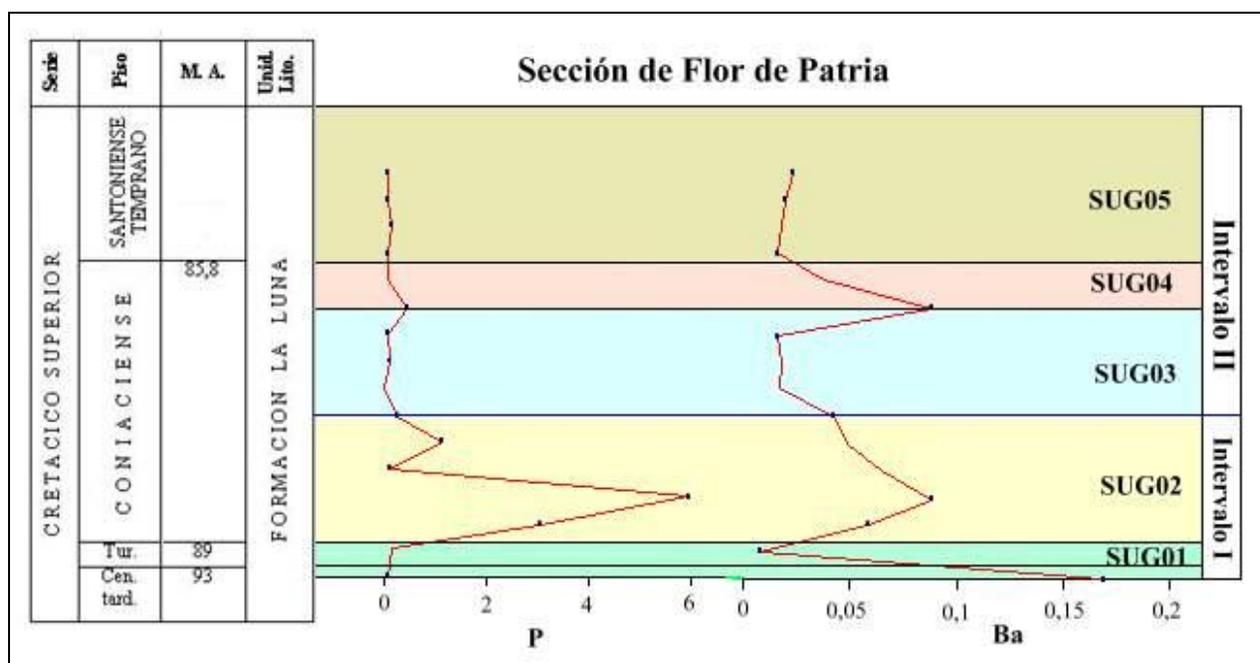


Figura 88, Comparación del comportamiento de P y Ba para la sección de Flor de Patria.

De forma más específica se puede identificar a las **SUG01** y **SUG02** como las que presentan mayor cantidad de P y Ba en la sección (ver Figura 88), siendo la **SUG02**, la cual presenta mayor abundancia en tales elementos, reflejando esto que durante gran parte de Coniaciense existió un mayor aporte de nutrientes hacia esta parte de la cuenca de Maracaibo, generando de esta manera las condiciones propicias para el desarrollo de la vida.

La relación entre el aumento del contenido de Ba y P, con la abundancia de organismos propuesta, concuerda con lo establecido por Davis *et al*; (1999), donde se relaciona el aumento de estos elementos con el aumento en la productividad de organismos carbonáticos, los cuales durante estos periodos se encuentran en mayor abundancia que los organismos silicios.

La disminución de los organismos calcáreos en comparación con la de organismos silicios, provoca una disminución en la contenido de CaCO_3 durante este periodo (**Intervalo II**), al igual que un aumento significativo en el contenido de sílice biogénica, esto se ve reflejado en la gráfica de CaCO_3 y Si en el Intervalo II (ver Figura 89).

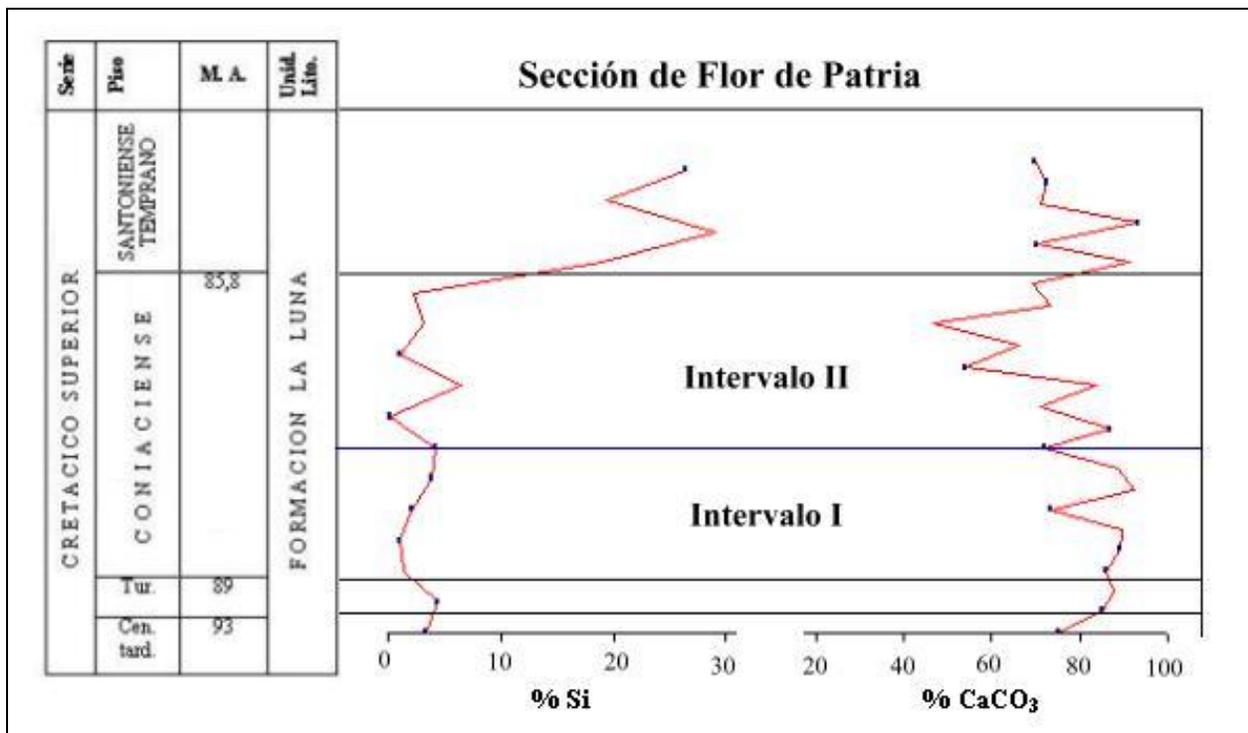


Figura 89, Comparación del comportamiento del Si y CaCO₃ para la sección de Flor de Patria.

Comparando los perfiles de P y Ba de la Figura 90, con la información bioestratigráfica de esta misma sección dada en el trabajo de Madrid I. (2001), en la Figura 90. Se observa como los intervalos de mayor contenido de P y Ba, coinciden con los intervalos de mayor contenido de foraminíferos plánticos y reducida presencia de foraminíferos bénticos, implicando esto, que durante las primeras etapas del Coniaciense se presentaron condiciones de buen aporte de nutrientes que favorecieron la abundancia de foraminíferos plánticos y no así la de foraminíferos bénticos, lo cual es debido a que tal aporte de nutrientes solo es efectivo en las primeras capas de agua, mientras que hacia las aguas de fondo, no existieron las condiciones necesarias para favorecer la abundancia de foraminíferos bénticos.

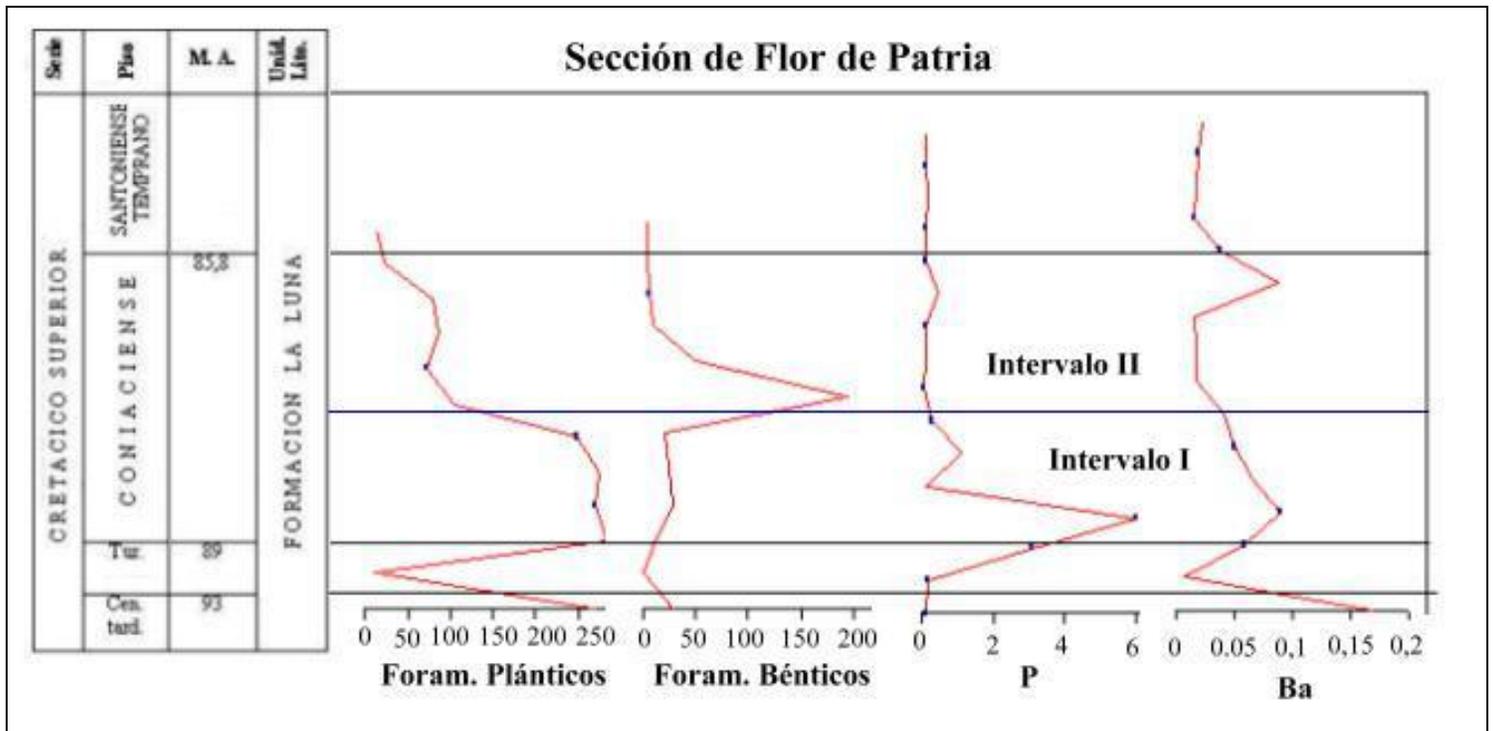


Figura 90, Comparación de las cantidades de foraminíferos plánticos y bénticos con el contenido de %P y %Ba en la sección de Flor de Patria, tomado y modificado de Madrid, I., (2001).

Esta contrastante relación de organismos concuerda con la hipótesis propuesta en este trabajo, que durante la depositación de la sección de Flor de Patria de la Formación La Luna, las aguas de la cuenca se encontraban estratificadas, en donde las capas superiores de la columna de agua presentaron mayores condiciones de oxigenación al igual que mayor aporte de nutrientes y por lo tanto mayor abundancia de organismos, a diferencia, de las capas inferiores de agua, las cuales presentan escasez de oxígeno y nutrientes, por lo tanto una presencia mínimas de foraminíferos bénticos.

SECCIÓN DE SAN PEDRO DEL RÍO: además del P y el Ba, para el estudio de la actividad orgánica de esta sección se utilizó el silicio (Si), el cual ayuda a conocer el aporte de nutrientes (Davis *et al*; 1999).

Luego de normalizar las concentraciones de P y Ba para la sección de San Pedro del Río y al comparar ambas, se pueden reconocer con facilidad dos intervalos de comportamiento (ver Figura 91).

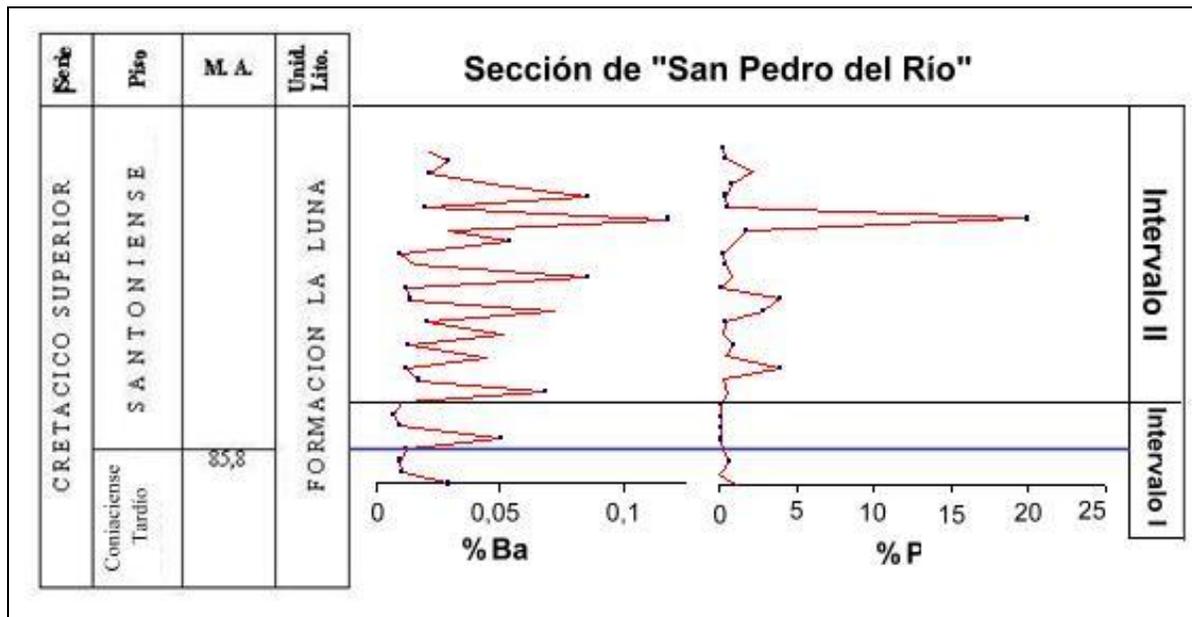


Figura 91, Comparación del comportamiento de las gráficas de Ba y P para la sección de San Pedro del Río.

El **Intervalo I**, ubicado hacia la parte baja de la secciones se extiende del Coniaciense tardío al Santoniense temprano, este intervalo contiene los valores más bajos de Ba y P en la sección, esto indica que durante este periodo

(Coniaciense tardío – Santoniense temprano), existió baja productividad primaria, provocada por la escasez de nutrientes aportados a la cuenca, lo cual se ve reflejado en bajos valores de Si (ver Figura 92).

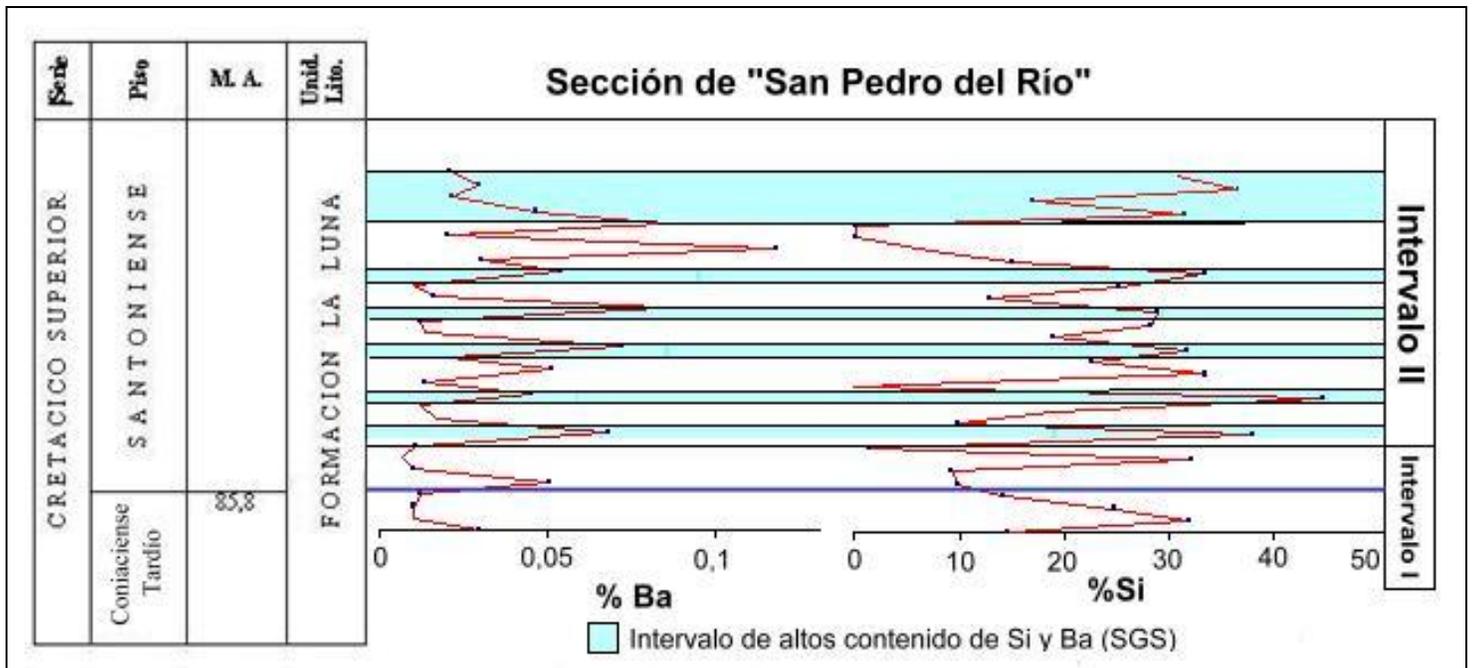


Figura 92, Comparación del comportamiento de las gráficas de Ba y Si para la sección de San Pedro del Río.

El **Intervalo II** (Santoniense temprano – Santoniense Tardío), se caracteriza por la existencia de altos valores de Ba, indicando que este intervalo contiene mayor presencia de productividad primaria, viendo esto reflejado en un aumento del contenido de foraminíferos bénticos, lo cual coincide con un aumento significativos del contenido de Si (ver Figura 93), indicando este aumento mayor aporte de nutrientes a la cuenca producto de una mayor actividad fluvial (Erlich *et al*; 2000). El aumento de la productividad primaria dentro del **Intervalo II**

coincide con disminuciones significativas del contenido de elementos indicadores de condiciones anóxicas, sobre todo en la parte media de la sección.

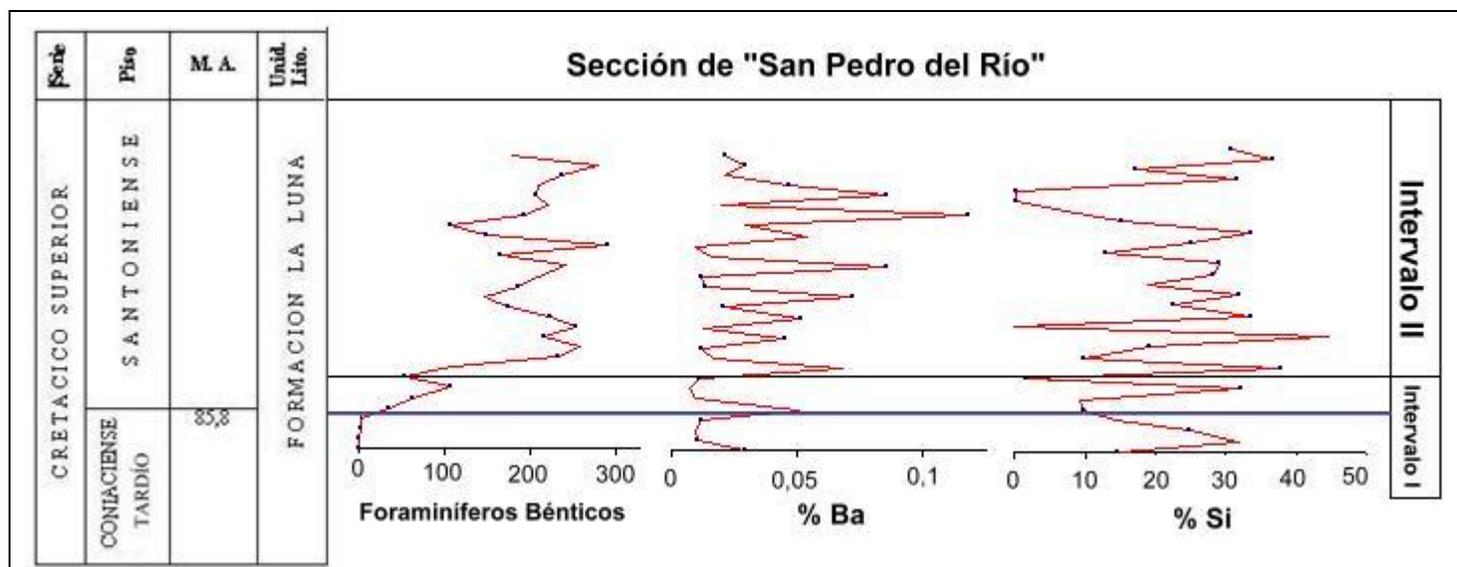


Figura 93, Comparación de los contenidos de foraminíferos bénticos, %Ba y %Si para la sección de San Pedro del Río.

Al observar la gráfica de P en la Figura 91, no se puede determinar con facilidad las tendencias anteriormente definidas, ya que dentro de la sección se presentan tres capas fosfáticas, las cuales tienen un alto contenido de P, por lo tanto el registro de P para la sección será influenciado por tal composición, la cual enmascara el comportamiento de este elemento dentro de la sección. Cabe resaltar que la presencia de estas capas fosfáticas indica la existencia de periodos de alta oxigenación dentro de la cuenca.

Además de esto, la presencia de las capas fosfáticas indican la existencia de una actividad hidrotermal dentro de la cuenca, la cual se ve reflejada en la existencia de valores altos de P, Fe, Al y Ti, (Jonas y Jenkyns; 2001), los cuales son correlacionables entre sí dentro de las **SUG 06**, tal como se muestra en la Figura 94. Implicando esta actividad un mayor aporte de CO₂ a la cuenca y por lo tanto y aumento en la productividad orgánica. (Jarvis I., 2000)

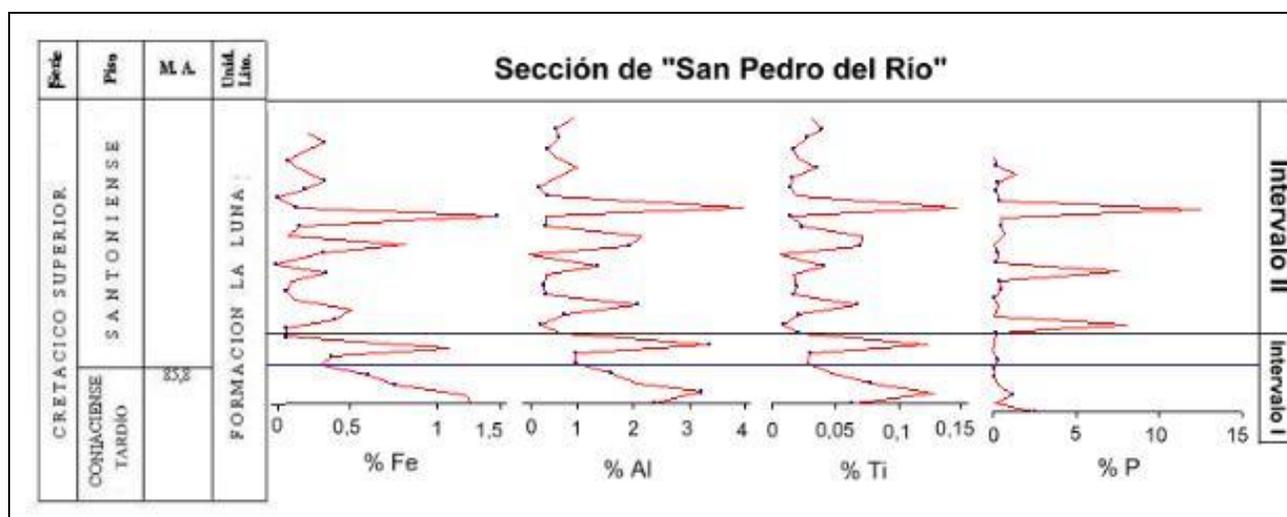


Figura 94, Comparación entre los perfiles de Fe, Al, Ti y P en la sección de San Pedro del Río.

Dentro del **Intervalo II**, resalta la presencia de altos valores de Ba, que coinciden con altos valores de Si, los cuales se ubican dentro de las **SGS**, tal como se muestra en la Figura 92, indicando esto que durante la depositación de estas subunidades existe una buena presencia de nutrientes, producto de un considerable aumento del aporte fluvial, el cual presenta un incremento a partir del Santoniense en toda la cuenca de Maracaibo.

La presencia de forma cíclica dentro de la sección de la **subunidad geoquímica silicificada (SGS)**, la cual tiene alta productividad orgánica debido a la abundancia de nutrientes, consecuencia de la acción de las denominadas corrientes “*upwelling*”, las cuales actúan de manera recurrente dentro de la cuenca de Maracaibo (Erlich *et al*; 2000), al igual que un recurrente aporte volcánico. Debido a las características presentadas por las **SGS** se determina que durante estos cortos periodos cíclicos se presentaron condiciones oxigenadas que no permitieron la preservación de materia orgánica, este se ve reflejado en el comportamiento de los elementos sensibles a cambios de las condiciones anóxicas, la existencia de este tipo de periodos en la parte alta de la Formación La Luna son reportado en otros trabajos como; “*Reducciones periódicas de los valores de Eh*” (Alberdi & Tocco; 2000).

Erlich *et al*; (2000) afirma que la totalidad del incremento de la depositación silíceo ocurrida durante el Santoniense en la cuenca de Maracaibo, no solo es producido por la influencia de la corrientes “*upwelling*”, sino que parte de este aporte es debido a cambios climáticos que generaron cambios en los patrones de depositación a nivel regional que favoreció al aporte fluvial y deltáico el cual se enriqueció en silicio, este factor junto con la influencia de las corrientes “*upwelling*” provoca la depositación de sedimentos silicios ricos en nutrientes al igual que la existencia de condiciones de fondo más oxigenadas, siendo estas condiciones necesarias para la existencia de una buena actividad orgánica, todas estas condiciones no permiten la preservación de materia orgánica,

debido a la falta de condiciones anóxicas en la cuenca, marcando el inicio del “Final del Mar de la Luna” (Erlach *et al*; 2000).

Por lo tanto, la influencia de las corrientes “*upwelling*”, provocan un intercambio efectivo entre las capas superiores de agua, las cuales tienen alta abundancia de algas y foraminíferos plánticos, tal como se muestra en la Figura 95 (Erlach *et al*; 2000), con las aguas de fondo, las cuales tienen muy bajo contenido de oxígeno y nutrientes al igual que una alta salinidad.

La acción de las corrientes “*upwelling*” en la cuenca no es suficiente para explicar el contenido significativamente alto de Si en la sección y en especial dentro de las **SGS**, considerándose otros de los factores influyentes en este aporte de Si a la actividad volcánica, tal como se mencionó en el capítulo anterior.

Es importante mencionar que los picos en la gráfica de Ba, están asociados a episodios volcanoclásticos acaecidos durante la depositación de los sedimentos de las secciones analizadas, lo cual puede estar asociado a la presencia de plagioclasas cálcicas (oligoclasa y/o andesina).

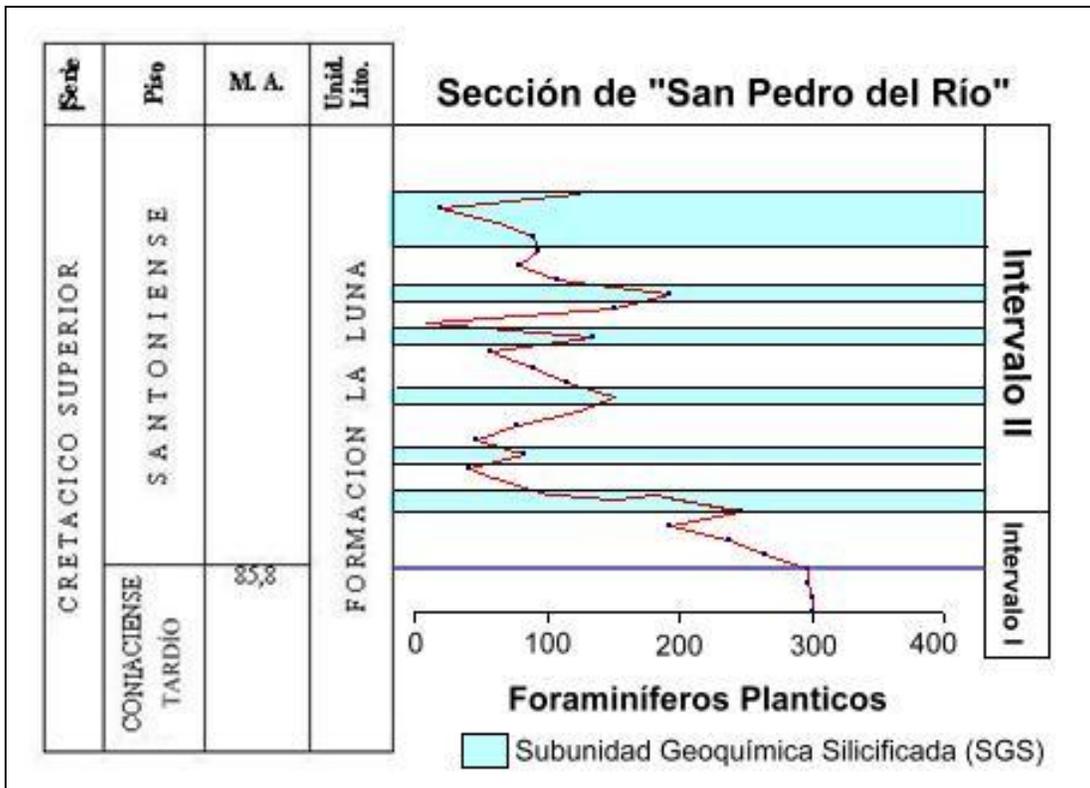


Figura 95, Contenido de foraminíferos plánticos en la sección de San Pedro del Río, tomado y modificado de Kertnuz, V., (Inédito).

RESULTADOS

A partir de las interpretaciones del comportamiento de los ensayos geoquímicos realizados, se lograron obtener diversas características ambientales que marcaron la depositación de los sedimentos y le imprimieron condiciones ambientales propias a cada una de las secciones estudiadas, de acuerdo a su ubicación dentro de cada una de las subcuencas definidas por García Jarpa *et al*, 1980, Figura 96.

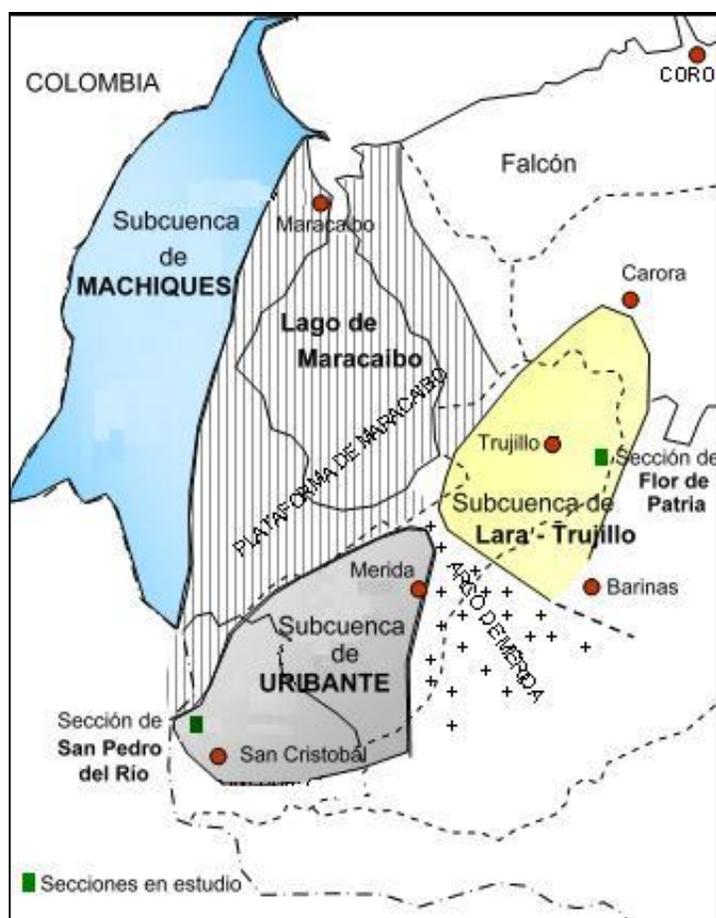


Figura 96, Ubicación relativa de las secciones estudiadas (Flor de Patria y San Pedro del Río), tomado y modificado de García Jarpa *et al*; (1980).

SECCIÓN DE FLOR DE PATRIA: al interpretar los resultados de los diversos ensayos geoquímicos realizados a las muestras de la sección de Flor de Patria, se pudo obtener diversos indicios acerca de distintos aspectos:

- Mediante el análisis de la relación Na/Fe, (ver Figura 56) propuesta por Saito (1998), se obtiene distintos aspectos acerca de la roca fuente de sedimentos, la cual definida como ígnea plutónica.
- Utilizando las relaciones K/Al (ver Figura 58) y Log(Al/Si) vs. Log(Al/K), (ver Figura 60), planteadas por Saito (1998) y Alberdi & Martínez (1999), las cuales dan indicios acerca del tipo de meteorización predominante en el área fuente, la cual fue definida predominantemente química, típica de climas cálidos y húmedos (Alberdi & Martínez; 1999).

Además de estos análisis, y a partir de los ensayos geoquímicos hechos se pueden establecer ciertas condiciones ambientales reinantes al momento de depositación, donde se pueden reconocer dos patrones de comportamiento, los cuales son descritos de la siguiente manera:

Intervalo I; ubicado hacia la base de la sección, se extiende del Cenomaniense tardío al Coniaciense tardío, en este intervalo se presentan condiciones disóxicas, las cuales son identificadas mediante la escasez de elementos

sensitivos a las variaciones de tales condiciones, de igual manera se identifica una moderada oxigenación del fondo de cuenca y baja salinidad de las aguas, a partir de una abundante precipitación de carbonato de calcio (CaCO_3), junto con valores pesados de $\delta^{18}\text{O}$, dentro de este intervalo se reportan los valores más altos de P y Ba en la sección, los cuales son indicadores de productividad orgánica, presencia de nutrientes, confirmado esto por una buena existencia de foraminíferos tanto plánticos como bénticos, tales condiciones provocan una baja preservación de materia orgánica, la cual es confirmada por la presencia de bajo contenido de COT junto con valores livianos de $\delta^{13}\text{C}$.

Dentro del **Intervalo I** el aporte clástico, definido a partir de elementos tales como Al y Ti, fue bajo, producto de un exiguu aporte fluvial, el cual es motivado por las bajas tasas de precipitación existentes en esta época, las cuáles fueron muy comunes durante gran parte del Cretácico donde se presentó un clima cálido y húmedo.

Intervalo II; este se extiende del Coniaciense tardío al Santoniense temprano, debido a las condiciones climáticas presentadas previamente, se presenta una alta evaporación generando alta humedad en el ambiente, al igual que un aumento de la salinidad de las aguas de la cuenca, siendo esto evidenciado por el desplazamiento hacia valores más livianos de los $\delta^{18}\text{O}$, al igual que por una disminución del contenido de CaCO_3 debido a la alta salinidad. Las condiciones anteriormente nombradas producen que las capas de agua más salinas y

densas se ubiquen hacia el fondo de la cuenca, generando estratificación de la columna de agua, la cual al no tener intercambio con aguas superiores ricas en oxígeno y de baja salinidad genera condiciones de fondo anóxicas y valores redox negativos (déficit de oxígeno), evidenciado por el fuerte aumento de elementos químicos como V, Ni, Zn, Cu entre otros, los cuales son abundantes en tales condiciones.

En el **Intervalo II** se reporta una disminución significativa del contenido de elementos tales como P y Ba, producto de la disminución de la productividad orgánica, la cual se vio afectada por la escasez de oxígeno en la cuenca, esto repercute en el contenido de foraminíferos tanto bénticos como plánticos.

Los factores que caracterizaron al **Intervalo II** son favorables a una buena preservación de materia orgánica la cual es evidenciada por un alto contenido de COT y aumento de los valores de $\delta^{13}\text{C}$ en este intervalo.

Dentro de este intervalo se reporta un aumento del aporte clástico, el cual es producto del inicio de ciertos cambios climáticos a nivel regional que producen aumento de las precipitaciones y a su vez un mayor aporte fluvial, al igual que por la influencia del aporte volcánico. Se propone que el cambio de las condiciones climáticas presentes dentro de este intervalo sólo se ve reflejada en las capas superiores de agua, donde existe alto contenido de oxígeno y menor salinidad, las cuales son condiciones suficientes junto con el contenido de

nutrientes, para la existencia regular de foraminíferos plánticos tal como se observa en las Figuras 77 y 90.

SECCIÓN DE SAN PEDRO DEL RÍO: mediante el análisis de los ensayos geoquímicos se pudieron obtener diversos indicios de las características del medio sedimentario donde se depositaron estas rocas.

A partir de las relaciones planteadas por Saito (1998) y Alberdi & Martínez (1999), se obtuvo el tipo de roca fuente, que es ígnea plutónica con algunos episodios de aporte volcánico de la parte media al tope. Además de esto se identificó el tipo de meteorización que afectó en el área de aporte, la cual es de tipo química, la afectación de este tipo de meteorización fue distinta a lo largo de la sección, ya que hacia la base la meteorización química fue más intensa típica de un clima cálido y húmedo, mientras que de la parte media hacia el tope fue menos intensa denotando esto un clima menos cálido.

Al comparar varias tendencias del comportamiento de distintos elementos, mediante las cuales se pudieron reconocer dos patrones o intervalos de comportamiento que sirven para identificar las características del medio sedimentario.

Intervalo I (Coniaciense tardío – Santoniense temprano); en este intervalo la cuenca presenta condiciones de alta anoxia, debido a bajos contenidos de

oxígeno y alta salinidad de las aguas, evidenciado esto por distintos factores como; son la presencia de altos valores de elementos sensibles a cambios en las condiciones redox, valores bajos de $\delta^{18}\text{O}$, al igual que bajos contenidos de CaCO_3 .

Dentro del **Intervalo I**, se reportan valores considerablemente altos de elementos sensitivos a las variaciones del aporte clástico, significando esto que durante este intervalo existió un regular aporte clástico, producto de condiciones climáticas que favorecen a un moderado pero continuo aporte fluvial a la cuenca, el cual es efectivo solo en las capas superiores de agua, donde se desarrolló una moderada presencia de nutrientes y organismos, debido a la influencia de aguas frescas con alto contenido de oxígeno, estas condiciones no influyeron hacia las aguas de fondo ya que dentro de la cuenca se presentó estratificación de la columna de agua, donde hacia el fondo se presentaron aguas densas de alta salinidad y bajo contenido de oxígeno. Producto de tales condiciones de fondo durante este *período* se produjo una alta preservación de materia orgánica, constado esto por la presencia de altos contenidos de COT al igual que valores altos de $\delta^{13}\text{C}$.

El **Intervalo II** (Santoniense temprano – Santoniense tardío), este se caracteriza por presentar una alta variabilidad en los contenidos de los elementos comparados, donde se intercalan *períodos* de altos y bajo contenido de especies metálicas, en general este intervalo presenta contenidos menores de

elementos sensitivos a las variaciones de las condiciones redox, por lo tanto la anoxia del **Intervalo II** será menor a la presentada durante el **Intervalo I**, por lo tanto se obtendrán valores mayores de $\delta^{18}\text{O}$ indicando esto una disminución de la salinidad de las aguas al igual que un aumento relativo del contenido de oxígeno, como consecuencia de esto se produjo un aumento del contenido de CaCO_3 en el resto de la sección.

Tal como se mencionó anteriormente dentro de este intervalo se reportan *períodos* cíclicos de alto y bajo contenido de elementos sensitivos a cambios en las condiciones anóxicas, siendo esto interpretado como *períodos* cíclicos de oxigenación de poca duración, los son denominados **subunidad geoquímica silicificada (SGS)**, esta subunidad presenta valores altos de silicio (Si), lo cual es interpretado como *períodos* de alto aporte de nutrientes, los cuales a su vez provocan un aumento considerable de la actividad orgánica, que es identificado mediante altos valores de Ba dentro de las **SGS**, aunque este factor por sí solo no es suficiente para explicar el aumento del contenido de Si, por lo tanto se plantea un considerable aporte volcánico de carácter periódico dentro de las **SGS**, lo cual es confirmado mediante la presencia de altos valores de la relación Ti/Al, que coinciden con la **SGS**. Estos *períodos* cíclicos son reconocidos en otros trabajos en diversas localidades de la Formación La Luna, como es el caso del trabajo de Alberdi & Tocco (2000) localizado en el área del Lago de Maracaibo, donde afirman que esta periodicidad es producto de la influencia de las corrientes “*upwelling*”.

De forma más generalizada para este segundo intervalo se puede decir que las condiciones anóxicas disminuyen en comparación con las del intervalo anterior, al igual que el aporte clástico, mientras que en cuanto a la actividad orgánica se observa como los contenidos de Ba y Si aumentan hacia el tope de la sección reflejando esto un aumento de la productividad orgánica al igual que un aumento del aporte de nutrientes a la cuenca, al igual que el inicio de la actividad hidrotermal, la cual se evidencia por la existencia de altos valores de P, Fe, Al y Ti, dentro de las **SUG 06**, que provoca un aumento del aporte de CO₂ al medio sedimentario .

Debido a las condiciones antes mencionadas, hacia la parte media de la sección de San Pedro del Río hay una disminución de la preservación de la materia orgánica evidenciada por la disminución del contenido de COT y el desplazamiento hacia valores bajos de $\delta^{13}\text{C}$, aunque hacia el tope de la sección se reconoce un episodio de alto contenido de COT, el cual es producido por un aumento en el aporte de materia orgánica.

MODELO PALEOAMBIENTAL Y PALEOCLIMÁTICO DE LA CUENCA DE MARACAIBO DURANTE EL CRETÁCICO TARDÍO

Mediante los datos obtenidos previamente para las secciones de Flor de Patria y San Pedro del Río, se pueden establecer un conjunto de características típicas en ambas secciones, las cuales acontecieron en la cuenca de Maracaibo durante el Cretácico.

La primera de las características que se debe tomar en cuenta en este estudio es la identificación de una misma fuente de aporte de sedimentos para ambas secciones, la cual está constituida por rocas ígneo plutónicas, esto se determinó por la presencia de composiciones químicas similares para ambas secciones, por lo que actuó el mismo tipo de meteorización, la cual es eminentemente química, típica de climas cálidos y húmedos (Alberdi & Martínez; 1999), siendo el clima del Cretácico más cálido que el actual, tal como se observa en la Figura 97.

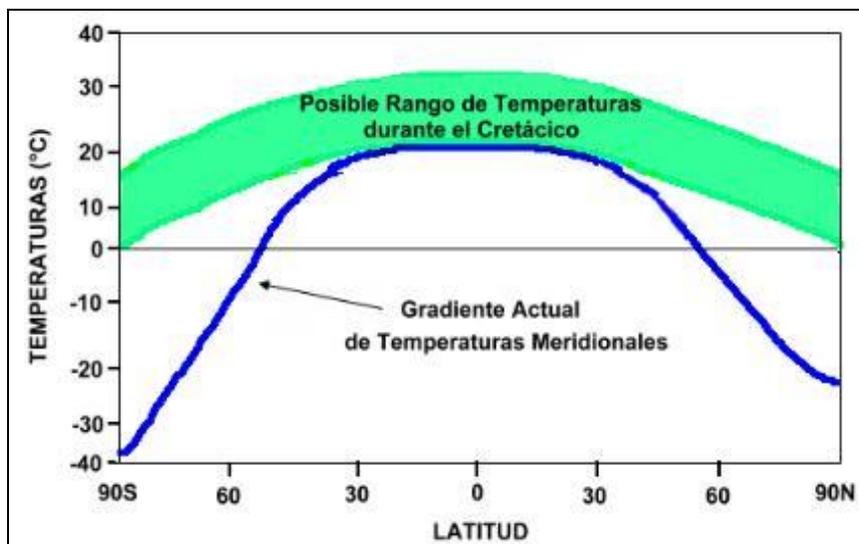


Figura 97, Comparación de las temperaturas en el presente y durante el Cretácico, tomado y modificado de Jarvis I. (2000)

Las características del medio sedimentario para ambas secciones presentan ciertas discrepancias entre sí, ya que ambas secciones se encuentran ubicadas en subcuencas diferentes, las cuales presentan distintas condiciones ambientales y patrones de sedimentación, entre estas discrepancias podemos mencionar:

- Mayor acumulación de materia orgánica en la sección de San Pedro del Río, la cual se ve reflejada en un aumento significativo del contenido de COT para tal sección, esta diferencia puede ser debida a varios factores entre los que podemos mencionar diferencias en la productividad orgánica de la cuenca o distintas condiciones anóxicas.
- Presencia de intervalos silicificados cíclicos (**SGS**) en la sección de San Pedro del Río, los cuales son producto del inicio de cambios en los

patrones de circulación de agua hacia el Este de la cuenca producidos por cambios tanto tectónicos como climáticos.

En general se puede decir que durante la depositación de los sedimentos de la Formación La Luna se presentaron en ambas subcuencas (Uribante y Lara – Trujillo) condiciones de depositación de sedimentos en una cuenca anóxica, la cual según la configuración estructural del área propuesta por Parnaud *et al* (1995) se adapta al modelo de cuenca anóxica del tipo “**Mar Negro**” propuesta por Arthur & Schlanger; 1979), también conocida con el nombre de “**cuenca anóxica cerrada**” (*anoxic closed basin*), este tipo de cuenca se caracteriza por tener una pequeña franja de agua hacia el tope con condiciones de buena oxigenación (ver Figura 98), mientras que en el resto de la columna de agua se presenta escasez en el contenido de oxígeno, dentro de este tipo de cuenca anóxica es muy típica la existencia de una columna de agua estratificada, lo cual fue determinado en el estudio de las secciones estratigráficas.

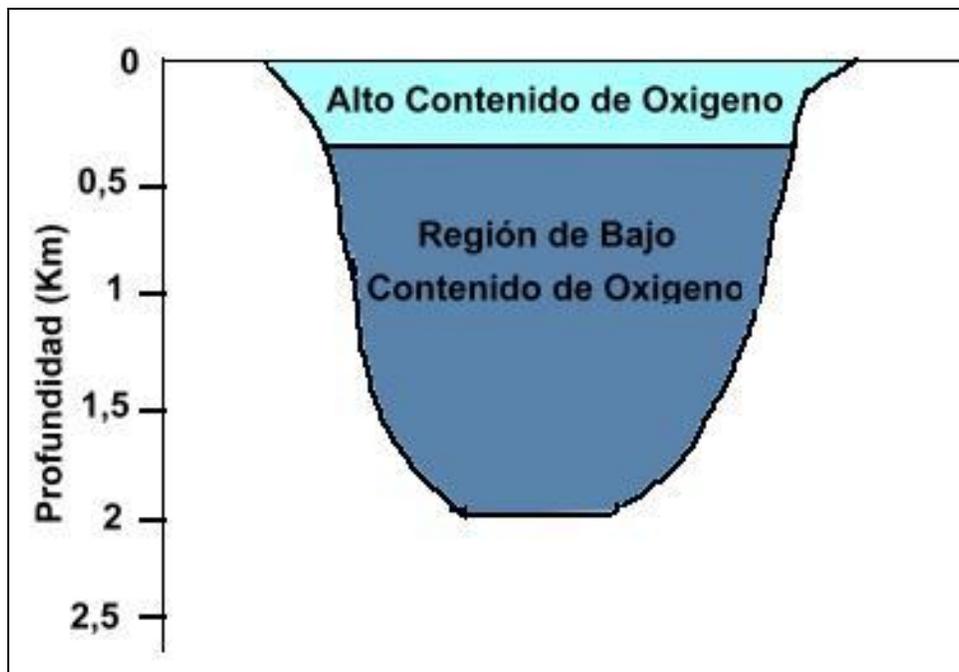


Figura 98, Forma Idealizada de una cuenca anóxica asimétrica del tipo “**Mar Negro**”, tomado y modificado de Arthur & Schlanger (1979).

El ambiente de depositación de los sedimentos es determinante en la definición del modelo de una cuenca anóxica, por lo tanto al identificar la presencia de rocas depositadas bajo condiciones de alta salinidad, típica de medios anóxicos (Maynard J.; 1982) al igual que la presencia de pirita, típica de ambientes sulfídicos (alto contenido de SO_4^-), se esta en presencia de las características propias de la depositación en una cuenca tipo “**Mar Negro**”, en la cual además de las características antes mencionadas hay evidencia de muy poca actividad orgánica en el fondo de la cuenca, debido a la presencia de sedimentos finamente laminados, los cuales son típicos de ambientes ausentes de bioturbación (Berner R; 1980). Al reconocer todas estas características en las

secciones en estudio se puede afirmar que la depositación de los sedimentos ocurrió en una cuenca anóxica de tipo “**Mar Negro**”, donde existe alto contenido de SO_4^- .

De acuerdo a las características anteriormente mencionadas, Maynard J.:(1982) propone un cuadro para clasificar cualitativamente el ambiente de depositación de una roca (ver Figura 99), en base a diversas características como es la oxigenación, la presencia de SO_4^- , el contenido de COT, la presencia de bioturbaciones, entre otras. Utilizando este cuadro para el estudio de la cuenca mediante las características ya establecidas se define como el medio sedimentario de depositación de la Formación La Luna en las secciones de Flor de Patria y San Pedro del Río, se encuentra ubicada en el rango “Anóxico – Sulfúrico.

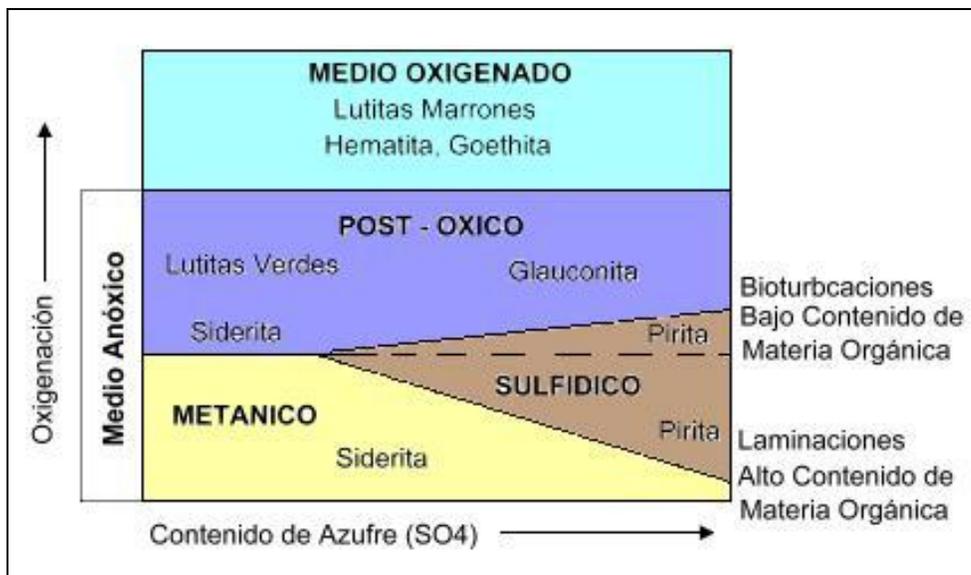


Figura 99, Clasificación geoquímica de los medios sedimentarios, tomado y modificado de Berner J. (1981)

Desde otro punto de vista se determina como para ambas secciones se reconocen dos intervalos de comportamiento, los cuales se caracterizan por presentar cambios significativos de las condiciones anóxicas, lo cual es propuesto por Arthur & Schlanger (1979) como variaciones periódicas de las condiciones anóxicas para las cuencas tipo “**Mar Negro**” durante el Cretácico. Estos cambios se ven reflejados en las secciones estudiadas al establecer dos intervalos de comportamiento, los cuales están caracterizados por:

- **Sección de San Pedro del Río:**

- **Intervalo I** (Coniaciense tardío – Santoniense temprano):
Condiciones anóxicas, reflejadas por un alto contenido de COT.
- **Intervalo II** (Santoniense temprano – Santoniense tardío).
Disminución de las condiciones anóxicas reflejado por disminución del contenido de COT, con existencia de presencia de periodos cíclicos de anoxia / disoxia.

- **Sección de Flor de Patria:**

- **Intervalo I** (Cenomaniese tardío – Coniaciense tardío):
Condiciones disóxicas, escaso contenido de COT.
- **Intervalo II** (Coniaciense tardío – Santoniense temprano):
Aumento de las condiciones anóxicas, aumento del contenido COT.

Destaca aquí, que las condiciones anóxicas definidas en este estudio de la Formación La Luna, se presentan dentro de un mismo intervalo, implicando esto que cada una de las subcuencas estudiadas están afectadas por un mismo evento anóxico, el cual es reportado como el Tercer Evento Anóxico Oceánico (OAE₃), el cual se presentó durante el periodo Coniaciense – Santoniense (Arthur & Schlanger; 1979), siendo este el evento anóxico de menor influencia a nivel global (ver Figura 100), ya que sólo afectó al borde norte de Sudamérica y del Atlántico Norte.



Figura 100, Carta de cambios del nivel del mar y de eventos anóxicos, tomada de Arthur & Schlanger; (1979)

Es importante resaltar que las condiciones de mayor anoxia de las secciones estudiadas coinciden con el tercer mayor pulso transgresivo que se presentó durante el Cretácico Tardío, el cual es reportado por Erlich *et al;* (2000) del Coniaciense al Santoniense Temprano.

Durante este evento transgresivo anóxico (OAE₃) el cual ocurrió del Coniaciense al Santoniense, se presentaron diversas condiciones geoquímicas, las cuales son mostradas en la Figura 101 y 102. De igual forma estos procesos se encuentran limitados por periodos de baja anoxia, los cuales coinciden con pulsos regresivos dentro de la transgresión Cretácica, los cuales son mostrados en la Figura 103.

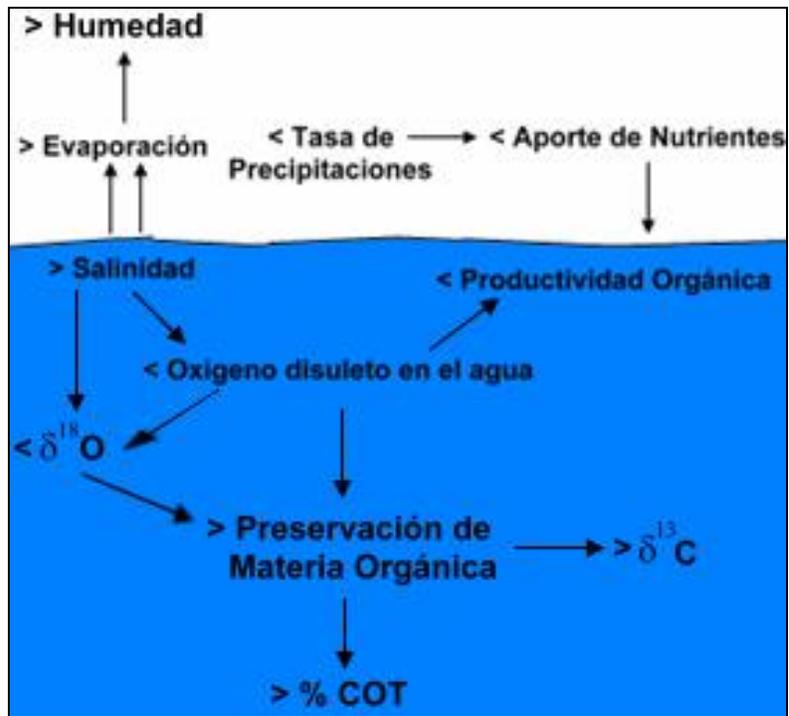


Figura 101, Algunas de las Variables que influyen durante los procesos de anoxia oceánica, tomado y modificado de Jarvis I. (2000)

TRANSGRESIÓN

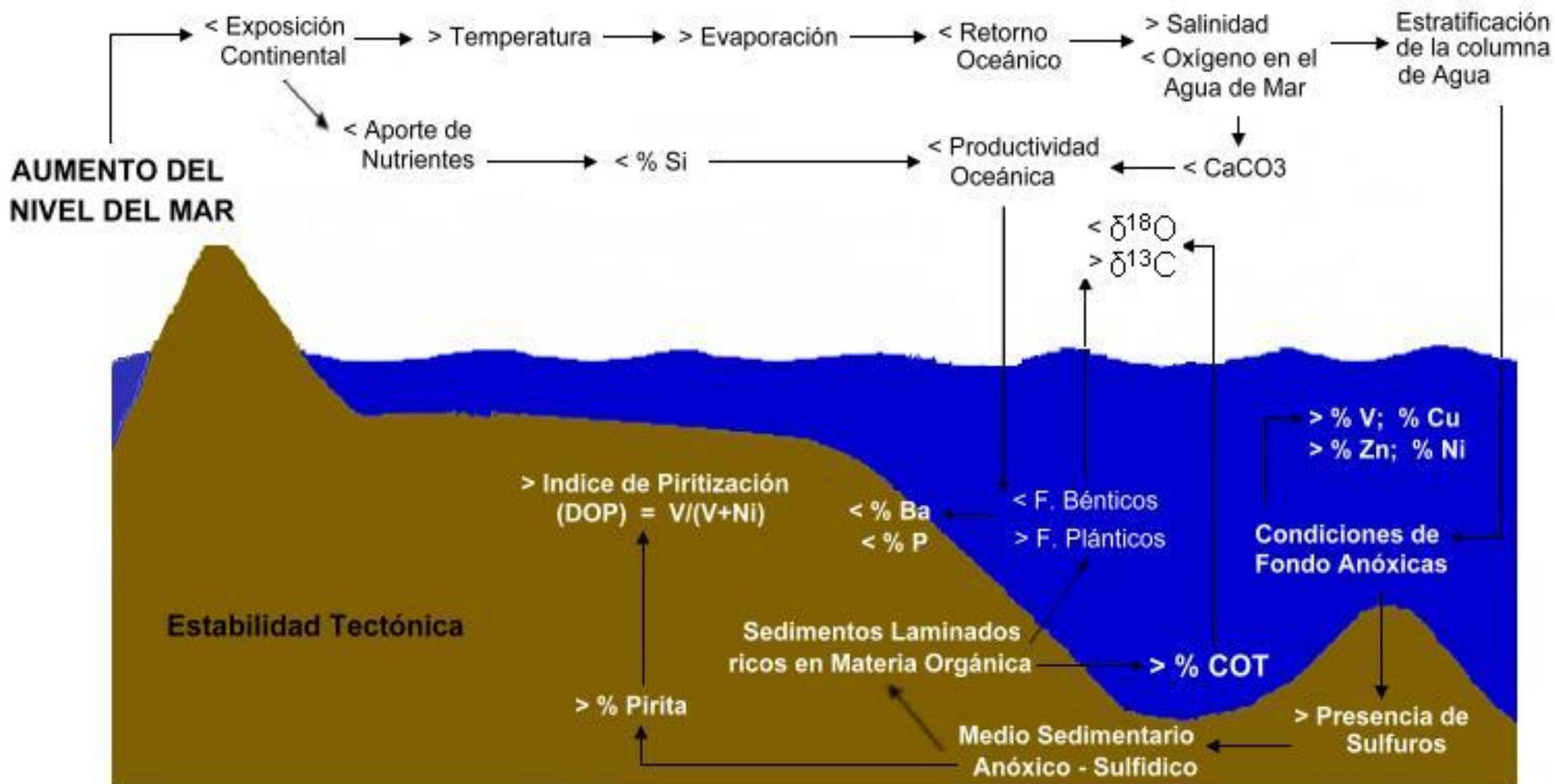


Figura 102, Procesos geoquímicos que intervienen dentro de un evento transgresivo anóxico para que se produzca la concentración de la materia orgánica, tomado y modificado de Jarvis I. (2000)

REGRESIÓN

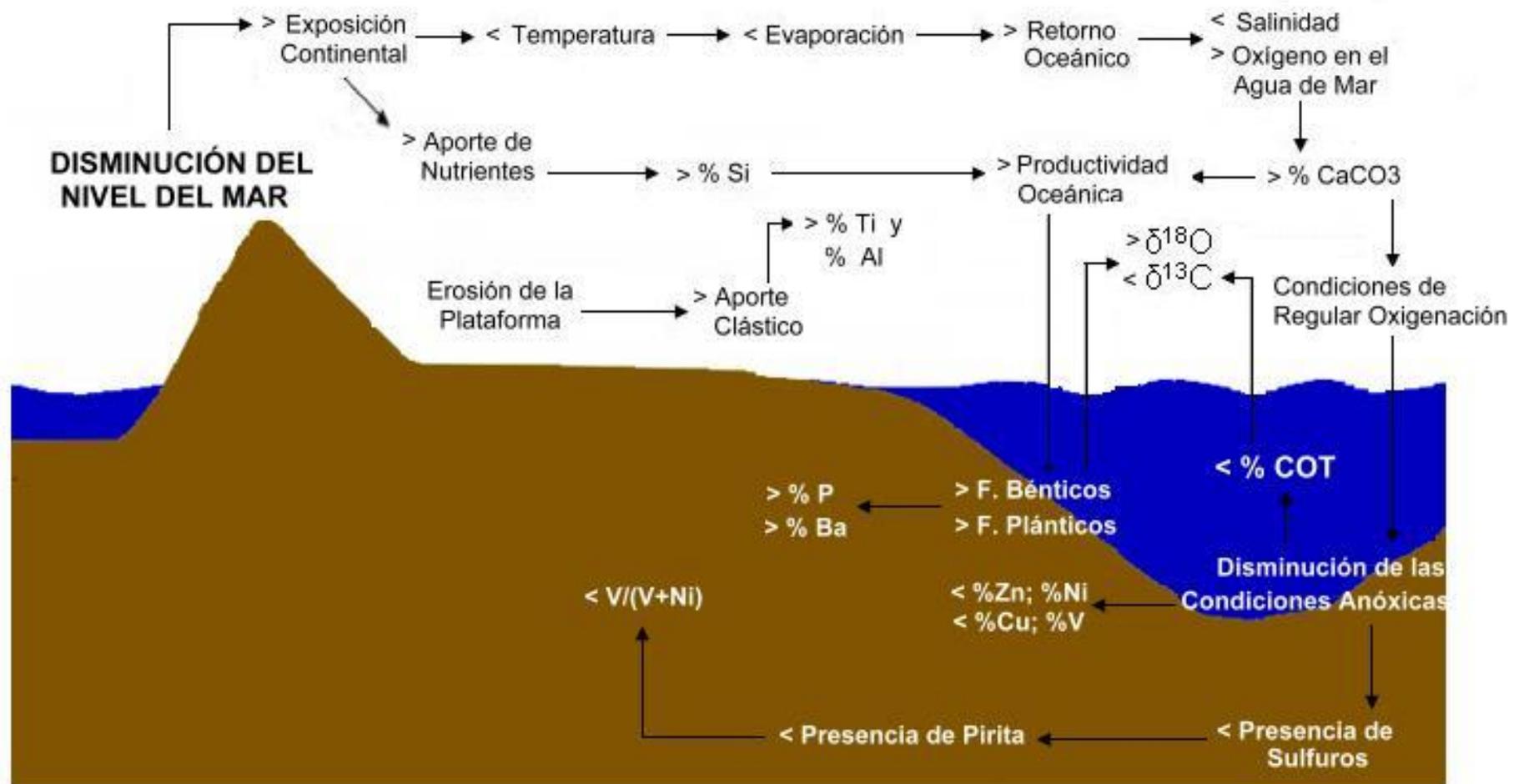


Figura 103, Procesos geoquímicos que intervienen dentro de un evento regresivo, tomado y modificado de Jarvis I. (2000)

Igualmente bajo tales condiciones sedimentarias y ambientales se han reconocido alrededor del mundo rocas (ver Figura 104), las cuales se denominan “*black shales*”, las cuales se han generado bajo la interacción de eventos anóxicos acontecidos durante el Cretácico, este tipo de roca son de gran importancia debido a su gran potencial generador de hidrocarburos.

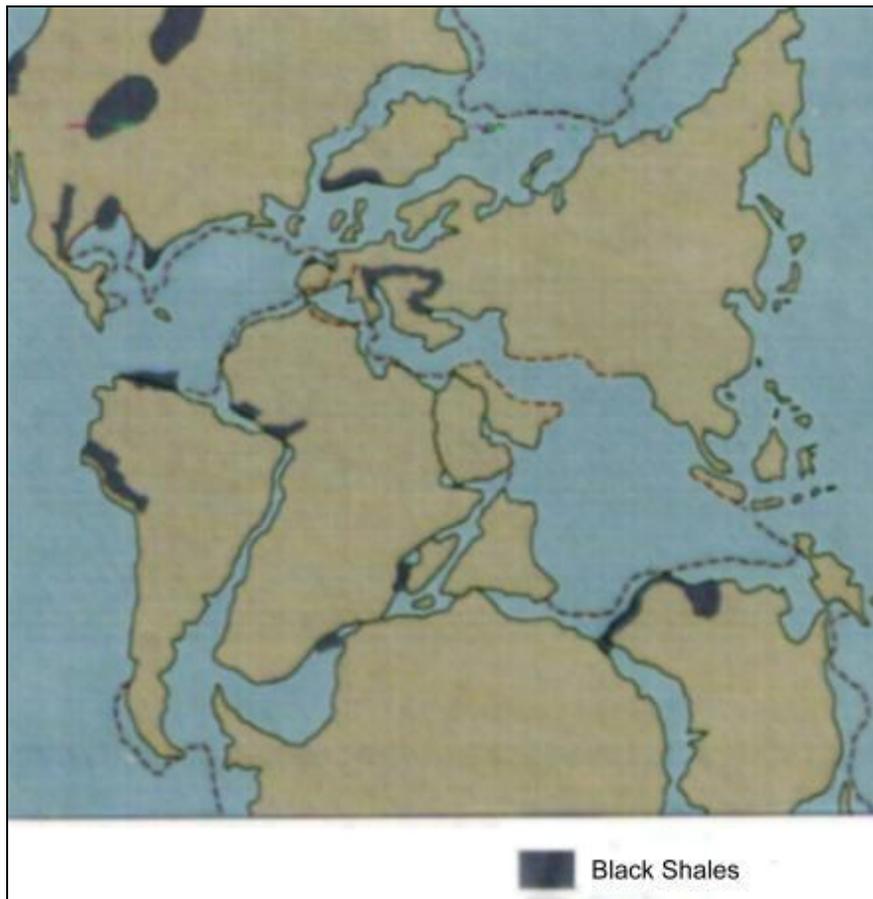


Figura 104, Ubicación de las “*black shales*” alrededor del mundo durante el Cretácico tardío, tomado y modificado de Stanley S. (1999).

CONCLUSIONES

Gran parte de los hidrocarburos producidos y aún existentes en la cuenca de Maracaibo, provienen de las rocas madre de la Formación La Luna, la cual se depositó durante gran parte del Cretácico en el occidente de Venezuela, período en el cual existieron una serie de condiciones climáticas y ambientales que permitieron la concentración de la materia orgánica aportada a la cuenca que posteriormente se convirtieron en hidrocarburos.

Del conocimiento de la existencia de hidrocarburos en la cuenca de Maracaibo, surge la finalidad de este estudio, el cual consistió en el intento de dilucidar todas aquellas características tanto químicas como ambientales que se presentaron durante la depositación de los sedimentos que conforman la Formación La Luna y que permitieron la concentración de gran cantidad de materia orgánica, mediante la aplicación de la herramienta geoquímica.

Los análisis aquí realizados están basados en diversos trabajos de la misma índole realizados en varias localidades a nivel mundial, tanto en sedimentos de épocas pasadas como recientes, donde se tiene un conocimiento certero de las condiciones químicas y ambientales de la cuenca donde se depositan los sedimentos tales sedimentos.

A partir de las interpretaciones realizadas conjuntamente con los datos aportados en otros trabajos se pudieron identificar las siguientes características:

- Mediante el estudio de los distintos modelos paleogeográficos planteados, se establece como la cuenca Cretácica del occidente de Venezuela se desarrolló en un margen pasivo con subsidencia de tipo termal, esta cuenca presenta un fondo marino irregular junto con antiguas zonas de expansión o surcos paralelas entre sí, las cuales constituyen áreas más deprimidas y donde se depositaron la mayor cantidad de sedimentos, estas áreas están limitadas por accidentes topográficos que actuaron como barreras que impidieron la normal circulación de las aguas dentro de la cuenca, estas áreas definidas como subcuencas presentaron estas características (Machiques, Uribante y Lara – Trujillo).
- Los sedimentos que conforman las rocas de la Formación La Luna en las secciones de Flor de Patria y San Pedro del Río, presentan composiciones químicas similares, lo que implica que aunque estos fueron depositados en subcuencas distintas (Lara – Trujillo y Uribante, respectivamente) presentaron una misma fuente de aporte.
- Al poseer ambas secciones la misma fuente de aporte y al estar ambas dentro del mismo rango de edad (Cretácico tardío), se interpreta como

ambas secciones estuvieron sometidas a condiciones de meteorización química.

- Debido a las condiciones restringidas que presentaron las subcuencas, éstas tuvieron poco intercambio con aguas superficiales, lo que provocó la disminución del contenido de oxígeno típico de una cuenca anóxica. Por lo tanto, las características de estas subcuencas coincidirán con el modelo de cuenca anóxica cerrada comúnmente llamada cuenca tipo “**Mar Negro**”.
- En general debido a la existencia de un intervalo transgresivo durante el Cretácico tardío, donde se presentó un clima cálido (entre 15 y 20 °C por encima de las temperaturas actuales), provocando alta evaporación en las aguas, generando un incremento de la salinidad de las aguas, donde las más salinas y densas se ubican al fondo de la cuenca, produciendo esto la estratificación de la columna de agua. Debido a la baja circulación de las aguas en la cuenca, las capas ubicadas al fondo presentaron un escaso contenido de oxígeno, culminando de esta manera el proceso de establecimiento de facies anóxicas, las cuales se presentaron durante la depositación de la Formación La Luna. La anoxicidad de la cuenca no fue continua durante todo el Cretácico tardío, ya que durante esta época se presentaron pulsos regresivos y transgresivos que provocaron la intensificación o disminución de estas condiciones, viéndose esto reflejado en el registro sedimentario.

- A partir de los análisis geoquímicos y mediante la calibración bioestratigráfica realizada para ambas secciones se pudieron reconocer distintos intervalos con características ambientales contrastantes, las cuales pueden ser descritas de la siguiente manera:

CENOMANIENSE TARDÍO – CONIACIENSE TEMPRANO (Intervalo I,
sección de Flor de Patria):

- Condiciones de moderada oxigenación (disóxicas), lo que produce escasa concentración de materia orgánica y regular precipitación de CaCO_3 .
- Debido a la existencia de clima cálido con bajas precipitaciones, el aporte de finos fue bajo durante este intervalo.
- Gracias a la regular oxigenación y bajo aporte de finos presente en el medio sedimentario, se producen las condiciones necesarias para que se genere una buena productividad orgánica, con alta presencia de foraminíferos plánticos y baja existencia de bénticos, debido a insuficiente oxigenación del fondo de cuenca.

CONIACIENSE TARDÍO – SANTONIENSE TEMPRANO (Intervalo II
sección de Flor de Patria e **Intervalo I** para la sección de San Pedro del
Río):

- Debido a las condiciones climáticas previamente existentes se establecen condiciones anóxicas hacia el fondo de la cuenca, las cuales permitieron mayor concentración de materia orgánica.

- Como consecuencia de la estratificación de la columna de agua y la inexistente circulación de la misma, las condiciones anóxicas solo fueron efectivas hacia el fondo de la cuenca, ya que hacia las capas más superficiales se reportaron otras condiciones, las cuales son resultado del inicio de cambios climáticos en el occidente de Venezuela, los cuales variaron los patrones de sedimentación en la cuenca, entre los que se puede mencionar: un aumento de la pluviosidad que induce un rejuvenecimiento del aporte fluvial a la cuenca, lo cual se ve reflejado en un incremento significativo del aporte de finos, aunque determinado aumento puede ser influenciado por un aporte de origen volcánico.

- El cambio del patrón sedimentario en la cuenca produjo que durante este intervalo, se reportara un baja productividad primaria, como consecuencia del aumento de la turbidez de las aguas, viéndose esto reflejado en la baja existencia de foraminíferos plánticos, al igual que de béticos debido a la existencia de condiciones anóxicas en la cuenca.

SANTONIENSE TEMPRANO – SANTONIENSE TARDÍO (Intervalo II, sección de San Pedro del Río):

- Dentro de este intervalo resalta la existencia de condiciones cíclicas de anoxia / disoxia, producto de la acción progresiva de las corriente “*upwelling*”, de igual manera dentro de estos períodos de carácter cíclico resalta la existencia de un alto aporte de nutrientes a la cuenca, lo cual provoca un incremento significativo de la actividad orgánica en estos períodos.

- En este intervalo se reporta una intensificación de la actividad volcánica en las áreas próximas a la cuenca, de igual manera se reconocen períodos de actividad hidrotermal.

- A partir de las características litológicas, químicas y orgánicas reconocidas, se puede reconocer como el ambiente sedimentario donde se depositó la Formación La Luna es de tipo ANÓXICO – SULFÚRICO.

BIBLIOGRAFÍA

ABELSON, P. H. (1967). *Research in Geochemistry.* Editorial Wiley ; New York, N.Y., V – 1; p. 511 – 563.

ALBERDI M. & MARTINEZ M., (1999) *Introducción a la Quimioestratigrafía y la Geoquímica de Yacimientos,* Facultad de Ciencias, Escuela de Geoquímica. UCV. Inédito.

ALBERDI M. & TOCCO R., (1999) *Trace Metals and Organic Geochemistry of the Machiques Member (Aptian – Albian) and La Luna Formation (Cenomanian – Campanean), Perija Range, Venezuela.* Chemical Geology 160 p. 19 – 38. Elsevier Science.

ANDREWS D. & KOKES R., (1964) *Química Fundamental.* Editorial Limusa – Wiley S.A., México D.F. 656 pp.

ARTHUR M. & SCHLANGER S., (1979) *Cretaceous “Oceanic Anoxic Events” as Causal Factor in Development of Reef – Reservoir Giant Oil Fields.* AAPG Bulletin V. 63, N° 6 p. 870 – 885.

BERNER ROBERT A., (1981) *A New Geochemical Classification of Sedimentary Environments.* Journal of Sedimentary Petrology Vol. 57 N° 02 p. 359 – 365.

BEUS A. A. (1976) *Geochemistry of the Lithosphere*. Ediciones MIR; Moscú URSS; 670 pp.

BRICEÑO H. & CALLEJON A., (2000) *Chemostratigraphic Correlation of the Source Rock in the La Luna – K/T (!) Petroleum System in Southwestern Venezuela*. SEPM Research Conference “Paleogeography and Hydrocarbon Potential of La Luna Formation and Related Cretaceous Anoxic System”. Caracas Venezuela.

COONEY P. & LORENTE M.A., (1997) *Implicaciones Tectónicas de un Evento Estructural en el Cretácico Superior (Santoniense – Campaniense) de Venezuela Occidental*. VIII Congreso Geológico Venezolano; Tomo I, p. 195 – 204.

CRESPO DE CABRERA S., JARVIS I., (2000) *Biostratigraphy, chemostratigraphy and palaeoenvironments of Cretaceous petroleum source rocks, western and eastern Venezuela basins*. SEPM Research Conference “Paleogeography and Hydrocarbon Potential of La Luna Formation and Related Cretaceous Anoxic System”. Caracas Venezuela.

DAVIS C., PRATT L., SLITER W., MOMPART L., MURAT B., (1999) *Factors Influencing Carbon and Trace Metals Accumulation in the Upper Cretaceous La Luna Formation of the Western Maracaibo Basin, Venezuela*. Geological Society of America. Special Paper 332, p. 203 – 203.

DRZEWIECKI P. & SIMO J.A., (1997) *Carbonate Platform Drowning and Oceanic Anoxic Events on a Mid – Cretaceous Carbonate Platform South – Central Pyrenees. Spain.* Journal of Sedimentary Research; Vol. 67. N° 04; p. 698 – 714.

ERLICH R.N., MACSOTAY O., NEDERBRAGT A.J., LORENTE M.A. (2000) *Paleoceanography, Paleoecology and Depositional Environments of Upper Cretaceous Rocks of Western Venezuela;* Vrije University . p. 41 – 82.

ERLICH R.N., PLAMER – KOLEMAN S.E., LORENTE M.A., (2000) *Geochemical Characterization of Oceanographic and Climatic Changes. Recorded in Upper Albian to Lower Maastrichtian Strata, Western Venezuela.* Vrije University; p. 91 – 125.

GARCIA JARPA F., MEDINA C., ODREMAN O., SANCHEZ T., USECHE A., GOSH S., RONDON F., FIERRO I., SAMPOL M., BENEDETTO G., (1980) *Correlación Estratigráfica y Síntesis Paleoambiental del Cretácico de los Andes Venezolanos.* Ministerio de Energía y Minas (MEM). Dirección General Sectorial de Minas y Geología; Boletín de Geología, Vol. XIV N° 26; p. 03 – 88.

GONZALEZ DE JUANA C., PICARD X., ITURRALDE M., (1980) *Geología de Venezuela y sus Cuencas Petrolíferas;* Ediciones FONINVES, Caracas – Venezuela, 1021 pp.

GONZALEZ F., (1982) *Introducción a la Geoquímica*. Secretaría General de la Organización de Estados Americanos (OEA). Programa Regional de Desarrollo Científico. Washington D.C., USA. 186 pp.

JARVIS IAN. (2000) *Chemostratigraphy, Paleoenvironmental Change and Global Correlation of Cretaceous Sequences*. School of Geological Sciences, Centre for Earth & Environmental Science Research, Kingston University. UK

LEV S., (1998) *A Petrographic Approach for Evaluating Trace – Elements Mobility in Black Shales*. Journal of Sedimentary Research, Vol. 68; N° 05; p. 970 – 980.

MADRID ISIRIS (2001) *Caracterización Bioestratigráfica por Métodos Petrográficos de la Formación La Luna, Sección de Flor de Patria en el Occidente de Venezuela, Edo. Trujillo. Trabajo Especial de Grado, UCV, Facultad de Ingeniería, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Departamento de Geología, Inédito.*

MANSON B., (1960) *Principios de Geoquímica*. Editorial A. Muir, Londres Inglaterra, 378 pp.

MAYNARD J. BARRY (1982) *Extension of Berner's "New Geochemical Classification of Sedimentary Environments" to Ancient Sediments.* Journal of Sedimentary Petrology. Vol. 52; N° 04, p. 1325 – 1331.

MEYERS S., SAGEMAN B., HINNOV L., (2001) *Integrated Quantitative Stratigraphy of the Cenomanian – Turonian, Bridge Creek Limestone Member Using Evaluative Harmonic Analysis and Stratigraphic Modelling.* Journal of Sedimentary Research, Vol. 71, N° 04; p. 628 – 644.

MONGENOT T., TRIBOVILLARD N., DESPRAIRIES A., VERGÉS E., DEFARGE F., (1996) *Trace Elements as Paleoenvironmental Markers in Strongly Mature Hydrocarbon Source Rocks: The Cretaceous La Luna Formation of Venezuela.* Sedimentary Geology, Vol. 103 Elsevier Science, p. 23 – 27.

PARNAUD F., GOU Y., PASCUAL J.C., CAPELLO M.A., TRUSKOWSKI I., PASSALACQUA H., (1995) *Stratigraphic Synthesis of Western Venezuela.* Petroleum Basin of South America, AAPG Memoir 62, p. 681 – 698.

PETERS K.E., (1986) *Guidelines for Evaluating Petroleum Source Rocks Using Programmed Pyrolysis.* AAPG Bulletin Vol. 70; N° 03, p. 318 – 329.

SAITO S., (1998) *Major Trace Elements Geochemistry of Sediments from East Greenland, Continental Rise, an Implication for Sediments Provenance and*

Source Area Weathering. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results 152, p. 19 – 28.

STANLEY STEVEN M., (1999) *Earth System History*. 2° Edición, Editorial Freeman; USA. 1238 pp.

VERA J., (1994) *Estratigrafía: Principios y Métodos*. Editorial Rueda. Madrid, España; 806 pp.

VILLAMIL & PINDELL (1998) *Mesozoic Paleogeographic Evolution of Northern South America. Foundation of Sequence Stratigraphic Studies in Passive Margin Strata Deposited During Non – Glacial Times*. SEPM Special Publication N° 58, p. 32 – 45.

VINE J.D., & TOURTELOT E.B., (1970) *Geochemistry of Black Shales Deposits* Summary Report – Economic Geology, N° 65, p. 253 – 257.

WEDEPOHL K.H., (1971) *Environmental Influences on the Chemical Composition of Shales and Clays*. Physics and Chemistry of the Earth. Vol. 8, Pergamon Press, p. 305 – 335.

ZAPATA E., REY O., PADRON V., LORENTE M.A., TRUSKOWSKI I., (2000) *Isotopic Characterization of the La Luna Formation (late Turonian – Campanian) in Mesa Bolívar and Las Hernández Sections, Mérida and*

Táchira Status. SEPM Research Conference “Paleogeography and Hydrocarbon Potential of La Luna Formation and Related Cretaceous Anoxic System”. Caracas Venezuela.