

**CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA Y ESTRATIGRAFICA DEL  
INTERVALO PALEOCENO SUPERIOR PARA UNA TRANSECTA  
ENTRE EL POZO COPORO-1 y GIBRALTAR-1,  
PIEDEMONTES LLANEROS.**

**FABIAN ARMANDO GONZALEZ SANCHEZ  
GIOVANNY JIMENEZ DIAZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE GEOLOGÍA  
BUCARAMANGA  
2005**

**CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA Y ESTRATIGRAFICA DEL  
INTERVALO PALEOCENO SUPERIOR PARA UNA TRANSECTA  
ENTRE EL POZO COPORO-1 y GIBRALTAR-1,  
PIEDEMONTE LLANERO.**

**FABIAN ARMANDO GONZALEZ SANCHEZ  
GIOVANNY JIMENEZ DIAZ**

Trabajo de Grado para optar al título de Geólogo

**DIRECTOR**

Ph. D. Luís Carlos Mantilla Figueroa  
Director UIS

**CODIRECTORES**

M. Sc. Antonio Vicente Rangel  
Codirector ICP

M. Sc. Jorge Luís Rubiano Ortiz  
Codirector ICP

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE GEOLOGÍA  
BUCARAMANGA**

**2005**

## **DEDICATORIA**

Quiero dedicar estas líneas a la gran complicidad de la vida, por permitirme estar en el momento preciso y en el espacio justo aportando a cada minuto y en todo momento enseñanzas y experiencias.

No menos importante, también quiero dedicar este esfuerzo a mi MADRE, siempre infatigable, que con su gran empuje y constante dedicación permitió este nuevo logro. Además, a mi Padre Félix y hermanos; Mauricio, Mónica y La Nena por su inagotable paciencia y solidaridad para con este propósito. Por último, desearía mencionar de manera muy especial a mi novia Milena y por supuesto a Susanita y decirles a todos aquellos que tanto directa como indirectamente construyeron esta ilusión ¡muchas Gracias!

**Fabián Armando**

Dedicado a mis viejos, mis abuelas, mis hermanos y amigos; Alejandro, Julio Cesar, Jorge, Jose, Erwin, Olivia, Valentina, Luz Helena y a la memoria de Oscar Araujo.

**Giovanny**

## **AGRADECIMIENTOS**

Expresamos nuestros más sinceros agradecimientos a:

Profesor Luís Carlos Mantilla Figueroa, director UIS, por su constante confianza, apoyo y sugerencias durante todo este trabajo.

Antonio Vicente Rangel y Jorge Rubiano, codirectores ICP, por habernos guiado a lo largo de este proyecto.

Ademas queremos hacer extensivo este reconocimiento a ECOPETROL – ICP, UIS y la Escuela de Geología por facilitarnos todas las herramientas logísticas tecnológicas y administrativas que dieron lugar a la culminación a feliz término de este proyecto.

## CONTENIDO

Pág.

### RESUMEN

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1</b>	<b>LOCALIZACION DEL ÁREA DE ESTUDIO .....</b>	<b>2</b>
<b>1.2</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>2</b>
1.2.1	General.....	2
1.2.2	Específicos .....	2
<b>1.3</b>	<b>METODOLOGÍA .....</b>	<b>4</b>
1.3.1	Recopilación de Información.....	4
1.3.2	Selección de Información Geoquímica y Análisis de Laboratorio .....	5
1.3.3	Modelo Cronoestratigráfico .....	5
1.3.4	Caracterización, Integración e Interpretación de Datos.....	6
1.3.5	Edición del Informe Final: .....	6
<b>2</b>	<b>ANTECEDENTES.....</b>	<b>7</b>
<b>2.1</b>	<b>MARCO GEOLÓGICO REGIONAL.....</b>	<b>11</b>
2.1.1	Estratigrafía.....	11
2.1.2	Geología Estructural .....	16
2.1.3	Geoquímica .....	28
<b>3</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>35</b>
<b>3.1</b>	<b>CARACTERIZACIÓN ESTRATIGRÁFICA.....</b>	<b>35</b>
3.1.1	Metodología Empleada .....	35
3.1.2	Definición de Ciclos Estratigráficos .....	36
3.1.3	Ciclos Estratigráficos Paleoceno Superior.....	39
3.1.4	Síntesis Estratigráfica .....	53
<b>3.2</b>	<b>CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN GEOQUIMICA .....</b>	<b>56</b>
3.2.1	Pirolisis Seca Tipo “Rock-Eval” .....	56

3.2.2	Carbono Orgánico Total.....	57
3.2.3	Parámetros Generales de Interpretación.....	57
3.2.4	Geoquímica Paleoceno Superior.....	59
3.2.5	Síntesis Geoquímica .....	77
3.2.6	Correlación Entre Parámetros Estratigráficos y Geoquímicos .....	80
<b>4</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>91</b>
<b>5</b>	<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>94</b>

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Mapa de localización del área .....	3
Figura 2. Columna estratigráfica generalizada del area de estudio. ....	12
Figura 3. Ambiente de depositación de la Formación Barco. ....	13
Figura 4. Ambiente de depositación de la Formación Los Cuervos. ....	15
Figura 5. Ambiente de depositación de la Formación Mirador. ....	16
Figura 6. Ambiente tectónico y principales estructuras en la esquina Nor-Occidental de Suramérica. ....	19
Figura 7. Corte estructural representativo del área de estudio. ....	20
Figura 8. Principales rasgos estructurales en la Zona del Piedemonte y la Cuenca de los Llanos. ....	24
Figura 9. Modelo de evolución tectónica de la Cordillera Oriental, VMM y Llanos Orientales. ....	29
Figura 10. Mapa del contenido de materia orgánica para la Formación Barco-Los Cuervos en la región central del Piedemonte y Cuenca de los Llanos. ....	31
Figura 11. Comportamiento geoquímico, reflectancia de la vitrinita en la región central del Piedemonte y la Cuenca de los Llanos para la Formación Barco-Los Cuervos. ....	31
Figura 12. Relación entre el Índice de Hidrógeno y el Tmax de muestras de la Formación Los Cuervos para los pozos Gibraltar-1, Dele-1, Tocaría-1 y Tamara-1. ....	32

Figura 13.	Diagrama tipo Van Krevelem para muestras de la Formación Los Cuervos para los pozos Gibraltar-1, Dele-1, Tocaría-1 y Tamara-1. ....	33
Figura 14.	Diagrama de S2 Vs %COT para muestras de la Formación Los Cuervos para los los pozos Gibraltar-1, Dele-1, Tocaría-1 y Tamara-1. ....	33
Figura 15.	Mapa de madurez Termal (%Ro promedio) para la Formación Barco-Los Cuervos en la region central de la Cuenca. ....	34
Figura 16.	Representación gráfica de un ciclo estratigráfico. ....	37
Figura 17.	Secuencias genéticas básicas. ....	39
Figura 18.	Comportamiento de espesores de litofacies lodosas y arenosas para el intervalo Paleoceno Superior, a lo largo de la transecta. ....	54
Figura 19.	Carta Cronoestratigráfica del intervalo Paleoceno Superior, para la transecta de estudio. ....	55
Figura 20.	Histograma de la distribución del Contenido de Materia Orgánica en muestras del intervalo Paleoceno Superior, Pozo Coporo – 1. ....	60
Figura 21.	Histograma de la distribución de Tmax en muestras del intervalo Paleoceno Superior, Pozo Coporo – 1. ....	60
Figura 22.	Histograma de la distribución de Kerógeno en muestras del intervalo Paleoceno Superior, Pozo Coporo – 1. ....	61
Figura 23.	Histograma de la distribución del Contenido de Materia Orgánica en muestras del intervalo Paleoceno Superior, Pozo Buenos Aires – 3. ....	62
Figura 24.	Histograma de la distribución de Tmax en muestras del intervalo Paleoceno Superior, Pozo Buenos Aires – 3. ....	63

Figura 25.	Histograma de la distribución de Kerogeno en muestras del intervalo Paleoceno Superior, Pozo Buenos Aires – 3. ....	63
Figura 26.	Histograma de la distribución del Contenido de Materia Orgánica en muestras del intervalo Paleoceno Superior, Pozo Cusiana – 5. ....	64
Figura 27.	Histograma de la distribución de Tmax en muestras del intervalo Paleoceno Superior, Pozo Cusiana – 5. ....	64
Figura 28.	Histograma de la distribución de Kerógeno en muestras del intervalo Paleoceno Superior, Pozo Cusiana – 5. ....	65
Figura 29.	Histograma de la distribución del Contenido de Materia Orgánica en muestras del intervalo Paleoceno Superior, Pozo La Cabaña – 1. ....	66
Figura 30.	Histograma de la distribución de Tmax en muestras del intervalo Paleoceno Superior, Pozo La Cabaña – 1. ....	66
Figura 31.	Histograma de la distribución de Carbono Organico Total en muestras del intervalo Paleoceno Superior, Pozo Tocoragua – 1. ....	67
Figura 32.	Histograma de la distribución de Tmax en muestras del intervalo Paleoceno Superior, Pozo Tocoragua – 1. ....	68
Figura 33.	Histograma de la distribución de kerógeno en muestras del intervalo Paleoceno Superior, Pozo Tocoragua – 1. ....	68
Figura 34.	Histograma de la distribución de Carbono Organico Total en muestras del intervalo Paleoceno Superior, Pozo Arauca – 1. ....	69
Figura 35.	Histograma de la distribución de kerógeno en muestras del intervalo Paleoceno Superior, Pozo Arauca – 1. ....	70
Figura 36.	Histograma de la distribución de Carbono Organico Total en muestras del intervalo Paleoceno Superior, Pozo Arauca – 2. ....	71

Figura 37.	Histograma de la distribución de kerógeno en muestras del intervalo Paleoceno Superior, Pozo Arauca – 2. ....	71
Figura 38.	Histograma de la distribución de Carbono Organico Total en muestras del intervalo Paleoceno Superior, Pozo Arauca – 3. ....	72
Figura 39.	Histograma de la distribución de Tmax en muestras del intervalo Paleoceno Superior, Pozo Arauca – 3. ....	72
Figura 40.	Histograma de la distribución de kerógeno en muestras del intervalo Paleoceno Superior, Pozo Arauca – 3. ....	73
Figura 41.	Histograma de la distribución de Carbono Organico Total en muestras del intervalo Paleoceno Superior, Pozo Arauca – 4. ....	74
Figura 42.	Histograma de la distribución de Tmax en muestras del intervalo Paleoceno Superior, Pozo Arauca – 4. ....	75
Figura 43.	Histograma de la distribución de kerógeno en muestras del intervalo Paleoceno Superior, Pozo Arauca – 4. ....	75
Figura 44.	Diagrama modificado de Van Krevelen que muestra el Tipo de Kerógeno predominante, para los pozos Tocaragua – 1, Arauca – 2 y Arauca – 4. ....	76
Figura 45.	Histograma de la distribución de Carbono Organico Total en muestras del intervalo Paleoceno Superior, Pozo Gibraltar - 1. ....	77
Figura 46.	Comportamiento de %COT a lo largo de la transecta de estudio. ....	78
Figura 47.	Comportamiento de Tmax a lo largo de la transecta de estudio. ....	78
Figura 48.	Comportamiento del tipo de Kerogeno a lo largo de la transecta de estudio. ....	80
Figura 49.	Principales parámetros estratigráficos y geoquímicos para el intervalo Paleoceno Tardío, pozo Coporo – 1. ....	81

Figura 50.	Principales parámetros estratigráficos y geoquímicos para el intervalo Paleoceno Tardío, pozo Buenos Aires – 3. ....	82
Figura 51.	Principales parámetros estratigráficos y geoquímicos para el intervalo Paleoceno Tardío, pozo Cusiana – 5. ....	83
Figura 52.	Principales parámetros estratigráficos y geoquímicos para el intervalo Paleoceno Tardío, pozo La Cabaña – 1. ....	84
Figura 53.	Principales parámetros estratigráficos y geoquímicos para el intervalo Paleoceno Tardío, pozo Tocaragua – 1. ....	85
Figura 54.	Principales parámetros estratigráficos y geoquímicos para el intervalo Paleoceno Tardío, pozo Arauca – 1. ....	87
Figura 55.	Principales parámetros estratigráficos y geoquímicos para el intervalo Paleoceno Tardío, pozo Arauca – 2. ....	86
Figura 56.	Principales parámetros estratigráficos y geoquímicos para el intervalo Paleoceno Tardío, pozo Arauca – 4. ....	89
Figura 57.	Principales parámetros estratigráficos y geoquímicos para el intervalo Paleoceno Tardío, pozo Arauca – 3. ....	88
Figura 58.	Principales parámetros estratigráficos y geoquímicos para el intervalo Paleoceno Tardío, Pozo Gibraltar – 1. ....	90

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Parámetros geoquímicos generales de las unidades litoestratigráficas de la zona central del Piedemonte de la Cuenca de los Llanos Orientales .....	30
Tabla 2. Intervalos del Paleoceno Superior.....	35
Tabla 3. Parámetros de interpretación de Carbono Orgánico Total (Tomado de Peter y Cassa, 1994).....	58
Tabla 4. Parámetros de interpretación de IH para la determinación del tipo de Kerógeno.....	58
Tabla 5. Parámetros de interpretación de Tmax.....	59

## LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Correlacion de la transecta Coporo 1 - Gigraltar 1 .....	Digital
Anexo B. Correlacion del sector de Arauca.....	Digital
Anexo C. Base de datos recopilada de geoquimica.....	Digital
Anexo D. Resultados de los analisis de COT.....	Digital
Anexo E. Resultados de los analisis de pirólisis.....	Digital

**TÍTULO: CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA Y ESTRATIGRÁFICA DEL INTERVALO PALEOCENO SUPERIOR PARA UNA TRANSECTA ENTRE EL POZO COPORO-1 y GIBRALTAR-1, PIEDEMONTES LLANERO.\***

Autores:

**FABIAN ARMANDO GONZALEZ SANCHEZ\*\***  
**GIOVANNY JIMENEZ DIAZ\*\***

**PALABRAS CLAVE:** Cuenca Llanos, Piedemonte Llanero, Cronoestratigrafía, Paleoceno Tardío, biozona, Geoquímica, COT, Tmax, IH.

**RESUMEN**

En este trabajo se realiza una caracterización geoquímica y estratigráfica para una transecta entre el pozo Coporo – 1 y Gibraltar – 1 que permita evaluar en sentido horizontal y vertical cambios faciales de tipo orgánico y litológico. Utilizando métodos de correlación estratigráfica como la Estratigrafía de Secuencias, Bioestratigrafía y pendientes depositacionales, se construyó un modelo cronoestratigráfico que fue caracterizado geoquímicamente. La interpretación secuencial se hizo utilizando ciclos de nivel base y para la calibración fósil del intervalo Paleoceno Superior se utilizó el patrón de biozonas palinológicas elaborado por Jaramillo *et al.* (2003). Se identificaron tres zonas con diferentes condiciones de preservación de materia orgánica y de registro litológico para el Paleoceno Superior, evidenciado en la variación lateral de las propiedades geoquímicas y la disparidad de espesores. Las mejores cualidades geoquímicas se localizan en la región Norte, con Carbono Orgánico Total (COT) entre (0,5 - >4%) e Índice de Hidrogeno (IH) (50-600 mgHC/g COT), en la región Central, con COT entre (0,0-2,0%) e IH (50-200 mgHC/g COT) y en la región Sur, con COT entre (0,0-0,5%) e IH (50-200 mgHC/g COT). Los mayores espesores correspondientes a facies lodolíticas se encuentran en la zona Central con valores promedio de 270 pies, donde a partir de esta área, las condiciones de preservación en dirección Norte y Sur disminuyen, con espesores promedio de 163 y 130 pies respectivamente. En general una roca madre potencial efectiva estaría localizada en la zona Centro de la transecta con predominio de kerógeno tipo III y una evolución termal que va desde madurez temprana hasta el pico de generación. En cuanto a la sedimentación de las unidades para este intervalo de tiempo, se deposita el total de la Formación Los Cuervos (biozona 24-1, 24-2 y la sección superior de la biozona 23), constituida por lodolitas con delgadas intercalaciones arenosas de origen continental, donde hacia el Norte de la transecta, la proporción de arenas se incrementa considerablemente. Para la Formación Barco se deposita la sección superior de esta unidad (biozona 22 y sección inferior de la biozona 23) y se compone de areniscas de buena continuidad lateral, esencialmente depositado en ambientes transicionales en la zona Central y Sur, y de tipo continental hacia la zona Norte

---

\* Trabajo de investigación.

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Geología, Director Luis Carlos Mantilla Figueroa

**TÍTULO: STRATIGRAPHICAL AND GEOCHEMICAL CHARACTERIZATION OF THE UPPER PALEOCENE IN THE ZONE BETWEEN COPORO-1 AND GIBRALTAR -1 WELLBORES, LLANOS FOOTHILL.\***

Authors:

**FABIAN ARMANDO GONZALEZ SANCHEZ\*\***  
**GIOVANNY JIMENEZ DIAZ\*\***

**Keywords:** Llanos Basin, Llanos Foothills, Crono-estratigrafic, Upper Paleocene, biozone, Geochemical, TOC, Tmax, HI.

**ABSTRACT**

In this work, a made geochemical and stratigraphical characterization for a line between Coporo-1 and Gibraltar1 well's, was stablished, in order to allow the evaluation of facial changes in horizontal and vertical directions of organic and litological features. Using methods of stratigrafical correlation like sequence stratigraphy, biostratigraphy and depositional slopes, we made a chrono-stratigraphic model which was geochemically characterized. The interpretation was made, using base level cycles, and also palinologic biozones, developed by Jaramillo *et al.* (2003), for the calibration of the upper Paleocene.

Three zones with different levels of preservation for the organic matter and litological record of the upper Paleocene, were identified, showing evidence of lateral changes of the geochemical properties and variations in thickness. Better geochemical qualities were found in the North zone, with total organic carbon values (TOC) between (0.5- >4%) and hydrogen index values (HI) between (50-600mgHC/g TOC), in the Central zone with TOC between (0,0-2,0%) and HI (50-200 mgHC/g TOC) and in the South region, with TOC between (0,0-0,5%) and HI (50-200 mgHC/g COT). The biggest thickness correspond to shale's facies ,were found in the Central zone, with average values of 270 feets, from which the levels of preservation in North address and South diminish, with averages thickness of 163 and 130 feets respectively. A possible source rock, could be located in the Central zone of the region, with predominance of land plants -derived kerogen (type III), and thermal evolution from early maturity to generation peak. For this time interval, the total of Los Cuervos Formation was deposited (biozone 24-1, 24-2 and the upper biozone 23) formed by shale and thin continental sandstones; in the North zone, the proportion of sandstone increase. The upper unit of Barco Formation was deposited, (biozone 22 and lower biozone 23) which spans, sandstones with a good lateral extension, deposited in transitional (Central and South regions) and continental (North zone) environments.

---

\* Trabajo de investigación.

\*\* Facultad de ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Geología, Director Luís Carlos Mantilla Figueroa.

---

## 1 INTRODUCCIÓN

---

Este documento es el resultado de un proyecto de grado llevado a cabo en la modalidad de investigación, el cual se desarrolló en el marco del convenio interinstitucional entre la Universidad Industrial de Santander (UIS) y ECOPETROL S.A.-ICP, (Convenio específico 003 de 2003). De igual manera, este trabajo de grado hace parte de un proyecto de mayor envergadura titulado: “Flujo regional de fluidos y migración de hidrocarburos (Colombia)”.

Recientes estudios en el Piedemonte Llanero, y en la Cuenca de los Llanos a cerca del origen de los hidrocarburos entrampados en la región; Mora *et al.* (2001, 2002, 2003), Rangel y Passos (2003) y Geoconsult Ltda.-Pangea Ltda. (2004, Reportado en Caro *et al.*, 2004), identifican un importante aporte de hidrocarburos de edad Cenozoico en los sistemas petrolíferos.

El Paleoceno Superior en la Cuenca de los Llanos y Piedemonte Llanero esta constituido por importantes volúmenes de material fino con potenciales características geoquímicas que permiten considerar este intervalo de tiempo como posible generador de hidrocarburos.

El presente trabajo pretende a partir de datos estratigráficos, palinológicos y geoquímicos del Paleoceno Superior, en diferentes pozos a lo largo del Piedemonte Llanero y Cuenca Llanos mediante una transecta Norte-sur, brindar herramientas conceptuales que permitan evaluar en sentido horizontal y vertical, cambios faciales de tipo orgánico y litológico a las unidades depositadas durante este intervalo de tiempo.

## 1.1 LOCALIZACION DEL ÁREA DE ESTUDIO

Geográficamente, el área de estudio comprende los departamentos: Arauca, Casanare y la parte Norte del Dpto. del Meta, sobre el costado oriental de la Cordillera Oriental. Geológicamente, se ubica principalmente a lo largo del Piedemonte Llanero y una parte en la Cuenca Llanos Orientales, en los sectores Norte y Central (Figura 1). La transecta está comprendida entre las coordenadas planas:

$X_1$ : 1'210.410  $Y_1$ : 1'270.754 Pozo Gibraltar - 1

$X_2$ : 1'089.400  $Y_2$ : 983.134 Pozo Coporo - 1

Adoptadas del sistema de coordenadas para Colombia (Esferoide Internacional 1904, proyección conforme de Gauss) con origen de coordenadas X: 1'000.000 Y: 1'000.000, del Observatorio Astronómico de Santa Fe de Bogotá D.C.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 General

✍ Realizar la caracterización geoquímica y estratigráfica del intervalo Paleoceno Superior a lo largo del Piedemonte Llanero y la Cuenca Llanos mediante una transecta Norte-Sur entre los pozos Coporo-1 y Gibraltar-1.

### 1.2.2 Específicos

✍ Análisis del Comportamiento sedimentológico y ambiental del intervalo Paleoceno Superior, de acuerdo a la información existente en Fajardo *et al.* (2000).

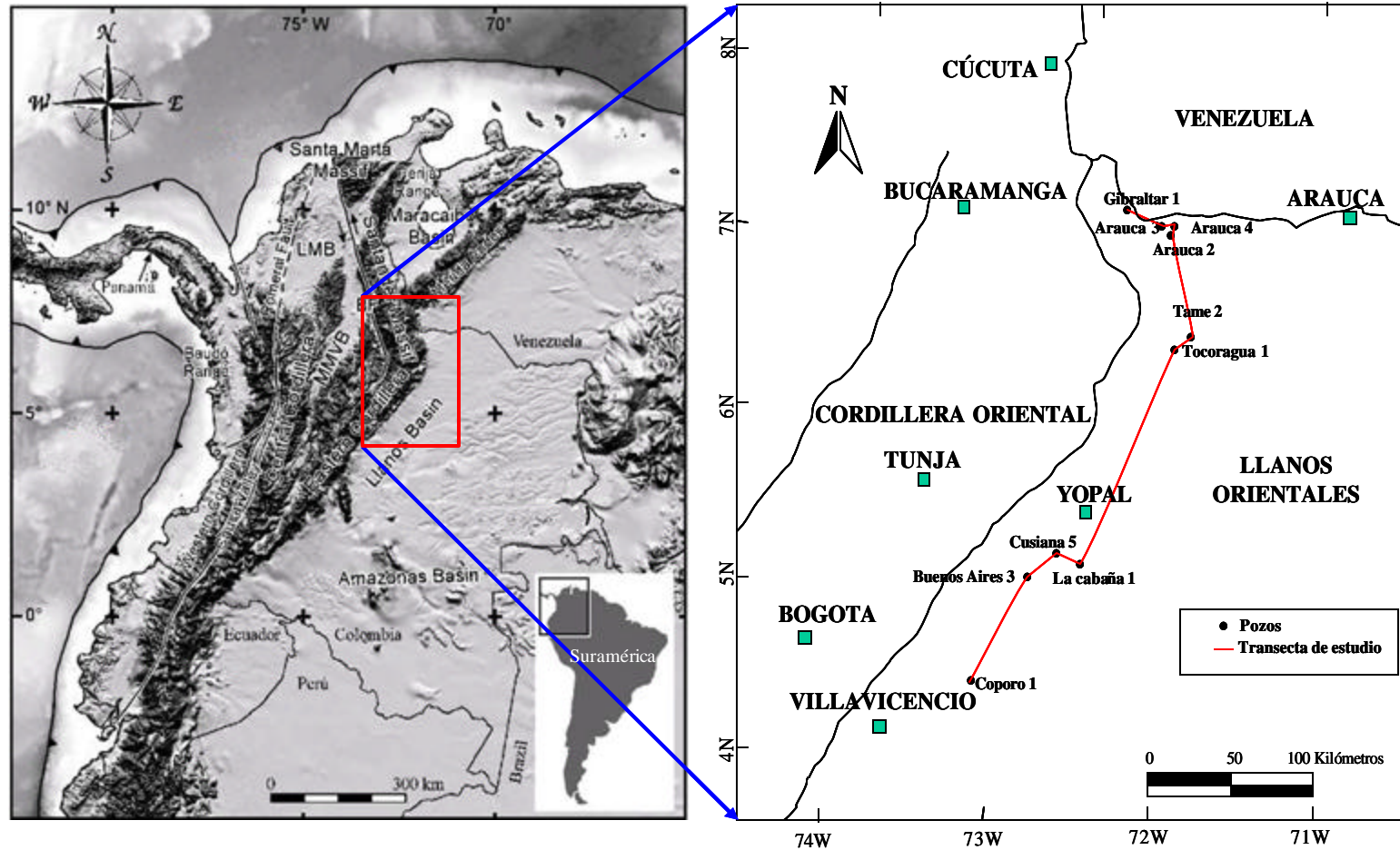


Figura 1. Mapa de localización del área, mostrando la transecta de estudio y sus respectivos pozos.

- ✍ Recopilación de información geoquímica existente del intervalo Paleoceno Superior y elaboración de una base de datos para este intervalo de tiempo.
- ✍ Realizar análisis geoquímicos en pozos carentes de información geoquímica para aportar al conocimiento geoquímico del Paleoceno Superior.
- ✍ Identificar patrones o tendencias sedimentológicas, ambientales y geoquímicas del intervalo Paleoceno Superior a lo largo de la transecta Norte-Sur.
- ✍ Determinar el potencial geoquímico del intervalo Paleoceno Superior como roca generadora en el Piedemonte Llanero y la Cuenca de los Llanos a lo largo de la transecta y sus posibles implicaciones en el sistema petrolífero.

## 1.3 METODOLOGÍA

Para el desarrollo y logro de los objetivos formulados se hizo un trabajo distribuido en las siguientes fases: 1) Fase de recopilación de Información, 2) Fase de selección de información geoquímica y análisis de laboratorio 3) Fase de desarrollo del modelo cronoestratigráfico 4) Fase de caracterización, integración e interpretación de datos estratigráficos y geoquímicos, 5) Edición del informe final.

### 1.3.1 Recopilación de Información

Esta etapa del proyecto comprende dos actividades: a) La primera, consiste en una revisión de la información palinológica, estratigráfica y geoquímica existente en la Cuenca (por ejemplo: en base de datos Panagon, base de datos geoquímica (Infologic), Centro de información técnica (CIT), Biblioteca UIS, Litoteca Nacional); y b) La segunda, la consecución de archivos digitales de registros de pozo y su respectiva carga en la plataforma de interpretación de Landmark.

### 1.3.2 Selección de Información Geoquímica y Análisis de Laboratorio

La información geoquímica recopilada se organizó en función de los datos analíticos que nosotros requerimos (COT, % de Carbono Orgánico Total; Tmax, Temperatura Máxima de Pirólisis; IH, Índice de Hidrógeno) y de acuerdo al intervalo en profundidad definido por palinología para cada pozo (Anexo C). La compilación del porcentaje de reflectancia de la vitrinita (Ro) se realizó de manera opcional.

En pozos o intervalos carentes de información geoquímica, se realizaron los análisis en el laboratorio para completar la información pertinente (Anexo D y E). Estos análisis se realizaron en las instalaciones del Instituto Colombiano del Petróleo (ICP) en el laboratorio del área de geoquímica. Los análisis incluyeron:

- ✍ Cantidad de materia orgánica, evaluada mediante el parámetro de Carbono Orgánico Total (COT), obtenido con el analizador LECO modelo WR 112.
- ✍ Calidad de la materia orgánica, evaluada mediante el parámetro Índice de Hidrógeno (IH) calculados a partir de los datos S2 y obtenidos de la pirolisis “Rock-Eval”, con el equipo de pirolisis Rock-Eval 6.
- ✍ Madurez termal, evaluada mediante el parámetro de Temperatura Máxima de Pirólisis (Tmax), obtenido a partir de la Pirolisis “Rock Eval”.

### 1.3.3 Modelo Cronoestratigráfico

En esta etapa se definió un modelo cronoestratigráfico a lo largo de la transecta, utilizando herramientas como la interpretación de ciclos de nivel base, la Bioestratigrafía, pendientes depositacionales, la Geoquímica, y la caracterización de las diferentes curvas (Gamma- Ray principalmente, SP, Neutrón y Density) realizado por Fajardo *et al.*, (2000), para la unidades correspondientes al intervalo Paleoceno Superior.

### **1.3.4 Caracterización, Integración e Interpretación de Datos Estratigráficos y Geoquímicos.**

Para esta fase se realizó una caracterización tanto geoquímica como estratigráfica. Además, se adelantó la correlación y comparación entre las facies litológicas, ciclos estratigráficos y los parámetros geoquímicos (COT, IH y Tmax). Para luego, con base a los datos estratigráficos y geoquímicos evaluar el comportamiento sedimentológico, ambiental y geoquímico del intervalo Paleoceno Superior a lo largo de la transecta y sus posibles implicaciones en el sistema petrolífero de la Cuenca.

### **1.3.5 Edición del Informe Final:**

Integración de resultados obtenidos en las diferentes fases del proyecto, síntesis de conclusiones, redacción, digitalización de gráficos y edición del informe final

---

## 2 ANTECEDENTES

---

Varios trabajos desde el punto de vista estratigráfico, bioestratigráfico y geoquímico se han elaborado en esta región:

Notestein *et al.* (1944), es el primero en definir la Formación Los Cuervos. La Sección Tipo, localizada en el área de la Concesión Barco, sobre la quebrada Los Cuervos, afluente del Río Catatumbo.

Van Der Hammen (1958b), estudio las Arcillas del Limbo (sinónimo de la Formación Los Cuervos en el Piedemonte), 2 Km. al NW del Morro sobre el Río Cravo Sur, Asignándole una edad Paleoceno a partir de información palinológica.

González (1967), realizó un estudio palinológico de la parte superior de la Formación Los Cuervos y Mirador en el campo Tibú, Cuenca del Catatumbo, datándola como Eoceno Inferior y medio respectivamente.

Fajardo *et al.* (1993), realiza un modelo estratigráfico, interpretando secuencialmente las unidades desde el Cretácico Tardío hasta el Eoceno Tardío en la zona del Casanare, asignándole una edad a la Formación Los Cuervos Como Paleoceno Tardío e identificando ambientes de planicies deltáicas y canales fluviales para este intervalo de tiempo.

Cooper *et al.* (1995), Realiza un estudio sobre la evolución tectono-estratigráfica de la Cuenca de los Llanos, Cordillera Oriental y Valle Medio del Magdalena, en donde plantea el inicio de la depositación de las formaciones Barco y Los Cuervos durante el Paleoceno Superior (60 M.a.).

Guerrero y Sarmiento (1996), realizan un estudio estratigráfico secuencial, sedimentológico y palinológico del Cretácico Superior y el Paleoceno del Piedemonte Llanero, sobre el Río Colorada (Dpto. de Boyacá), asignándole sobre una base palinológica a La Formación Socha Superior (equivalente a la Formación Los Cuervos en el Piedemonte), una edad correspondiente al Paleoceno Superior.

Vergara y Rodríguez (1997), realizan la unificación de las diferentes nomenclaturas litoestratigráficas presentes en la Cordillera Oriental, Piedemonte Llanero y Cuenca Llanos, correlacionando la Formación Los Cuervos con Socha Superior y Arcillas del Limbo.

Fajardo *et al.* (1998), realiza una evaluación integral del análisis ambiental y estratigráfico de registros de pozos, interpretación sísmica, análisis bioestratigráficos y análisis petrofísico para el intervalo Cretácico Tardío a Mioceno Medio en la región del Meta. En este estudio para la Formación Los Cuervos identifica depósitos de llanura aluvial correspondiente a una fase regresiva depositada durante una disminución en A/S (“*highstand sistem tract*”).

Jaramillo (1999), (en su tesis doctoral), desarrolla un estudio estratigráfico y palinológico del Paleógeno Medio en la sección Piñalerita sobre la quebrada del mismo nombre (cerca de Sabanalarga), utilizando la nomenclatura de Arcillas del Limbo para la Formación Los Cuervos, asignándole con información palinológica una edad correspondiente al Paleoceno Superior e interpretándola secuencialmente como un “*highstand system tract*”.

Fajardo *et al.* (2000), define el modelo de evolución estratigráfica para la Cuenca de los Llanos y Piedemonte Llanero para el intervalo Cretáceo Tardío a Mioceno Medio. En lo que respecta a la Formación Los Cuervos identifica electrofacies a partir de información de corazones en diferentes partes de la Cuenca determinando formas aserradas de embudo y de campana interpretándose como

depósitos arenosos de complejos de “*crevasse splay*” o rellenos de lago y depósitos lodosos de llanura de inundación o lacustres, respectivamente, asociados a ambientes de llanura costera superior sin ninguna influencia marina durante una disminución en la relación A/S.

Rangel *et al.* (2000), determina las propiedades geoquímicas en el Piedemonte Llanero Central de La Formación Barco-Cuervos definida por Fajardo *et al.* (2000), mediante una correlación estratigráfica y geoquímica, empleando los Pozos Anaconda-1, Coporo-1, Guavio-1, Buenos Aires-C-3 y La María-1.

Mora *et al.* (2001), realiza una caracterización geoquímica de muestras de roca de la secuencia perforada en los Pozos Floreña N-2F, Floreña-3F y Golconda-1. Los resultados de esta interpretación indican que el Pozo Floreña N2F presenta niveles con COT excelentes (4,00 – 8,00 %) con bajos niveles de índice de hidrógeno (200-320 mg HC/ g COT) para la Formación Los Cuervos. Para el Pozo Floreña-3F no se determinaron niveles generadores, y para el Pozo Golconda-1A se determinó un pobre potencial generador y niveles de materia orgánica bajos (1 – 2%). Además realiza evaluación de crudos a partir de extracción de bitumen, análisis de cromatografía líquida y gaseosa y biomarcadores determinando que la Formación Los Cuervos, se desarrolló en ambientes deltáicos proximales.

Mora *et al.* (2002), realiza un análisis de Carbono Orgánico Total y pirólisis “*Rock Eval*” a unas 450 muestras de zanja de pozos (Dele-1, Guacavía-1, Gibraltar-1, Llanos-1, Morichal-1, Pauto-2 ST, Tamara-1 y Tocaría-1) del Piedemonte y el “*Foreland*” de los Llanos Orientales, representativas de la sección estratigráfica desde el Cenomaniano (Formación Une), hasta el Oligoceno (Formación Carbonera). Los resultados analíticos arrojados para las muestras correspondientes a la Formación Los Cuervos en los pozos Gibraltar-1, Dele-1, Tocaría-1 y Tamara-1 se caracterizan por presentar rocas con contenido de materia orgánica pobre a bueno (COT= 0.5 -2%), un grado de madurez que varía

entre inmadura y generación temprana ( $T_{max} < 435-445$ ), y un potencial generador de pobre a bueno ( $PG = 0.5 - 8$  gHC/groca).

Mora C., (2003), realiza una evaluación de crudos y de la facies orgánicas generadoras de crudos para el Piedemonte y Cuenca Llanos, identificando facies marino deltáicos para el Paleógeno asociadas a la Formación Los Cuervos y resalta su relevancia como roca generadora en los sistemas petrolíferos, especialmente en el sector del Piedemonte Central y Norte de los Llanos.

Rangel y Passos (2003), realizaron la evaluación geoquímica de crudos en el Sur del Piedemonte y La Cuenca Llanos Orientales y Yarí Caguán que permitió diferenciar tres "grupos" o "familias" (Familia Tipo Suria, Familia Tipo Chichimene-Apiay, Familia Tipo Santiago-Guarimena) de crudos generados de rocas fuente con claras diferencias en cuanto al ambiente de origen. Determinando que La Familia Tipo Santiago-Guarimena pertenecientes a los crudos de los pozos Abejas, Santiago, Guarimena, Rancho Quemado, Sardinias, Tauramena y Medina tienen algún aporte de roca fuente de origen Paleógeno.

Geoconsult Ltda.-Pangea Ltda. (2004, Reportado en Caro *et al.*, 2004), realiza una interpretación en la región Central del Piedemonte y Cuenca Llanos haciendo una descripción detallada de las unidades litoestratigráficas presentes en el área, determinando su comportamiento regional mediante Mapas de Facies, Mapas de Paleocorrientes, Mapas Isocoros, Mapas Estructurales, Porcentaje de litologías y correlaciones estratigráficas.

Jaramillo *et al.* (2002, 2003), realiza un modelo bioestratigráfico en la región Central y Norte del Piedemonte Llanero que contiene la posición estratigráfica (referenciado límites formacionales), de aparición y desaparición de fósiles (Zonas palinológicas) a lo largo del tiempo geológico.

## 2.1 MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

### 2.1.1 Estratigrafía

La secuencia en el área de estudio comienza con rocas del Cretácico Inferior correspondientes a la Formación Une, luego se tienen rocas del Cretácico Superior correspondientes a las formaciones Chipaque y Guadalupe, y finaliza con rocas del Cenozoico correspondientes a las formaciones Barco, Los Cuervos, Mirador, León y Guayabo (Figura 2). Descripciones estratigráficas detalladas para las rocas Cretácicas y Cenozoicas aflorantes en el Piedemonte y La Cuenca de los Llanos se encuentran en Cooper *et al.* (1995), Fajardo *et al.* (1993; 1998 y 2000) y Geoconsult Ltda.-Pangea Ltda. (2004, Reportado en Caro *et al.*, 2004). A continuación se hace una breve descripción de unidades correspondientes al Paleógeno y particularmente a las secuencias depositadas durante el Eoceno y Paleoceno Superior. Este último objeto de estudio de este trabajo.

#### **Formación Barco (Tpb)**

**Definición:** Originalmente definida por Notenstein *et al.* (1944, Reportado en Ariana, 1996). Su sección Tipo se encuentra en el flanco oriental del Anticlinal de Petrolea, dentro de la Concesión Barco, en el Dpto. de Norte de Santander.

**Litología:** Cuarzo arenitas de grano medio o conglomerático deleznable friables de color blanco (Geoconsult Ltda. - Pangea Ltda., 2004 reportado en Caro *et al.*, 2004).

**Posición Estratigráfica:** En la zona de estudio La Formación Barco está en contacto inconforme con la infrayacente Formación Guadalupe. El contacto superior con la Formación Cuervos es aparentemente transicional (Rojas, 2002). Correlacionable con la Formación Socha Inferior y Areniscas de El Morro (Vergara y Rodríguez, 1997).

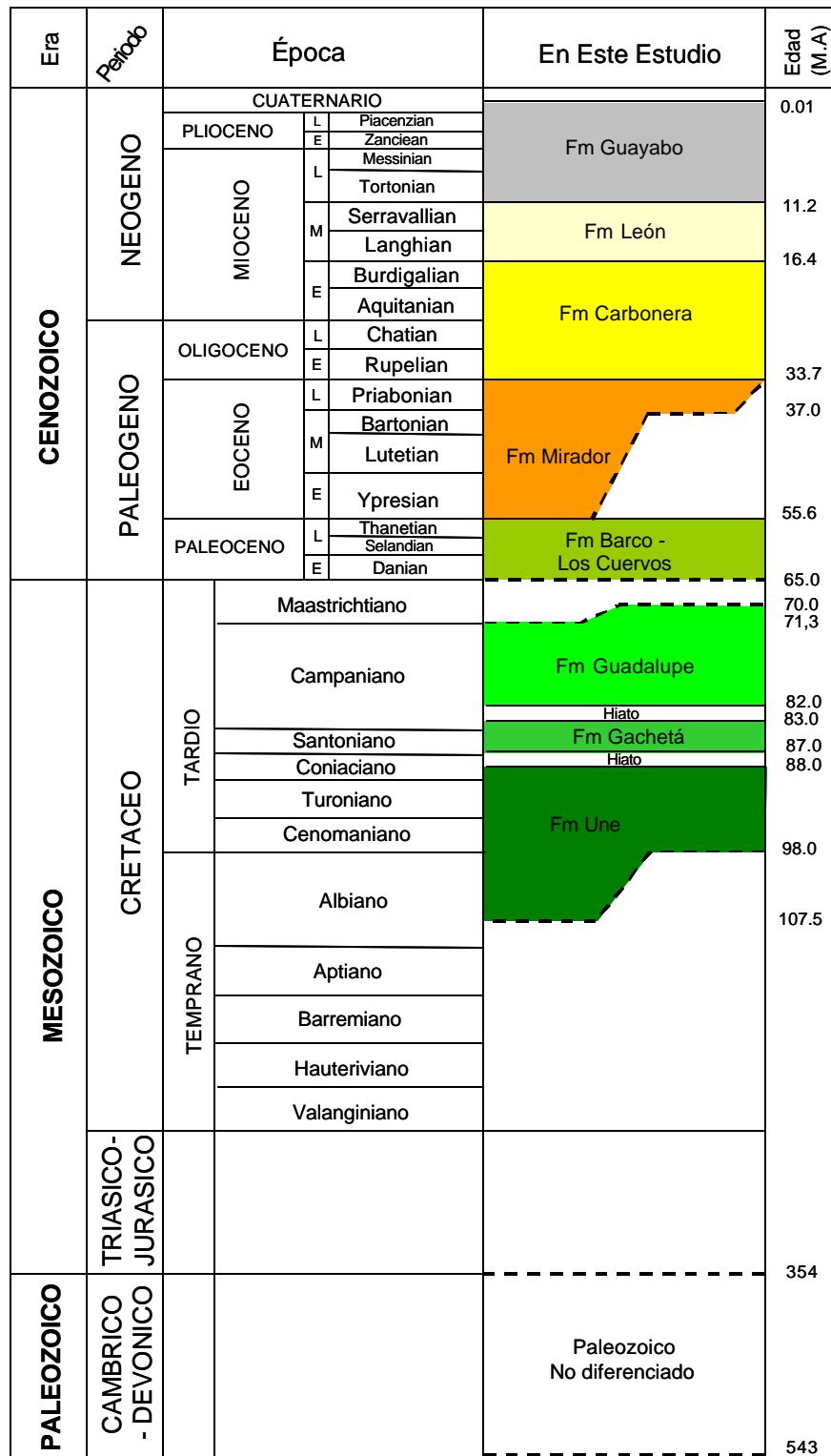


Figura 2. Columna estratigráfica generalizada del area de estudio (Modificado de Caro *et al.*, 2004).

**Espesor:** La Formación Barco presenta un espesor que varía entre 150 a 200 m (Ariana, 2000).

**Edad:** Fajardo *et al.* (2000), propone una edad de depositación para el intervalo de las Formaciones Barco – Los Cuervos del Paleoceno Tardío; para ello recopila la información bioestratigráfica suministrada por Muñoz (1993), quien le asigna una edad de Paleoceno. También tiene en cuenta la comunicación oral con Sarmiento quien le asigna una edad de Paleoceno Tardío.

**Ambiente de Deposito:** Fajardo *et al.* (2000), a partir de información de corazones interpreta ambientes de depositación fluvial y transicional para la Formación Barco; identificándose depósitos arenosos de canales, depósitos arenosos de cuerpos progradantes y lodolitas de estuario, de bahía o Llanura de inundación. En los sectores del Meta y Arauca los canales son fluviales y en el sector de Casanare son estuarino (Figura 3).

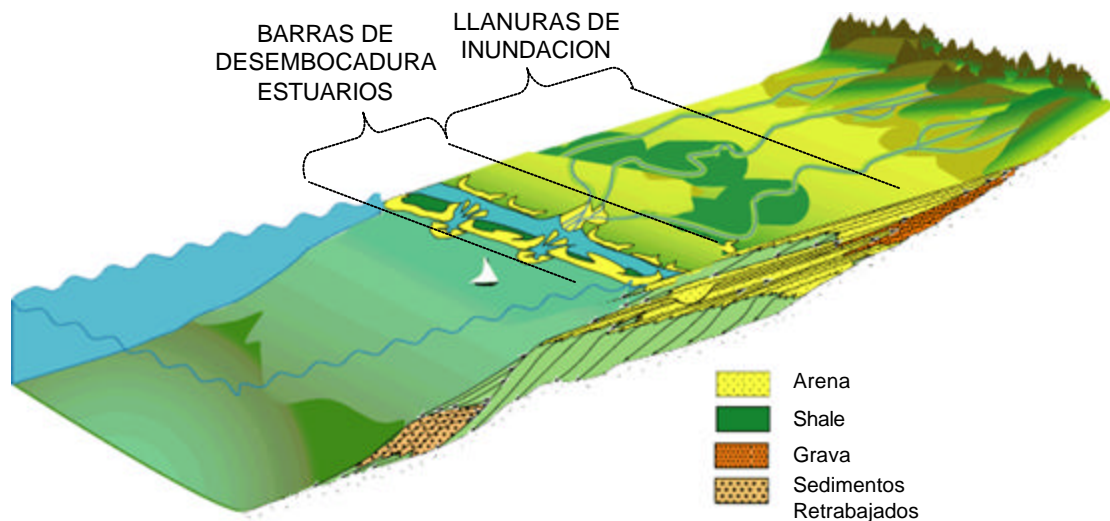


Figura 3. Ambiente de depositación de la Formación Barco (Tomado de Geoconsult Ltda - Pangea Ltda., 2004 reportado en Caro *et al.*, 2004).

## **Formación Los Cuervos (Tplc)**

**Definición:** Es definida por Notenstein *et al.* (1944, Reportado en Ariana, 1996). La Sección Tipo se encuentra en el área de la Concesión Barco; es la quebrada Los Cuervos, afluente del Río Catatumbo.

**Litología:** Lodolitas y arcillolitas de color gris, moteadas, mantos de carbón, lodolitas carbonosas y arenitas sublíticas de grano fino, cementadas (Ariana, 2000).

**Posición Estratigráfica:** El contacto inferior con la Formación Barco es transicional y el superior con la Formación Mirador es erosivo neto (Rojas, 2002). En algunos casos esta relación con la formación suprayacente puede ser concordante, como en los Pozos Coporo – 1, Buenos Aires – 3, Cusiana – 5 y Gibraltar – 1 (Jaramillo *et al.*, 2003). Correlacionable con la Formación Socha Superior y Arcillas del Limbo (Vergara y Rodríguez, 1997).

**Espesor:** Varía de 300 a 200 m (Ariana, 1996).

**Edad:** Jaramillo (1999), con bioestratigrafía asigna una edad de Paleoceno Tardío a la Formación Arcillas del Limbo (sinónimo en el área).

**Ambiente de Deposito:** Fajardo *et al.* (2000), a partir de información de corazones en diferentes partes de la Cuenca, interpreta ambientes continentales o de llanura costera superior donde se identifican areniscas depositadas en canales fluviales, depósitos arenosos de complejos de “*crevasse splay*” o rellenos de lago y depósitos lodosos de llanura de inundación o lacustres (Figura 4).

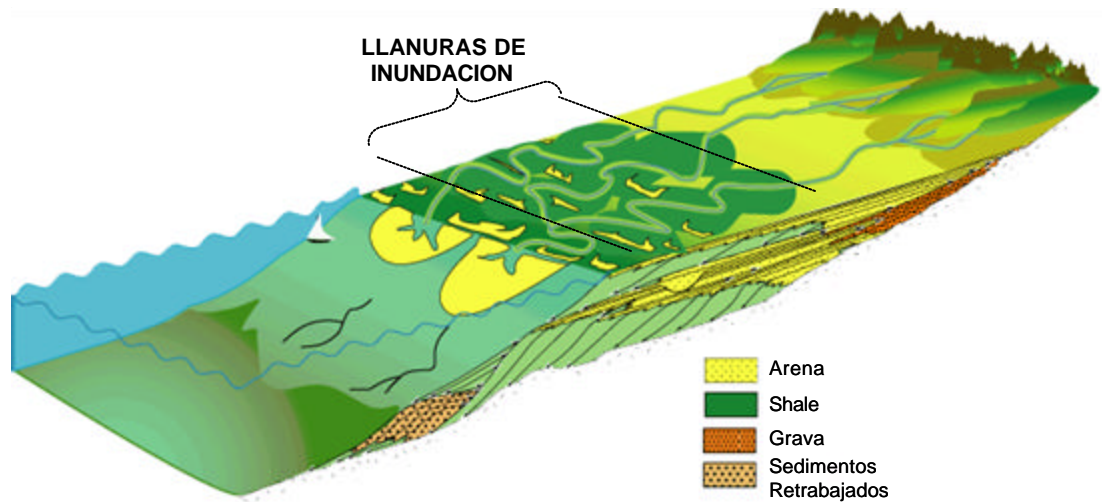


Figura 4. Ambiente de deposición de la Formación Los Cuervos (Tomado de Geoconsult Ltda. - Pangea Ltda., 2004 reportado en Caro *et al.*, 2004).

### **Formación Mirador (Tem)**

**Definición:** El nombre fue propuesto por Gardner (1926, Reportado en Ariana, 1996) e introducido en Colombia por Notenstein *et al.* (1944, Reportado en Ariana, 1996). Procede del Cerro Mirador en la parte alta del Río Lora, al sur del Distrito de Perijá, Estado de Zulia (Venezuela).

**Litología:** Constituida esencialmente por arenitas de grano medio a muy grueso, con cintas de conglomerados de guijos, clastosoportados, muy friables (Ariana, 2001).

**Posición Estratigráfica:** En el área de estudio el contacto inferior con la Formación Los Cuervos es erosivo neto y el superior con la Formación Carbonera es abrupto (Rojas, 2002). Correlacionable con las Areniscas del Limbo (Sandoval y Díaz, 1999)

**Espesor:** Varía entre 250 a 300m (Ariana, 2000).

**Edad:** según Cooper *et al.* (1995), Ariana (2000) y Rojas (2002), esta Formación es de edad Eoceno Tardío. Fajardo *et al.* (2000), propone una edad de depositación para la Formación Mirador de Eoceno tardío. Este autor recopila la información bioestratigráfica de Muñoz (1993) quien le asigna una edad de Eoceno tardío; así como los datos de Reyes y Silva (1989) quienes la datan como Eoceno medio a tardío;

**Ambiente de Deposito:** para esta formación Se identifican depósitos de canales fluviales y estuarinos y de rellenos de bahías o estuarios; se observa una transición de ambiente continental a transicional de base a tope (Fajardo *et al.*, 2000) (Figura 5).

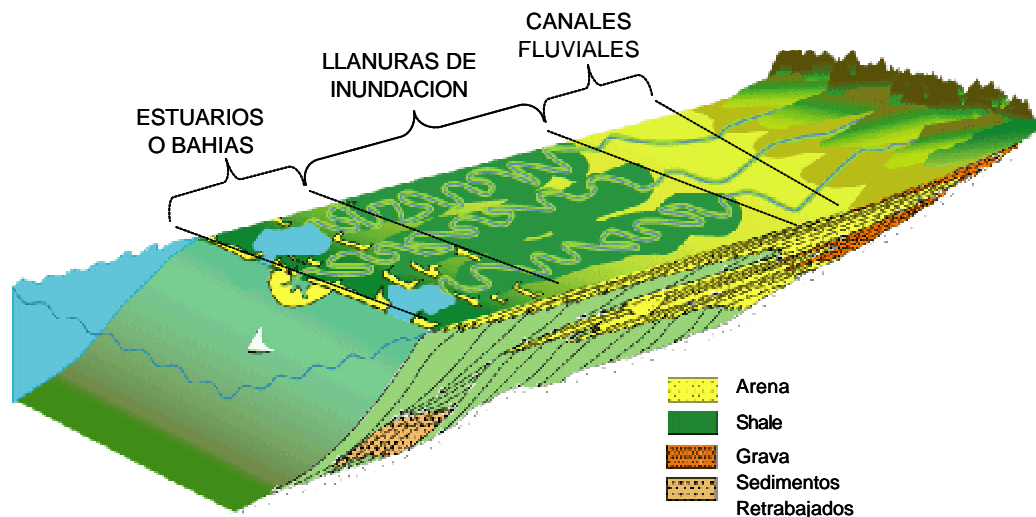


Figura 5. Ambiente de deposición de la Formación Mirador (Tomado de Geoconsult Ltda. - Pangea Ltda., 2004 reportado en Caro *et al.*, 2004).

## 2.1.2 Geología Estructural

### Marco Tectónico Regional

La zona de estudio, de Oeste a Este corresponde geológicamente al Piedemonte Llanero y La Cuenca de los Llanos o “Foreland”, y se localiza en la esquina Nor-

Occidental de Suramérica en una área de complejidad tectónica, producto de la convergencia entre la placas Suramericana, Cocos, Nazca y Caribeña (Sarmiento, 2002; Rojas, 2002) (Figura 6).

Las estructuras acumuladoras del hidrocarburo están ligadas a la fase de levantamiento orogénico (Mioceno-Plioceno) (Colletta *et al.*, 1990; Cooper *et al.*, 1995; Linares *et al.*, 2003), entre otros, asociadas a la acreción del arco Baudó-Panamá a los Andes Occidentales (Taboada *et al.*, 2000; Gómez, 2001), en el cual se da el evento que dio como resultado el levantamiento de la Cordillera Oriental. Los movimientos orogénicos se ven reflejados en la actual estructura, por grandes fallas de cabalgamiento y pliegues apretados en el flanco Occidental de la Cuenca o zona del Piedemonte, y por fallas normales de poco desplazamiento y plegamientos suaves al oriente en el “*Foreland*” (Linares *et al.*, 2003).

### **Estilos Estructurales**

En el área de estudio se pueden definir claramente de Occidente a Oriente dos estilos estructurales en general, Piedemonte Llanero y la Cuenca de los Llanos. Presentándose principalmente hacia el Este esfuerzos distensivos y el Oeste esfuerzos compresivos (Figura 7).

**Piedemonte Llanero:** definido estructuralmente como una zona mayoritariamente de pliegues y fallas de “Escama Delgada” de rumbo Suroeste – Noreste con vergencia SE. (Linares *et al.*, 2003).

*El Piedemonte Norte* localizado en los bloques Catleya y Sirirí esta limitado estructuralmente hacia el Oeste por la Falla de Cubugón (Falla de Guaicáramo?) (Suárez, 2002). Esta área se caracteriza por presentar Tres sistemas de fallas con diferente comportamiento mecánico el cual involucra rocas de edad Paleozoica al reciente; fallas de cabalgamiento con vergencia E y NE, retrocabalgamiento con

vergencia al Oeste, y dos sistemas de fallas de desgarre con rumbo NW - SE y NE – SW (Geoestratos Ltda. – Dunia Ltda., 2002)

El modelo estructural para este sector del Piedemonte Norte de la Cordillera Oriental, ha sido interpretado como una superposición de estilos compresivos, que involucran una tectónica de “Escama Delgada” (Occidental, 2002). ECOPEPETROL (2003), interpreta estructuras que podrían asimilarse aun sistema duplex con techo pasivo y desarrollo de sinclinales de Antepais en el frente de cabalgamiento.

*El Piedemonte Central* esta caracterizado por pliegues amplios en superficie y gran estructuración en subsuelo, tiene una extensión entre 15 y 20 Km de ancho y al Oeste esta limitado por el sistema de fallas de Guaicáramo y al Este por el sistema de fallas Yopa+ Borde Llanero (Cooper *et al.*, 1995).

En este segmento (Piedemonte Central), el estilo estructural de este cinturón plegado de cabalgamiento varía a lo largo del tren desde estructuras frontales simples a un imbricado de hasta cuatro escamas apiladas en una Zona Triangular, La complejidad estructural va de aumento a medida que nos movemos de Sur a Norte y es en gran medida reflejo de la presencia de múltiples despegues y de la configuración del Basamento cristalino subyacente (Beicip, 1995; Martínez, 2003).

*El Piedemonte sur* en la región de Medina, está limitado al Oeste por la Falla de Tesalia- Pajarito y al Este por la Falla de Guaicáramo siendo la Falla de Aguaclara la expresión en superficie del limite Oriental del Piedemonte Llanero (Linares, 1996). Las estructuras son en general de tipo “*Fault Bend Fold*”, con un anticlinal amplio (Anticlinal de Medina) en la parte central y sinclinales volcados en sus flancos Oriental y Occidental como son el Sinclinal Río Amarillo y el Sinclinal de Nazareth respectivamente (Rowan y Linares, 2000).

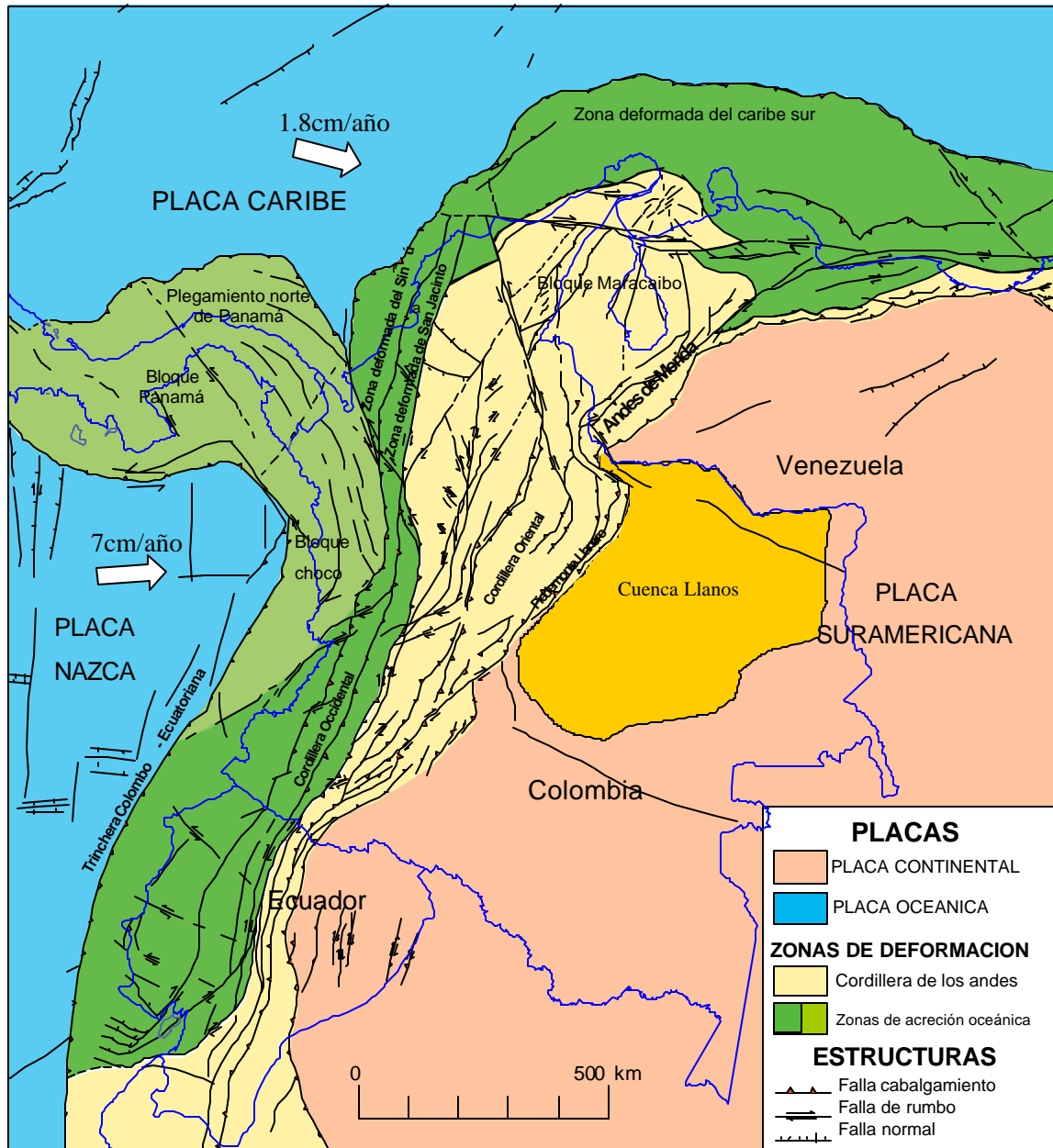


Figura 6. Ambiente tectónico y principales estructuras en la esquina Nor- Occidental de Suramérica (Modificado de Sarmiento, 2002).

**Cuenca “Foreland” (Llanos):** Esta situado en la parte mas Oriental del área de trabajo y se encuentra limitado al Occidente por el sistema de fallas Yopal- Borde Llanero en la región central y hacia el Sur por la falla de Guaicáramo a la altura del área de Medina.

Regionalmente la estructura de los Llanos propiamente dicha esta dominada por un extenso monoclinas que buza suavemente hacia el Oeste (Linares, 2003). En la zona de Casanare el estilo estructural se caracteriza por la presencia de dos familias de fallas Normales de dirección NS y ENE–OSO que afectan a las formaciones sedimentarias más recientes (Geoconsult Ltda.-Pangea Ltda., 2004 reportado en Caro *et al.*, 2004). Beicip (1995), reconocen Fallas Transcurrentes ENE–OSO y Normales en la región de Arauca y Casanare respectivamente.

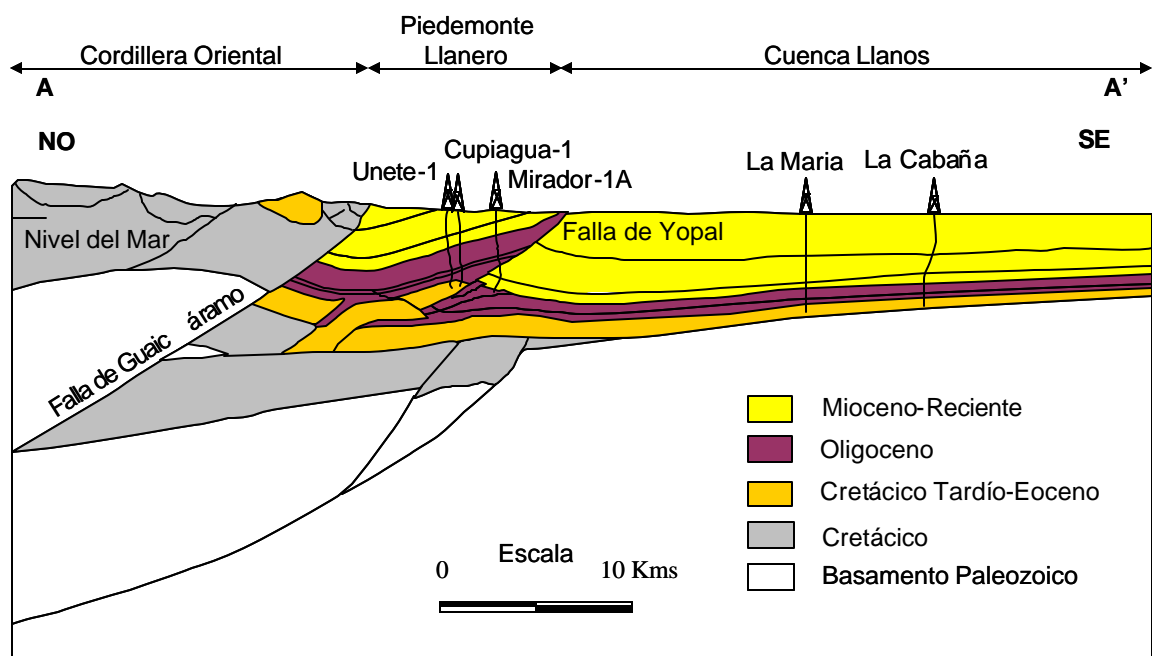


Figura 7. Corte estructural representativo del área de estudio; ver (Figura 8) para localización (Modificado de ECOPETROL,1993).

### Zonas de Despegue

Los despegues principales de las fallas se presentan en las formaciones principalmente arcillosas como son las arcillolitas del Ordovícico, La Formación Gachetá, los miembros arcillosos del Grupo Carbonera y La Formación León siendo esta ultima el nivel de despegue más superior identificado en el Piedemonte (Beicip, 1995). Estos niveles se hacen paulatinamente más jóvenes

de Sur a Norte, y de Occidente a Oriente y van subiendo estratigráficamente a medida que la deformación avanza (Rojas, 2002; Martínez, 2003).

### **Fallas**

El principal tipo de fallas identificadas en la región son las Fallas de Cabalgamiento con vergencia Sur-Este y dirección de rumbo Suroeste-Noreste (Linares, 2003). De estas fallas en este sector las más conocidas son: sistema de Falla Guaicáramo, La Falla Paz de Ariporo, Borde Llanero, Yopal y sistema de Falla Tesalia-Pajarito, etc (Figura 8).

**Falla del Borde Llanero :** Es una falla de cabalgamiento que se desarrolla como una ramificación (“*splay*”) de la Falla de Yopal, en el Piedemonte Central se Presenta un nivel de despegue inferior en la base de La Formación Carbonera, y uno superior en La Formación León (Figura 8). Rojas (2002), sostiene que esta falla Se une al Norte con la Falla de Ariporo a la que transfiere su acortamiento. Beicip (1995), no interpreta ningún tipo de transferencia de deformación a la Falla de Paz de Ariporo tomándolas como estructuras independientes. Entre las fallas de Yopal y la de Borde Llanero, se desarrolla un imbricado que repite unidades de la parte superior de La Formación Carbonera y se une al despegue superior de La Formación León (Rojas, 2002).

**Sistema de Falla de Guaicáramo:** Es una Falla de cabalgamiento que involucra rocas del Pre-rift y se podría interpretar como de “Escama Gruesa”. Tiene rumbo principal de dirección NE que separa la Cordillera Oriental del Piedemonte de los Llanos (Figura 7 y 8). La falla marca el limite entre la Cordillera con Cretácico Temprano aflorando y el Piedemonte Llanero con afloramiento de Cenozoico (Beicip, 1995). En el Piedemonte Central pone en contacto rocas del Cretáceo Inferior (Formación Une) con La Formación Carbonera. Es una estructura fuera de

secuencia producida por la inversión de fallas originalmente normales, que limitaban un Graben del Cretáceo Inferior (Idrobo *et al.*, 2001; Rojas, 2002).

**Falla de Yopal:** Es una falla de cabalgamiento con vergencia Este que involucra la sección sedimentaria interpretándose como de Escama Delgada (Beicip, 1995), Su trazo en superficie con rumbo NE, pone en contacto a las unidades superiores de La Formación Carbonera contra La Formación Guayabo (Rojas, 2002) (Figura 7 y 8). Hacia el Norte su desplazamiento va disminuyendo paulatinamente hasta ser cortada por la Falla de Ariporo (Hossack, 1997). El salto estratigráfico inferido para esta falla es del orden de 500 a 1000 metros en el Piedemonte Central (Geoconsult Ltda.-Pangea Ltda., 2004 reportado en Caro *et al.*, 2004), Idrobo *et al.* (2001), para el Campo Cupiagua sugiere un desplazamiento no menor a 5 Kilómetros.

**Sistema de Falla de Tesália-Pajarito:** El sistema de falla Tesália-Pajarito es una falla de cabalgamiento en Secuencia de alto ángulo en superficie ( $60^{\circ}$ -  $80^{\circ}$ ), que involucra rocas Pre-Cretácicas (Ariana, 2000) (Figura 8), el mayor salto estratigráfico de esta falla se encuentra en el sector de San Luís de Gaceno siendo de aproximadamente 1.500 metros, colocando en contacto rocas de La Formación Lutitas de Macanál contra rocas de La Formación Guadalupe, este desplazamiento disminuye hacia el Norte, su principal nivel de despegue esta localizado en las evaporitas de las Lutitas de Macanál (Ariana, 2000).

**Falla de Cusiana:** Esta falla es en sí misma es el límite entre la actual Cuenca de Antepaís de los Llanos Orientales Colombianos y el Piedemonte de la Cordillera Oriental de Colombia en el Piedemonte Central (Figura 8). Es una estructura profunda emergente (Escama Gruesa) y de alto ángulo que pliega y desplaza a la sección sedimentaria. La posición del despegue principal se encuentra en las arcillolitas del Paleozoico (Martínez, 2003), el desplazamiento inverso sobre esta falla es reducido pero fue suficiente para cabalgar a La Formación León y a los

sedimentos del Oligoceno sobre la sección basal de la Molasa Andina (Geoconsult Ltda.-Pangea Ltda., 2004 reportado en Caro *et al.*, 2004).

**Falla de Paz Ariporo:** Es una falla de cabalgamiento con sentido NE y vergencia Sur-Este, aflorando en el Piedemonte Norte del área de estudio (Figura 8), coloca rocas de La Formación León (Mioceno Superior) sobre depósitos aluviales recientes. El salto estratigráfico inferido para esta falla es de 2200 m (Ariana, 2000). Su principal nivel de despeje se encuentra en la Formación León que emerge a superficie hacia el Este (Rojas, 2002).

### Pliegues

Los Sinclinatorios fallados representan las estructuras plegadas más comunes, dentro de las cuales se encuentran los anticlinales que constituyen los reservorios actuales y/o potenciales para los hidrocarburos de la región (Linares *et al.*, 2003).

**Sinclinal de Zamaricote:** Es un sinclinal pasivo de techo limitado por las fallas del Borde llanero y el retrocabalgamiento de Zamaricote (Rojas, 2002) (Figura 8). Este pliegue, se extiende desde el Río Pauto hacia el Noreste por más de 30 Km; en sus flancos involucra las Formaciones Carbonera Superior a Guayabo Inferior y en el núcleo reposa un espesor bastante considerable de los depósitos de las Formaciones Guayabo Superior y Corneta. Su amplitud es del orden de 25 km y Su eje presenta una orientación N30°E. Junto con el sinclinal de Zapatos-Nuchia forman una franja que corresponde a una cuenca de tipo “*Piggy back*” fragmentada por las fallas subverticales perpendiculares al rumbo general de las estructuras (Ariana, 2000).

**Sinclinal de Zapatos – Nunchía:** Es un sinclinal pasivo de techo que se desarrolla entre las fallas de Yopal y el sistema de falla de Guaicáramo (Figura 8), siendo cortado por ésta última. Involucra a las Formaciones Guayabo, León y la

parte superior de Carbonera (Rojas, 2002), su nivel de despegue se encuentra en la Formación Carbonera (Geoconsult Ltda.- Pangea Ltda., 2004 reportado en Caro *et al.*, 2004), dimensionalmente tiene una amplitud de 15 Km y cerca de 65 km de longitud; su eje, con orientación de N 70° E, forma un ángulo de cerca de 20° con el trazo de la falla de Guaicáramo, la cual sepulta el flanco Oeste del sinclinal a la

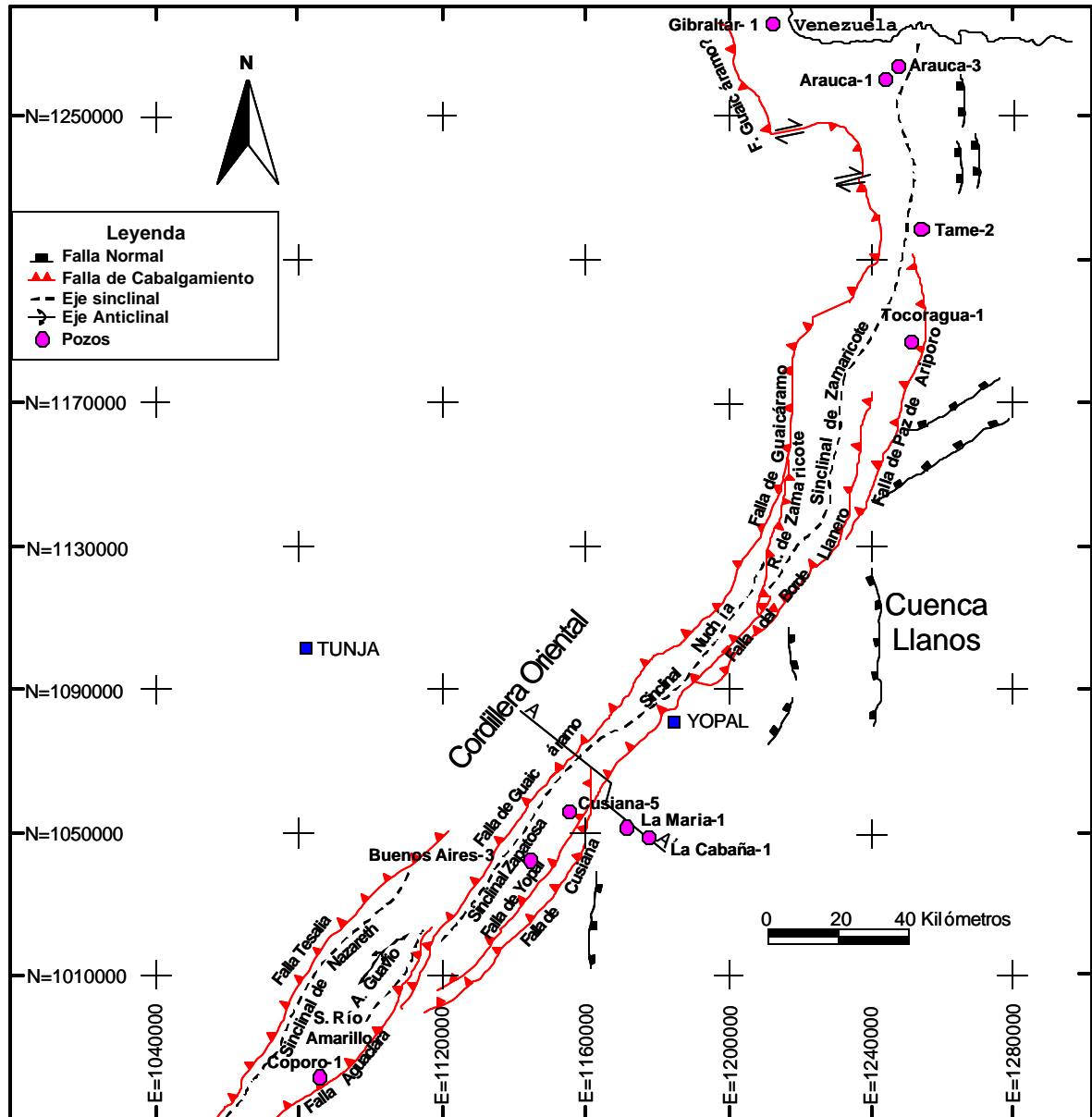


Figura 8. Principales rasgos estructurales en la Zona del Piedemonte y la Cuenca de los Llanos (Modificado de Beicip, 1995)

altura del Río León superior. Está limitado al Norte por el retrocabalgamiento de Zamaricote y al Sur por la falla de Guaicáramo (Ariana, 2000).

**Anticlinal del Guavio:** Esta estructura está limitada al Oeste por el Sinclinal de Nazareth y al Este por el Sinclinal del Río Amarillo y es interpretada como un "fault-bend Fold" (Linares, 1996). Involucra en sus flancos rocas de la Formación León y en el núcleo rocas de la Formación Carbonera, tiene una amplitud de 10 km. y un largo de 40 km. aproximadamente en una dirección N20°-30°E. Se extiende desde el norte de Villavicencio hasta ser truncado por la falla del Río Guavio. Al Norte de esta falla puede corresponder al anticlinal de Tierra-negra (Ariana, 2000).

**Sinclinal de Nazareth:** Esta estructura está limitada al Oeste por la falla Tesalia-Pajarito y al Este por el anticlinal del Guavio (Beicib, 1995). Involucra en los flancos unidades de las formaciones León y Carbonera y en el núcleo unidades de la Formación Guayabo, presenta una dirección N30°E (Ariana, 2000).

### Evolución Tectonoestratigráfica

La evolución tectónica del Piedemonte Llanero y la Cuenca de los Llanos está relacionada a la historia de evolución Geodinámica de la esquina Nor-Occidental de Sur América, durante el Mesozoico y posteriormente en el Cenozoico, influenciado por la evolución de la margen activa al Oeste del continente, en colisión con la placa del Pacífico (Rangel *et al.*, 2000) (Figura 9).

Durante el Triásico y Jurásico, el territorio Colombiano estuvo localizado próximo a un centro de expansión oceánica que causó la separación de Norte América de Sur América y desarrollo del mar Proto-Caribeño (Pindell, 1993 reportado en Gómez, 2001).

Durante el Jurásico y el Cretáceo Temprano aparece una zona de subducción en el Oeste entre la placa Suramericana y las placas del océano Pacífico, evidenciado por dataciones de edad Jurasica-Cretácica sobre mineralizaciones de cobre y magmatismo granítico calco-alkalino en estudios realizados por Etayo (1985), sobre la Cordillera Central.

También para esta época sobre la Cordillera Oriental intruyen plutones Jurasicos asociados a un “*rifting*” de Retro-Arco (Gómez, 2001), cuyo límite Oriental estaba dado por la Paleofalla de Guaicáramo (Rojas, 2002), y que permitió el desarrollo de dos depocentros separados por rocas Paleozoicas del paleoalto conocido como el Macizo de Santander. Estas cuencas se han definido como la del Cocuy al Este del Macizo y la de Tablazo-Magdalena al Oeste del mismo (Rangel *et al.*, 2000). Este “*rifting*”, permitió la depositación de espesas secuencias marinas de aguas someras rellenando geometrías de grábenes y semigrábenes (Rojas, 2002).

Posteriormente, en el Cretáceo Tardío al final de la fase “*Syn-rift*” (Albiano-Cenomaniano) y comienzo de la fase de subsidencia tectónica ocurre una transgresión hacia el Escudo de Guyana que establece una amplia plataforma siliciclástica en la actual Cordillera Oriental y Cuenca de los Llanos que permitió la depositación de la Formación Une (Rojas, 2002; Acosta, 2003).

Durante el Turoniano y Coniaciano Temprano el aumento global del nivel del mar determinado por Haq *et al.* (1987, Reportado en Acosta, 2003), es reflejado en la región por el depósito de shales que ocurren desde el techo de las areniscas de la Formación Une hasta las areniscas de la base del Grupo Guadalupe. Datos bioestratigráficos de varios pozos de la Cuenca de los Llanos realizado por Muñoz (1993, Reportado en Fajardo *et al.* 2000), sobre la Formación Gachetá, sugieren un rango de edades entre Santoniano y Campaniano.

Desde el Campaniano al Maastrichtiano, dos ciclos de progradación, agradación y retrogradación ocurrieron los cuales fueron marcados por alta energía. En este tiempo el depósito es dominado por areniscas de frente de playa derivadas del Escudo de la Guyana cuya nomenclatura en la Cuenca de los Llanos corresponde a la Formación Guadalupe (Fajardo *et al.*, 2000; Acosta, 2003).

A finales del Cretáceo y comienzos del Cenozoico, ocurrió el primer evento de levantamiento en la cuenca, registrado por la discordancia que separa las rocas del Cretáceo Superior del Paleoceno Tardío, Este cambio se inició con la colisión, y posterior acreción a Sur América, del arco de islas que constituye hoy día el basamento de la Cordillera Occidental de Colombia (Chigne *et. al.*, 1995; Cooper *et al.*, 1995).

La secuencia Paleocena, de origen continental (Formación Barco y Formación Los Cuervos), registra el desarrollo de una Cuenca Pre-Andina de “*Foreland*” (Rojas, 2002; Acosta, 2003), producto del levantamiento de la Cordillera Central, probablemente asociada a la carga tectónica ejercida por el sistema orogénico de la Cordillera Occidental (Chigne *et. al.*, 1995).

Durante el Eoceno Temprano a Medio, se desarrolló un evento de deformación compresivo en el flanco Occidental de la Cordillera Oriental (Chigne *et. al.*, 1995), este evento produjo el levantamiento en la Cuenca de los Llanos Orientales dando origen a la discordancia que separa el Paleoceno del Eoceno Superior (Rojas, 2002); Fajardo *et al.* (2000), sugiere que este evento podría deberse a un “*rebound effect*” asociado a un ajuste isostático.

Durante el Eoceno Tardío y Oligoceno se produjo un periodo de reactivación en la subsidencia de la cuenca, como respuesta a la flexión de la litosfera debido al levantamiento de las Cordilleras Central y Occidental que permitió la depositación de las Formación Mirador y buena parte de la Formación Carbonera (Rojas, 2002).

En el Oligoceno Tardío al Mioceno Medio continúa la subsidencia flexural; sin embargo al mismo tiempo hay acortamiento, lo que origina formación de estructuras compresivas en las cuencas del Valle del Magdalena y en el Piedemonte de los Llanos (Rojas, 2002; Corredor, 2003). Para esta época ocurre el rompimiento de la Placa Oceánica Farallón (generando las Placas Cocos y Nazca) que causó la reorientación de los vectores de movimiento de estas placas con respecto a las regiones del Caribe y Suramérica (Gómez, 2001). Producto de la primera etapa de la deformación en el Piedemonte se originaron varias discordancias locales dentro de la Formaciones Carbonera y León (Rojas, 2002).

Del Mioceno Tardío al reciente ocurre la última fase de compresión e inversión (orogenia Andina), que levanta la Cordillera Oriental, y reactiva las estructuras formadas anteriormente como respuesta a la acreción del arco Baudó-Panamá con Suramérica (Mioceno Tardío-Plioceno) (Gómez, 2001). El evento andino es de una magnitud mucho mayor que los eventos del Oligoceno – Mioceno Medio, razón por la cual lo enmascara, haciendo que la identificación de eventos anteriores al andino no sea evidente (Rojas, 2002). Durante este tiempo la sedimentación ha estado dominada por depósitos aluviales y fluviales acumulados en ambientes continentales (Formación Guayabo), asociados a la orogénesis de la Cordillera Oriental de Colombia (Chigne *et. al.*, 1995).

### 2.1.3 Geoquímica

De las diferentes unidades estratigráficas que conforman la columna del Piedemonte Llanero y la Cuenca de los Llanos Orientales dos presentan facies con característica de roca madre potencial. En esta área, son en orden de importancia: La roca madre principal (Formación Gacheta) y La roca madre secundaria (Formación Carbonera). Además de estas dos secuencias, fueron identificados algunos niveles como potenciales rocas madre en las formaciones del paleozoico, y también asociado con secuencias del Paleoceno como la Formación Los Cuervos (Beicip, 1995).

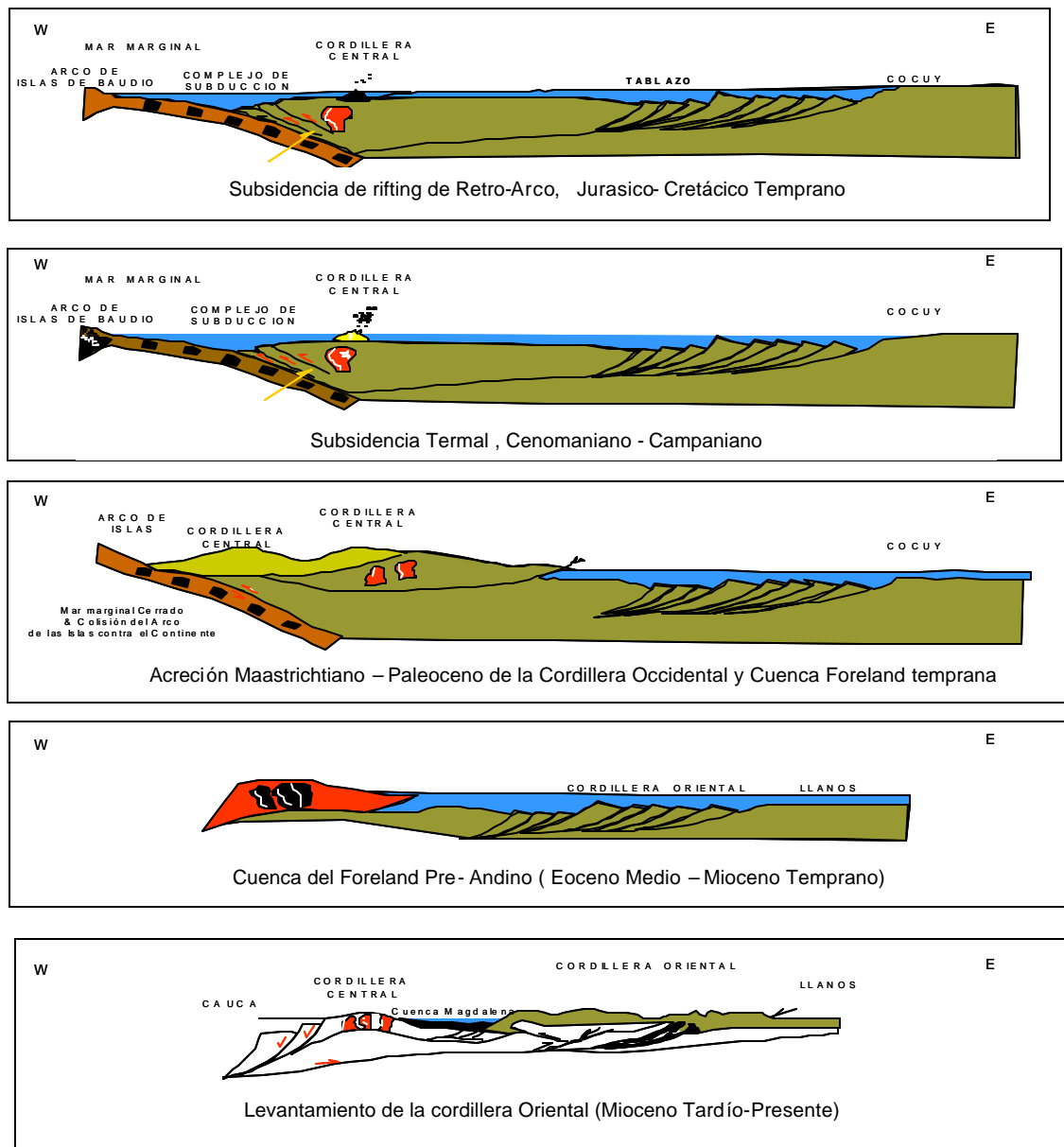


Figura 9. Modelo de evolución tectónica de la Cordillera Oriental, VMM y Llanos Orientales (Modificado de Cooper *et al.*, 1995).

Estudios realizados por Hernández *et al.* (1997), en el Piedemonte Central de la Cuenca de los Llanos (Cusiana), han definido que lutitas contenidas en las formaciones Carbonera, Mirador, Los Cuervos, Une y en el Paleozoico tienen potencial generador, que darían origen a otros sistemas petrolíferos. En la Tabla 1 se presentan los rangos de los porcentajes de Carbono Orgánico Total (COT), de

la Temperatura Máxima de Pirólisis en grados centígrados y del Índice de Hidrógeno (IH), lo que sugiere variaciones locales de la calidad, tipo y grado de maduración de las diferentes formaciones del área de estudio,

FORMACION	% DE COT	TMAX (° C)	IH (mg HC/Gr COT)
Paleozoico	0.25 - 3.2	416 - 457	19 -776
Une	0.32 - 5.6	425 - 444	53 - 357
Gachetá	0.32 - 3.58	419 - 443	33 - 650
Guadalupe	0.19 - 3.17	424 - 455	38 -249
Barco	0.22 - 9.49	432 - 451	32 -180
Los Cuervos	0.35- 1.75	429 - 442	42 - 229
Mirador	0.26 - 3.71	424 - 451	31 - 656
Carbonera	0.15 - 2.89	421 - 456	40 - 140
León	0. 20 - 2.32	421 - 448	25 -157

Tabla 1. Parámetros geoquímicos generales de las unidades litoestratigráficas de la zona central del Piedemonte de la Cuenca de los Llanos Orientales (Tomado de Hernández *et al.*, 1997)

Estudios realizados por ECOPEPETROL-GEX. (1994), para rocas Terciarias en el Piedemonte y la Cuenca de los Llanos, encuentran patrones geoquímicos diversos con comportamiento irregular y enriquecimiento locales. Sobrepuestos a un aumento regional hacia la cordillera del porcentaje del contenido de materia orgánica, variando de pobre a regular (0.10 - 0.50).

Particularmente para la Formación Los Cuervos se encuentran valores promedios pobres, que varían de 0.32 – 0.48% COT. Solo localmente en algunos sectores se observan valores muy buenos a regulares, de 3.4%, 2.69% y 0.82% correspondiendo a los pozos Cumaral 1AX, la Maria-1, y Leticia- 1, respectivamente (Figura 10). Para estos el tipo de kerógeno es II, los cual podría corresponder a pequeñas Cuencas cerradas de ambiente reductor. Además, algunos incrementos en el contenido de materia orgánica, podría n corresponder a niveles carbonosos típicos de ambientes pantanosos. En cuanto a La madurez de la materia orgánica (Ro), en general, muestra un aumento en dirección E-W, en la región Central del Piedemonte (Figura 11).

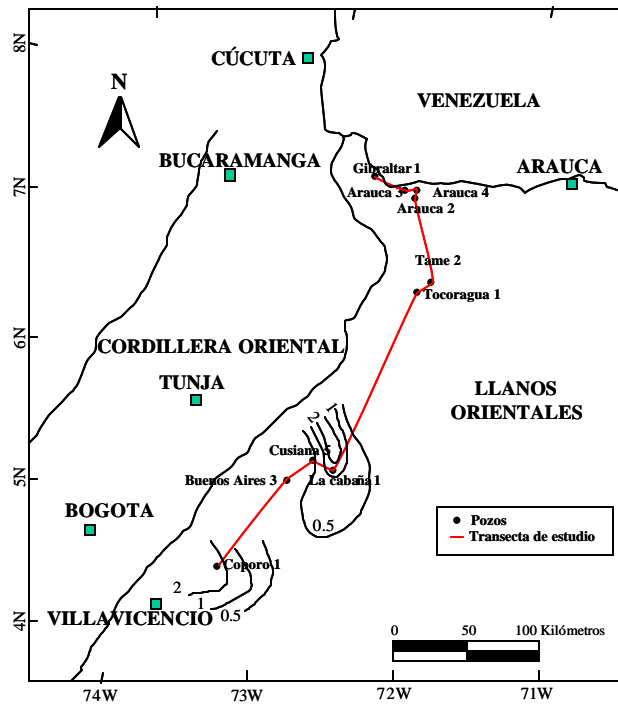


Figura 10. Mapa del contenido de materia orgánica para la Formación Barco-Los Cuervos en la región central del Piedemonte y Cuenca de los Llanos (Tomado del proyecto ECOPETROL-GEX, 1994).

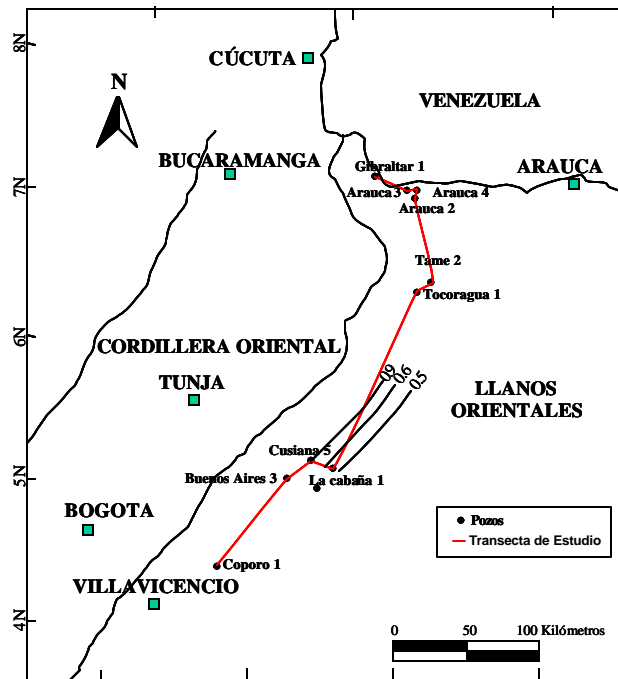


Figura 11. Comportamiento geoquímico, reflectancia de la vitrinita en la región central del Piedemonte y la Cuenca de los Llanos para la Formación Barco-Los Cuervos (Tomado del proyecto ECOPETROL- GEX, 1994).

Mora *et al.* (2002), realiza un estudio geoquímico con Aproximadamente 450 muestras de zanja de pozo del Piedemonte y la región del “Foreland”. Los resultados analíticos indican que las muestras de la Formación Los Cuervos en los pozos Gibraltar-1, Dele-1, Tocaría-1 y Tamara-1 poseen potencial generador de hidrocarburos que varía entre pobre y bueno ( $PG = 0.5 - 8 \text{ gHC/groca}$ ), con contenido de materia orgánica pobre a bueno ( $COT = 0.5 - 2\%$ ), valores bajos de índice de hidrógeno ( $IH < 200 \text{ gHC/gCOT}$ ) y muestras de roca inmaduras a inicio de la ventana de generación, con predominio de kerógeno del tipo III (Figuras 12, 13 y 14).

La mayor limitación de estos intervalos generadores esta relacionado con el bajo contenido de hidrogeno de las muestras, lo cual limita la eficiencia y los volúmenes de hidrocarburos que podrían ser expulsados a partir de estas rocas.

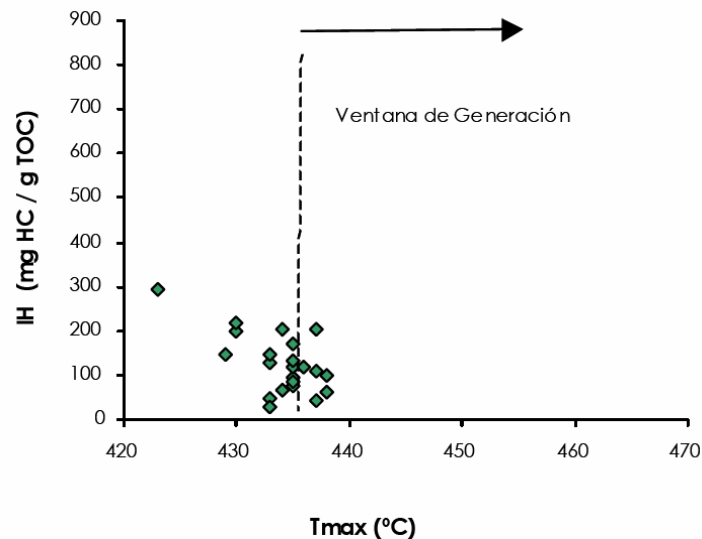


Figura 12. Relación entre el Índice de Hidrógeno y el Tmax de muestras de la Formación Los Cuervos para los pozos Gibraltar-1, Dele-1, Tocaría-1 y Tamara-1. Se observa que las muestras están entre inmaduras e inicio de la ventana de generación (Tomado de Mora *et al.*, 2002).

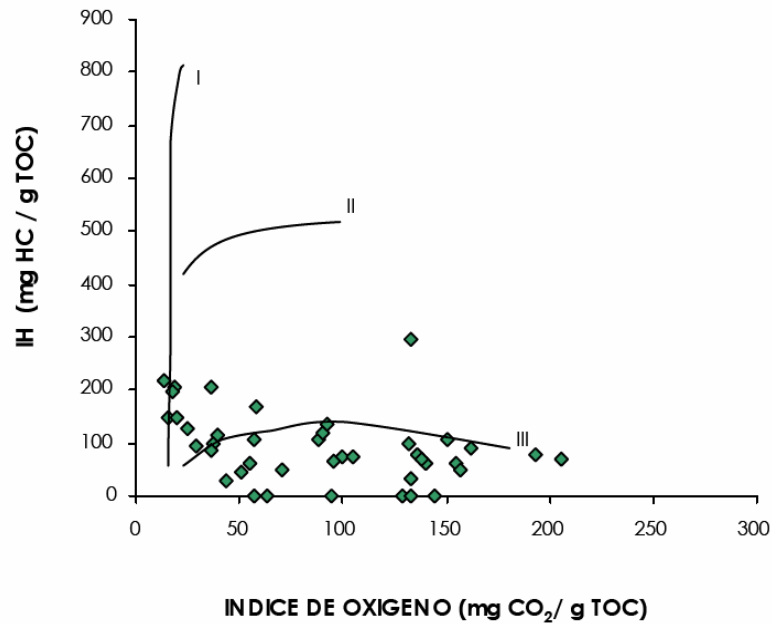


Figura 13. Diagrama tipo Van Krevelen para muestras de la Formación Los Cuervos para los pozos Gibraltar-1, Dele-1, Tocaría-1 y Tamara-1. Se observa el predominio de kerógeno bajo en hidrogeno, del Tipo III (Tomado de Mora *et al.*, 2002).

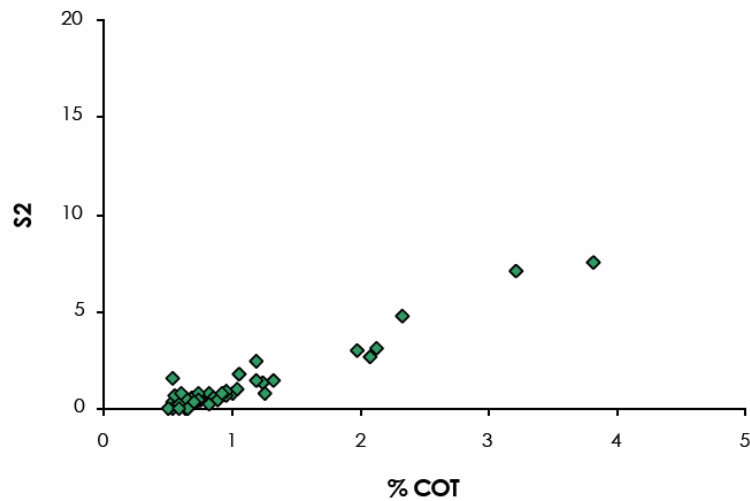


Figura 14. Diagrama de S<sub>2</sub> Vs %COT para muestras de la Formación Los Cuervos para los los pozos Gibraltar-1, Dele-1, Tocaría-1 y Tamara-1. Las muestras con mayor potencial generador pertenecen al pozo Dele-1 (Tomado de Mora *et al.*, 2002).

Sanmiguel *et al.* (2004), en la región del Casanare para la Formación Barco-Los Cuervos encuentra regulares valores de COT (<1%) y bajos IH (<300 mg HC/ g COT), mostrando un ligero incremento hacia la cordillera que no exceden el 1% de COT, El tipo de Kerógeno es predominantemente tipo III. Localmente en el pozo La Maria-1, se presentan valores excelentes en el COT (>5%) y alto IH (>400 mg HC/ g COT).

La madurez de la materia orgánica para la Formación Barco-Los Cuervos aumenta en la dirección SW hasta la falla de Guaicáramo, desde inmaduro llegando a la madurez tardía (Ro = 0.9 -1.35%), esta tendencia no se aprecia entre las fallas Tesalia-Pajarito y Guaicáramo donde los valores aumentan hacia el NE, desde la inmadurez hasta el pico de generación. (Figura 15.).

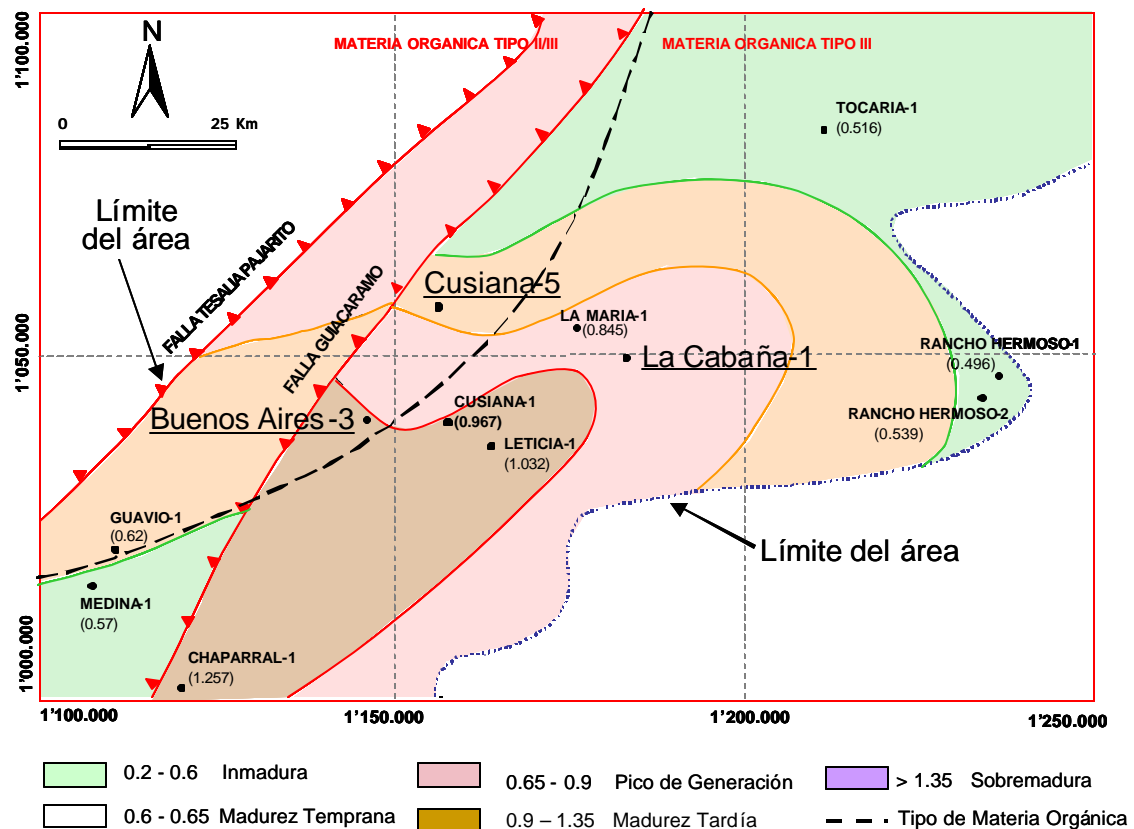


Figura 15. Mapa de madurez Termal (%Ro promedio) para la Formación Barco-Los Cuervos en la region central de la Cuenca (Modificado de Sanmiguel *et al.*, 2004).

---

## 3 RESULTADOS

---

### 3.1 CARACTERIZACIÓN ESTRATIGRÁFICA

#### 3.1.1 Metodología Empleada

Para la definición del intervalo Paleoceno Superior se utilizó la zonación palinológica de Jaramillo *et al.* (2003), para los pozos Coporo - 1, Buenos Aires - 3, y Cusiana - 5, La cabaña - 1 Tocoragua - 1, Tame - 2, Arauca - 1, 2, 3, 4 y Gibraltar - 1.

Los pozos con control palinológico, se listan en la siguiente tabla donde se muestran las profundidades de los topes y las bases del intervalo, comparando los topes palinológicos, con los topes estratigráficos definidos por Fajardo *et al.* (2000) (Tabla 2).

POZO	Intervalo Jaramillo <i>et al.</i> (2003)		Intervalo Fajardo <i>et al.</i> (2000)	
	TOPE	BASE	TOPE	BASE
Gibraltar - 1	7800	9554		
Arauca - 1	18120	18950		
Arauca - 2	17930	18495		
Arauca - 3	17795	18250		
Arauca - 4	17790	18655	18010	18560
Tacoragua - 1	17310	17732		
Tame - 2	14425	14760	14420	14825
Buenos Aires -3	15550	16110	15570	16277
Cusiana - 5	17067	17726		
La Cabaña - 1	16210	16470	16068	16396
Coporo - 1	16620	16880	16700	17530

Tabla 2. Intervalos del Paleoceno Superior en los pozos con control palinológico, realizado por Jaramillo *et al.* (2003) y los intervalos para la Formación Barco-Los Cuervos (Paleoceno Superior), según Fajardo *et al.* (2000).

Para la definición de los ciclos estratigráficos sobre los pozos a lo largo de la transecta, se empleo la metodología usada por el área de estratigrafía en el ICP, que corresponde a una estratigrafía de secuencias, el cual usa ciclos de nivel base; detalles sobre esta metodología de trabajo se encuentra en Fajardo *et al.* (2000).

Algunos de los criterios que se tienen en cuenta en la identificación de ciclos estratigráficos son:

- ? Reconocer tendencias unidireccionales de aumento o disminución en la relación espacio de acomodación (A) contra suministro de sedimento (S).
- ? Un ciclo estratigráfico completo, cualquiera que sea la frecuencia, registra tanto el tiempo de incremento como el de disminución en A/S y que el ciclo puede estar representado solo por intervalos de roca, por intervalos de roca mas superficies o solo por superficies.

### 3.1.2 Definición de Ciclos Estratigráficos

Durante un ciclo de nivel base o un ciclo estratigráfico, la relación A/S aumenta (cuando el nivel base sube) hasta un limite máximo y luego decrece (cuando el nivel base baja) hasta un limite mínimo, fluctuando hacia arriba y hacia abajo con respecto a la superficie de la tierra.

Un ciclo estratigráfico se define entre dos superficies o eventos de máxima relación espacio de acomodación contra suministro de sedimento (A/S), de esta manera el ciclo estratigráfico se divide en dos hemiciclos, el primer hemiciclo representa el tiempo de disminución en A/S y el segundo hemiciclo representa el tiempo de aumento en A/S (Figura 16).

La razón por la cual se definieron así los ciclos estratigráficos es que los máximos en A/S son más fácilmente identificables en los registros de pozo y correlacionables a través de la Cuenca.

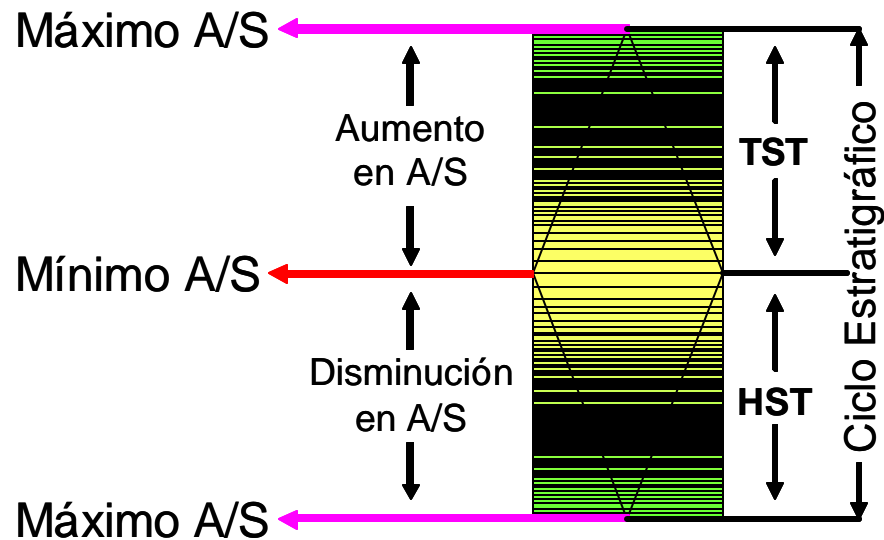


Figura 16. Representación gráfica de un ciclo estratigráfico y su equivalencia con la terminología de Possamentier *et al.* (1998, Reportado en Fajardo *et al.*, 2000). El ciclo estratigráfico se define entre dos superficies de máxima relación espacio de acomodación versus suministro de sedimento (A/S). Los máximos en A/S pueden coincidir con superficies de máxima inundación, los mínimos en A/S con superficies de inconformidad o también pueden marcar el punto de mayor progradación o somerización en una Cuenca. Las rocas depositadas durante una disminución en la relación A/S correspondan al “high stand system tract” (HST) y las rocas depositadas durante el aumento en A/S correspondan al “transgressive system tract” (TST). (Tomado de Fajardo *et al.*, 2000).

El primer paso para identificar ciclos estratigráficos consiste en reconocer facies o tipos de depósitos presentes en el intervalo a analizar. Para este propósito se tomó la interpretación de electrofacies o electroformas de los registros de pozo (Gamma Ray, Density, Sónico, y SP) calibrados con los corazones o núcleos de perforación, para los pozos Buenos Aires - 3, La Cabaña - 1, y Arauca - 4, en el estudio realizado por Fajardo *et al.* (2000). Para posteriormente extrapolar esta interpretación a los pozos faltantes y que hacen parte de la transecta.

Una vez interpretadas las facies o tipos de depósitos, se han determinado dos escalas de ciclos estratigráficos para el intervalo a estudiar: Ciclos de corto termino (alta frecuencia) y Ciclos de termino medio (mediana frecuencia).

Los Ciclos de corto termino (alta frecuencia), se definieron teniendo en cuenta la sucesiones de facies. Los cuales, corresponden a unidades progradacionales/agradacionales que cumplen con la ley de Walter. Para tal fin se establecieron dos sucesiones de facies y la secuencias genéticas básicas para la el intervalo Paleoceno; que de acuerdo a Fajardo *et al.* (2000), esta representado por la Formación Barco - Los Cuervos y sus correspondientes sedimentos asociados a ambientes continentales de tipo fluvial, y transicional de tipo estuarino o de bahía (Figura 17). La identificación de ambientes continentales y transicionales para este estudio se hizo en base a la aparición de dinoflagelados reportados en el estudio de Jaramillo *et al.* (2003).

Seguidamente para la determinación de ciclos de término medio (mediana frecuencia), se analizan patrones de apilamiento de los ciclos de alta frecuencia, si son progradacionales o retrogradacionales y la tendencia general de las facies, para posteriormente agrupar los ciclos de alta frecuencia en ciclos de mediana frecuencia.

Después se elaboran las correlaciones, se integró el modelo estratigráfico con los análisis bioestratigráficos, y se identificaron inconsistencias, asociadas a disparidades entre los topes y bases, resultado de la diferencia entre las dos herramientas (Ciclos de nivel base y Bioestratigrafía), para luego utilizando el concepto de pendientes depositacionales (pendientes más cercanas a cero), determinar el intervalo definitivo.

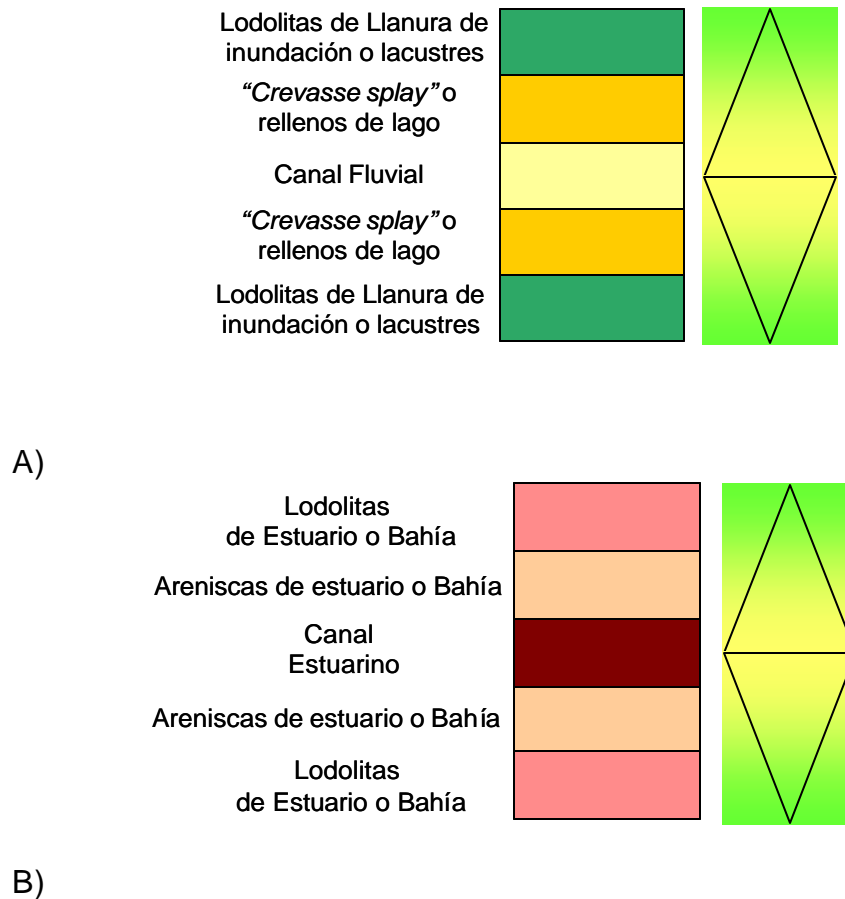


Figura 17. Secuencias genéticas básicas a) asociada a ambientes continentales de origen fluvial para la Formación Barco - Los Cuervos. B) asociada a ambientes transicional de tipo estuarino o de bahía para la Formación Barco - Los Cuervos (Modificado de Fajardo *et al.*,2000)

### 3.1.3 Ciclos Estratigráficos Paleoceno Superior

Ciclos de mediana frecuencia se identificaron y se correlacionaron para el intervalo en tiempo (Anexo A y B). Dentro de estos ciclos de mediana frecuencia se presentan ciclos de alta frecuencia que fueron definidos teniendo en cuenta las sucesiones de facies. A continuación se hace una breve explicación de la metodología utilizada para la descripción de los ciclos de mediana frecuencia.

La descripción de los diferentes ciclos en cada pozo, se realiza de abajo hacia arriba o de base a tope del intervalo, enumerándose a partir de uno (1). Además,

se establece que un ciclo completo está definido por dos superficies de máxima inundación, correspondiente a un hemicycle de caída de nivel base (HST) seguido por un hemicycle de elevación del nivel base (TST) (Figura 16). Los ciclos que no se encuentren en esta disposición serán ciclos incompletos.

### **Pozo Coporo – 1**

En el intervalo de este pozo de acuerdo a los ciclos de mediana frecuencia interpretados, se definieron dos ciclos incompletos así:

#### ? **Ciclo 1 (C1)**

**TST:** Se ubica en la parte inferior de la sección estudiada del pozo, correspondiente a la biozona 22 (tope de la biozona 22 es interpretado) y la base de la biozona 23, comenzando a una profundidad de 16880 pies, y terminando a 16820 pies, este intervalo está constituido por una intercalación (70 pies aproximadamente) de areniscas y lodolitas de estuario o bahía. La superficie de máxima acomodación corresponde a un cambio de ambiente de transicional a continental. Además, de marcar la finalización de la depositación de la Formación Barco (Figura 49).

#### ? **Ciclo 2 (C2)**

**HST:** hemicycle localizado al tope del intervalo estudiado, dispuesto sobre gran parte de la biozona 23, va de 16820 pies hasta 16620 pies, se caracteriza por presentar una sucesión de facies de tipo continental que corresponde a depósitos de Lodolitas de Llanura de inundación o lacustres, “*Crevasse splay*” o rellenos de lago y Canal Fluvial. Su espesor es de alrededor de 260 pies y sus superficies de máxima y mínimo espacio de acomodación corresponden a el inicio de la depositación de la Formación Los Cuervos y el límite basal de la Formación Mirador respectivamente (Figura 49). El límite superior de este hemicycle está

marcado a la vez por una sección condensada, que por efectos de resolución no permite determinar ciclos de nivel base de mediana frecuencia para las biozonas 24 - 1 y 24 -2.

### **Pozo Buenos Aires – 3**

Para este pozo de acuerdo a los ciclos de mediana frecuencia se identificaron tres ciclos incompletos y un ciclo completo.

#### ? **Ciclo 1 (C1)**

**TST:** Ubicado en la parte inferior de la sección de estudio del pozo, abarcando la biozona 22 y la parte inferior de la biozona 23, la secuencia comienza desde la facies transicional interpretada como areniscas de estuario, exactamente a 16110 pies de profundidad, para luego continuar con una intercalación con facies de lodolitas de estuario o bahía, para finalizar gradando a facies continentales de tipo fluvial, terminando en lodolitas de llanura de inundación a una profundidad de 16040 pies. El registro litológico que identifica a este hemicycle tiene un espesor total de 110 pies. La superficie de máxima inundación aproximadamente corresponde a la finalización de la depositación de la Formación Barco (Figura 50).

#### ? **Ciclo 2 (C2)**

**HST:** Localizado hacia la parte media del intervalo de estudio, sobre la parte superior de la biozona 23 y el sector inferior de la zona 24-1, entre 16040 y 15950 pies. Compuesto por la intercalación de facies de depósitos de lodolitas de llanura de inundación o lacustres y “*Crevasse splay*” o rellenos de lago. El espesor de este hemicycle es de 90 pies. Y la superficie de máxima inundación corresponde al inicio de depositación de la Formación Los Cuervos (Figura 50).

**TST:** También hace parte de los hem Ciclos intermedios en la sección del pozo, en la biozona 24-1, se caracteriza por facies de ambiente continental, iniciando en depósitos de canal fluvial a una profundidad de 15950 pies y terminando en depósitos de lodolitas de llanura de inundación a una profundidad de 15830 pies. Su espesor es de 120 pies (Figura 50).

### ? **Ciclo 3 (C3)**

**TST:** Hemiciclo localizado entre 15830 y 15680 pies, sobre la biozona 24-1. El registro litológico se compone de depósitos que van desde lodolitas de llanura de inundación o lacustres, “*Crevasse splay*” o rellenos de lago y depósitos de Canal fluvial, sin ninguna influencia marina. Su espesor es de 150 pies (Figura 50).

### ? **Ciclo 4 (C4)**

**HST:** Se localiza en la parte más superior de la sección de pozo, entre 15680 pies y 15550 pies, dispuesto hacia la parte superior de la biozona 24-1 y el total de la biozona 24-2. Litofacialmente corresponde a intercalaciones de areniscas progradantes (“*Crevasse splay*”) y lodolitas de llanura de inundación o lacustres. La superficie de mínimo espacio de acomodación corresponde al final de la depositación de la Formación Los Cuervos y al límite inferior de la Formación Mirador. El espesor de este hemiciclo es de 130 pies (Figura 50).

### **Cusiana – 5**

Para la determinación del intervalo Paleoceno Superior, se contó con tan solo información del tope y base del intervalo, de acuerdo a Carlos Jaramillo (Com. Oral 2004), sin la distribución de las biozonas, e identificación de sus respectivos topes. Por tal motivo, todos los límites de las biozonas son interpretados. En la definición de los ciclos, se precisaron tres ciclos incompletos y un ciclo completo de la siguiente manera:

### ? Ciclo 1 (C1)

**TST:** Este hemicyclo se encuentra hacia la base de la sección, haciendo parte de la biozona 22 y la parte inferior de la biozona 23, entre 17730 y 17680 pies, corresponde a una intercalación (50 pies de espesor) de areniscas y lodolitas de estuario o bahía. La superficie de mínimo espacio de acomodación limita con la Formación Guadalupe, y la superficie de máximo espacio es la transición de ambientes de tipo estuarino a continental y a su vez, el final de la depositación de la Formación Barco (Figura 51).

### ? Ciclo 2 (C2)

**HST:** Hace parte de los ciclos intermedios en la sección, en la biozona 23, entre 17680 y 17565 pies. Para este intervalo se encuentran facies netamente de origen continental, comenzando en depósitos de “*Crevasse splay*” o rellenos de lago y terminando en areniscas de relleno de canal fluvial. La superficie de máximo espacio de acomodación corresponde al inicio de la depositación de la Formación Cuervos. El espesor para este hemicyclo es de 165 pies (Figura 51).

**TST:** Se localiza entre 17565 y 17360 pies de profundidad con un espesor de 205 pies, corresponde a la parte superior de la biozona 23 y gran parte de la biozona 24-1. En general, es una secuencia con gran predominancia en lodolitas de llanura de inundación y ligeras ocurrencias de depósitos asociados a canal fluvial y “*Crevasse splay*” o rellenos de lago (Figura 51).

### ? Ciclo 3 (C3)

**TST:** hemicyclo intermedio de la sección, localizado en la parte superior de la biozona 24-1, el intervalo corresponde a profundidades entre 17360 y 17280 pies. La secuencia de ambiente continental inicia con la depositación de areniscas de canal fluvial y termina con la depositación de lodolitas de llanura de inundación o lacustres. Su espesor es de 80 pies (Figura 51).

#### ? **Ciclo 4 (C4)**

**HST:** Se localiza hacia el tope de la sección de estudio, entre 17280 y 17100 pies, concordando con toda la biozona 24-2. Para este intervalo predominan intercalaciones entre lodolitas de llanura de inundación o lacustres y “*Crevasse splay*” o rellenos de lago. La superficie de mínimo espacio de acomodación es límite inferior de la Formación Mirador y el final de la depositación de la Formación Los Cuervos (Figura 51).

#### **La Cabaña – 1**

#### ? **Ciclo 1 (C1)**

**TST:** Localizado hacia la parte inferior de la sección, correspondiendo a la biozona 22 y la sección inferior de la biozona 23, a profundidades entre 16510 y 16420 pies. Se caracteriza por presentar una sucesión de facies de tipo transicional que se inicia con la depositación de rellenos de canales estuarinos y termina en lodolitas de estuario o bahía. La superficie de mínimo y máximo espacio de acomodación se ajusta al límite superior de la Formación Guadalupe y a la finalización de la depositación de la Formación Barco respectivamente (Figura 52).

#### ? **Ciclo 2 (C2)**

**HST:** Ubicada en la parte media de la sección, en la parte superior de la zona 23, entre 16420 y 16340 pies de profundidad. Para este hemicyclo hacia el tope se depositan areniscas de relleno de canal fluvial y hacia la base lodolitas de llanura de inundación o lacustres, con un espesor total de 80 pies. La superficie de máximo espacio de acomodación corresponde al límite entre ambientes continentales y transicionales para la sección. La superficie de máximo espacio de acomodación corresponde al inicio de la depositación de la Formación Los Cuervos (Figura 52).

**TST:** Corresponde al hem ciclo con mayor registro litológico en la sección del pozo, localizándose en la totalidad de la biozona 24-1 y la sección inferior de la biozona 24-2, a profundidades entre 16340 y 16150 pies. La secuencia comprende depósitos de rellenos de canal fluvial, areniscas progradantes y lodolitas de llanura de inundación o lacustres. El espesor para este intervalo es de 190 pies (Figura 52).

### ? **Ciclo 3 (C3)**

**HST:** Se localiza hacia la parte más superior del intervalo de estudio, en la parte superior de la Zona 24-2, entre 16150 y 16040 pies. Esta compuesto por la intercalación de facies de depósitos de lodolitas de llanura de inundación o lacustre y areniscas de relleno fluvial. La superficie de mínimo espacio de acomodación corresponde a límite inferior de la Formación Mirador y marca la finalización de la depositación de la Formación Los Cuervos. El espesor total para este intervalo es de 110 pies (Figura 52).

### ✍ **Tocoraqua – 1**

### ? **Ciclo 1 (C1)**

**TST:** Ubicado en la base de la sección, corresponde a la biozona 22 (tope de la biozona 22 interpretado) y la parte mas inferior de la biozona 23. Empieza en un nivel de depósitos de canal estuarino a una profundidad de 17730 pies y finaliza en depósitos de areniscas de estuario a una profundidad de 17620 pies. La superficie de mínimo espacio de acomodación es coincidente con el límite superior de la Formación Guadalupe y el inicio de la depositación de la Formación Barco. La superficie de máximo espacio de acomodación marca el inicio de depósitos de tipo continental. El espesor para este evento transgresivo es de 110 pies (Figura 53).

### ? **Ciclo 2 (C2)**

**TST:** Se localiza en la parte media de la sección del pozo, sobre la biozona 23, entre 17620 y 17420 pies. Es el evento con mayor registro litológico e incluye interdigitaciones de depósitos de arenas progradantes o rellenos de lago, lodolitas de llanura de inundación o lacustres y rellenos de canales fluviales. La superficie de máximo espacio de acomodación marca la finalización de la depositación de la Formación Barco. El espesor para este hemicycle es de 200 pies (Figura 53).

### ? **Ciclo 3 (C3)**

**HST:** Se encuentra hacia el tope de la sección, en la parte superior de la biozona 23, iniciándose con la depositación de lodolitas de llanura de inundación o lacustres a una profundidad de 17420 pies, y termina con la depositación de arenas progradantes o rellenos de lago a una profundidad de 17300 pies. La superficie de máximo espacio de acomodación marca el inicio de la Formación Cuervos. La superficie de mínimo espacio de acomodación es el límite inferior de la Formación Mirador y a su vez esta superficie marca la inconformidad erosional del Eoceno (Figura 53).

### **Tame – 2**

### ? **Ciclo 1 (C1)**

**TST:** Hemicycle localizado a la base del intervalo estudiado, va de 14770 pies hasta 14660 pies, correspondiente a la biozona 22 (tope de la biozona 22 interpretado) y la parte más inferior de la biozona 23. Se caracteriza por presentar una sucesión de facies de tipo continental que corresponde a depósitos de Lodolitas de Llanura de inundación o lacustres, “*Crevasse splay*” o rellenos de lago y Canal Fluvial. Su espesor es de alrededor de 110 pies y su superficie de mínimo espacio de acomodación corresponden a el limite superior de la

Formación Guadalupe y el inicio de la depositación de la Formación Barco (Anexo.A).

### ? **Ciclo 2 (C2)**

**TST:** Este evento transgresivo se ubica en la parte media de la sección, sobre la biozona 23. La secuencia se inicia en depósitos de canal fluvial a una profundidad de 14660 pies y termina en depósitos de lodolitas de llanura de inundación a una profundidad de 14530 pies. La superficie de máxima inundación corresponde al límite superior de la Formación Barco. El espesor de este hemicycle es de 130 pies (Anexo A).

### ? **Ciclo 3 (C3)**

**HST:** Se encuentra hacia el tope de la sección, en la parte superior de la biozona 23, entre 14530 y 14420 pies. La secuencia comprende depósitos de canal fluvial, areniscas progradantes y lodolitas de llanura de inundación o lacustres. La superficie de mínimo espacio de acomodación marca el final de la Formación Los Cuervos y el límite inferior de la Formación Mirador. A su vez esta superficie marca la inconformidad erosional del Eoceno (Anexo A).

## **Arauca – 1**

### ? **Ciclo 1 (C1)**

**TST:** Este evento transgresivo esta localizado en la base de la sección, en la biozona 22 y parte inferior de la biozona 23. El registro litológico comprende profundidades entre 19120 y 18720 pies. Este intervalo se inicia con depósitos de areniscas de canal fluvial y finaliza en lodolitas de llanura de inundación o lacustres. La superficie de mínimo espacio de acomodación corresponde al inicio de la depositación de la Formación Barco y al límite superior de la Formación Guadalupe. El espesor total de este hemicycle es de 400 pies (Figura 54).

### ? Ciclo 2 (C2)

**TST:** Se localiza en la parte media de la sección del pozo, sobre la biozona 23, entre 18720 y 18490 pies. La secuencia esta compuesta por interdigitaciones de depósitos de arenas progradantes o rellenos de lago, lodolitas de llanura de inundación o lacustres y depósitos de canales fluviales. La superficie de máxima inundación marca la finalización de la Formación Barco. El espesor para este hemicycle es de 230 pies (Figura 54).

### ? Ciclo 3 (C3)

**HST:** Se encuentra hacia el tope de la sección, en la parte superior de la zona 23, entre 18490 y 18120 pies. La secuencia comprende depósitos de canal fluvial, areniscas progradantes y lodolitas de llanura de inundación o lacustres. La superficie de mínimo espacio de acomodación corresponde al final de la depositación de la Formación Los Cuervos y el límite inferior de la Formación Mirador. A su vez, marca una superficie de inconformidad que responde a un evento erosivo. El espesor de este hemicycle es de 370 pies (Figura 54).

## Arauca – 2

### ? Ciclo 1 (C1)

**TST:** Localizado hacia la base de la sección, entre 18490 y 18340 pies correspondiente a la biozona 22. Se caracteriza por presentar una interdigitación de facies de tipo continental que corresponde a depósitos de Lodolitas de Llanura de inundación o lacustres, “*Crevasse splay*” o rellenos de lago y Canal Fluvial. Su espesor es de alrededor de 150 pies y su superficie de mínimo espacio de acomodación corresponden a el limite superior de la Formación Guadalupe y el inicio de la depositación de la Formación Barco (Figura 54).

### ? **Ciclo 2 (C2)**

**TST:** Se localiza en la parte media de la sección del pozo, en la biozona 23, entre 18340 y 18050 pies. Es el evento con mayor registro litológico en la sección e incluye interdigitaciones de depósitos de arenas progradantes o rellenos de lago, lodolitas de llanura de inundación o lacustres y depósitos de canales fluviales. La superficie de máximo espacio de acomodación corresponde a la finalización de la Formación Barco. El espesor para este hemicycle es de 290 pies (Figura 54).

### ? **Ciclo 3 (C3)**

**HST:** Este evento progradacional se localiza hacia la parte superior de la sección. Se inicia con depósitos de lodolitas de llanura de inundación a una profundidad de 18050 pies y termina en depósitos de arenas progradantes a una profundidad de 17930 pies. La superficie de máximo espacio de acomodación es coincidente con el inicio de la Formación Los Cuervos. La superficie de mínimo espacio de acomodación es la finalización de la Formación los Cuervos. Además, de ser el límite inferior de la Formación Carbonera y marcar la discordancia del Eoceno. El espesor para este intervalo es de 190 pies (Figura 54).

## **Arauca – 4**

### ? **Ciclo 1 (C1)**

**TST:** Se localiza hacia la base de la sección del pozo entre 18550 y 18480 pies. Hacia la parte inferior de la biozona 22. La secuencia esta compuesta principalmente por depósitos de canal fluvial y pequeñas interdigitaciones de depósitos de arenas progradantes o rellenos de lago y lodolitas de llanura de inundación o lacustres. Para este hemicycle el espesor es de alrededor de 70 pies y su superficie de mínimo espacio de acomodación corresponde a el límite superior de la Formación Guadalupe y el inicio de la depositación de la Formación Barco (Figura 56).

### ? Ciclo 2 (C2)

**TST:** Este evento transgresivo se ubica en la parte media de la sección del pozo, mayoritariamente en la zona 22 y segmento inferior de la biozona 23, entre 18480 y 18150 pies. La secuencia comprende depósitos de canal fluvial, areniscas progradantes y lodolitas de llanura de inundación o lacustres. La superficie de máximo espacio de acomodación corresponde a la finalización de la Formación Barco. El espesor de este hemicycle es de 330 pies (Figura 56).

### ? Ciclo 3 (C3)

**HST:** Este intervalo se localiza al tope de la sección de estudio en la parte superior de la zona 23, y se caracteriza por facies de ambiente continental, iniciando en depósitos de lodolitas de llanura de inundación o lacustres a una profundidad de 18150 pies y terminando en depósitos de canal fluvial a una profundidad de 17790 pies. Su espesor es de 360 pies. La superficie de mínimo espacio de acomodación es coincidente con la finalización de la Formación Los Cuervos. Además, de ser el límite inferior de la Formación Carbonera y marcar la discordancia del Eoceno (Figura 56).

### Arauca – 3

### ? Ciclo 1 (C1)

**TST:** Se ubica en la parte inferior de la sección estudiada del pozo, comenzando a una profundidad de 18350 pies, y terminando a 18180 pies, sobre el inicio de la biozona 22, este intervalo está constituido por una intercalación (170 pies de espesor) de depósitos de lodolitas de llanura de inundación o lacustres y “*Crevasse splay*” o rellenos de lago. La superficie de mínimo espacio de acomodación marca el inicio de la depositación de la Formación Barco y el límite superior de la Formación Guadalupe (Figura 56).

### ? **Ciclo 2 (C2)**

**TST:** Este evento transgresivo se ubica en la parte media de la sección del pozo, hacia el intervalo superior de la biozona 22 e inicio de la biozona 23, entre 18180 y 17950 pies. La secuencia comprende depósitos de canal fluvial, areniscas progradantes y lodolitas de llanura de inundación o lacustres. La superficie de máxima inundación marca la finalización de la Formación Barco. El espesor de este hemicycle es de 230 pies (Figura 56).

### ? **Ciclo 3 (C3)**

**HST:** Hemicycle localizado al tope del intervalo estudiado, va de 18180 pies hasta 17800 pies, en la biozona 23. Se caracteriza por presentar una sucesión de facies de tipo continental que corresponde a depósitos de Lodolitas de Llanura de inundación o lacustres, “*Crevasse splay*” o rellenos de lago y Canal Fluvial. Su espesor es de alrededor de 380 pies. La superficie de mínimo espacio de acomodación corresponde al límite basal de la Formación Mirador y el tope de la Formación Los Cuervos. Además, de coincidir con la superficie de inconformidad del Eoceno (Figura 56).

### **Gibraltar – 1**

Para este pozo se hacen correcciones por espesor de acuerdo a Meza *et al.* (2000), debido a buzamientos y desviaciones de pozo mayores a 20°.

### ? **Ciclo 1 (C1)**

**TST:** Hemicycle localizado a la base del intervalo estudiado, hacia la parte inferior de la biozona 22, entre 9550 pies hasta 9290 pies, se caracteriza por presentar depósitos de Lodolitas de Llanura de inundación o lacustres y depósitos de canal fluvial. Su espesor es de alrededor de 260 pies (espesor corregido, 67 pies). Este evento transgresional se registra dentro de la Formación Barco.

### ? **Ciclo 2 (C2)**

**TST:** Corresponde al hemicyclo con mayor registro litológico en la sección del pozo, siendo parte de la biozona 22 y el intervalo inferior de la biozona 23, se localiza entre 9290 y 8520 pies. La secuencia comprende depósitos de canal fluvial, areniscas progradantes y lodolitas de Llanura de inundación o lacustres. La superficie de máximo espacio de acomodación se ajusta al final de la depositación de la Formación Barco. El espesor para este intervalo es de 770 pies (espesor corregido, 197 pies).

### ? **Ciclo 3 (C3)**

**HST:** Ubicado en la parte media de la sección, en el intervalo superior de la biozona 23. Empieza en un nivel de lodolitas de inundación o lacustres a una profundidad de 8520 pies y finaliza en depósitos de areniscas de Canal fluvial a una profundidad de 8010 pies. El espesor para este evento transgresivo es de 510 pies (espesor corregido, 131 pies).

**TST:** Localizado en la parte media-alta de la sección del pozo, en la biozona 24-1, entre 8010 y 7900 pies. Se caracteriza por la ocurrencia de depósitos de canales fluviales y lodolitas de llanura de inundación. El espesor para este hemicyclo es de 110 pies (espesor corregido, 28 pies).

### ? **Ciclo 4 (C4)**

**HST:** Hemiciclo localizado entre 7900 y 7710 pies, el registro litológico se compone de lodolitas de llanura de inundación o lacustres. La superficie de mínimo espacio de acomodación corresponde al límite inferior de la Formación Mirador y a su vez el final de la depositación de la Formación Los Cuervos. Su espesor es de 90 pies (espesor corregido, 23 pies).

### 3.1.4 Síntesis Estratigráfica

Para la línea de correlación, a lo largo de la transecta, la determinación del intervalo Paleoceno Superior, documenta un incremento hacia el Norte del intervalo de tiempo de no registro (erosión o no depósito). A este respecto, se pierde parte de la Formación Los Cuervos (biozona 24-1 y 24-2), y a su vez la unidad del oligoceno, Formación Carbonera, reposa en contacto erosivo con el intervalo Paleoceno Superior. De acuerdo a esto se pueden definir dos zonas; la zona del Piedemonte y Cuenca Llanos, Central y Sur, (Coporo-1, Buenos Aires-3, Cusiana-5, La cabaña - 1) completa, y la zona del Piedemonte y Cuenca Llanos, Norte, (Campo Arauca, Tocaragua-1 y Tame-2) incompleta. El pozo Gibraltar-1, caso particular del área Norte, su secuencia se encuentra completa (Figura 19).

En cuanto a la sedimentación de las unidades para este intervalo de tiempo (Paleoceno Superior) el total de la Formaciones Los Cuervos y Barco son depositados en los pozos Cusiana-5, La Cabaña-1, Tocaragua-1, Tame-2, Arauca-1, 2, 3, 4. De la misma manera ocurre para los pozos Coporo-1, Buenos Aires-3 y Gibraltar-1, en el caso de la Formación Los Cuervos, pero con la diferencia que para la Formación Barco se toma la sección superior de esta unidad correspondiente al Paleoceno Superior (Figura 19).

La Formación Los Cuervos a lo largo de la transecta, está constituida por lodolitas con delgadas intercalaciones arenosas de origen continental, registrándose hacia el Norte de la transecta, un incremento considerable de la proporción de areniscas. En general se deposita sobre la biozona 24-1, 24-2 y la sección superior de la biozona 23 (Figura 19).

Las areniscas de las Formación Barco para el tiempo Paleoceno Superior, conforman intervalos de areniscas de buena continuidad lateral, esencialmente depositadas en ambientes transicionales en la zona Central y Sur, y de tipo

continental hacia la zona Norte (Anexo A). En general, se depositan sobre la biozona 22 y la sección inferior de la biozona 23 (Figura 19).

Las litofacies lodosas del intervalo Paleoceno Superior muestran un incremento de espesor, hacia la región Central de la transecta de estudio con espesores de 279 pies, 296 pies y 216 pies, correspondientes a los pozos Buenos Aires-3, Cusiana-5 y La Cabaña-1, respectivamente (Figura 18). Especiales espesores de niveles lodolíticos tiene el pozo Arauca-1 (174 pies) y Gibraltar - 1 (472 pies, espesor corregido). En general, los espesores mostrados a lo largo de la transecta muestran las mejores condiciones de preservación del registro litológico en la zona Central de la transecta (Buenos Aires-3, Cusiana-5, La Cabaña-1) a partir del cual estos disminuyen tanto en dirección Norte como en dirección Sur (Figura 18). Los excepcionales espesores para los pozos del Campo Arauca y Gibraltar-1, podría ser consecuencia del desarrollo del alto estructural de Arauca en el Paleoceno (Beicip, 1995) y el levantamiento del Macizo de Santander a comienzos del Paleógeno (Rangel *et al.*, 2000) respectivamente, el cual creó mayor espacio de acomodación y mayor material para depositar.

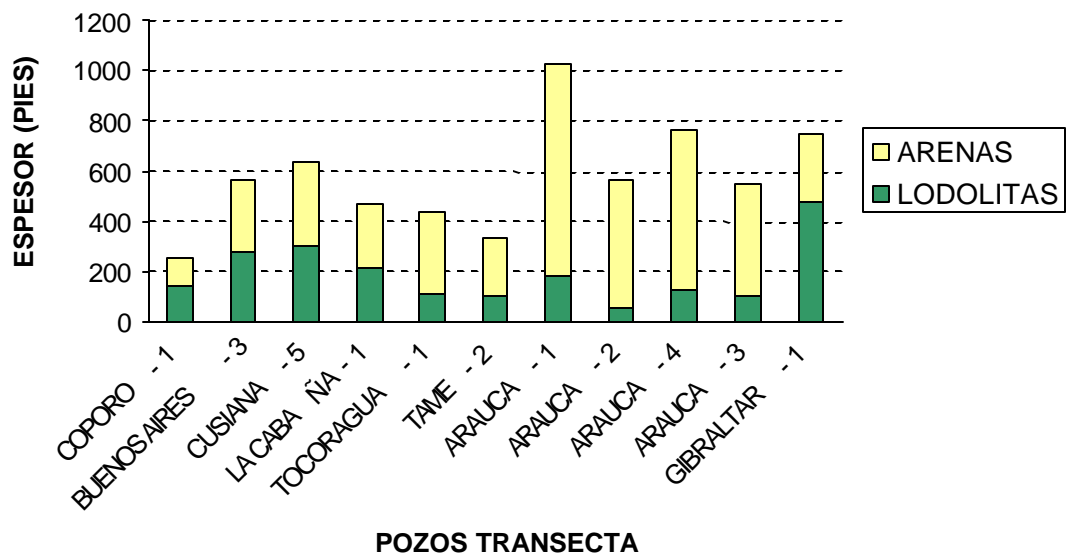


Figura 18. Comportamiento de espesores de litofacies lodosas y arenosas para el intervalo Paleoceno Superior, a lo largo de la transecta.

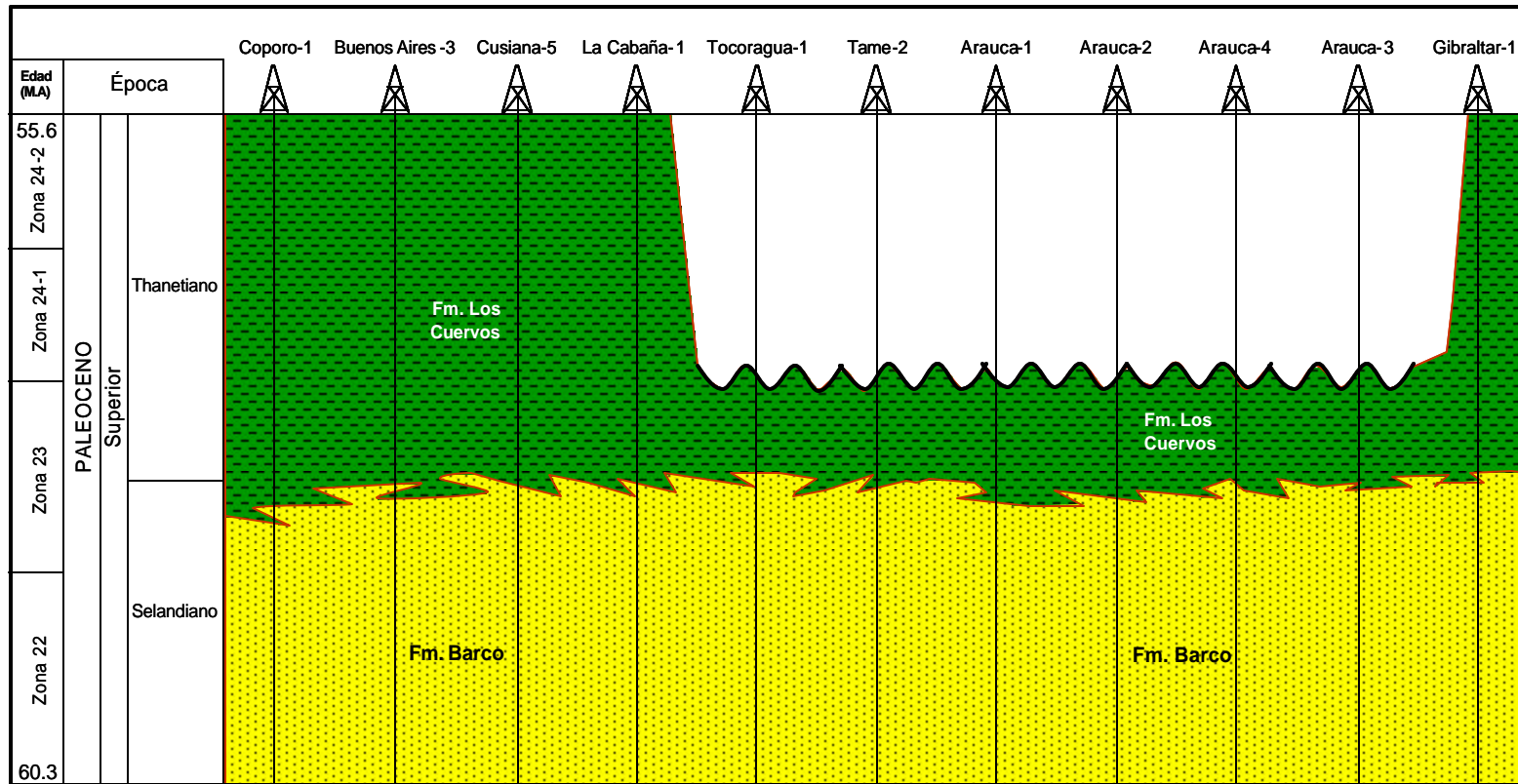


Figura 19. Carta Cronoestratigráfica del intervalo Paleoceno Superior, para la transecta de estudio.

## 3.2 CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN GEOQUÍMICA

En este capítulo se analizan los resultados de los análisis geoquímicos realizados en el laboratorio de geoquímica del ICP (33 análisis de COT y 18 análisis de pirolisis; Anexo D y E) y los recopilados de información geoquímica anterior (Anexo C), para los diferentes pozos a lo largo de la transecta.

Los análisis geoquímicos realizados para la evaluación del intervalo de interés fueron: porcentaje de Carbono Orgánico Total y Pirolisis “*Rock-Eval*”. Estos análisis, que se exponen a continuación, permiten caracterizar geoquímicamente las secciones de pozo y determinar los intervalos con mejor potencial de generación de hidrocarburos.

### 3.2.1 Pirolisis Seca Tipo “*Rock-Eval*”

La pirolisis es una técnica analítica de la industria del petróleo que permite evaluar en una roca la presencia de trazas de hidrocarburos, el potencial de generación de crudo o gas y la madurez termal de una posible roca fuente, también da la información del tipo de materia orgánica de una roca madre potencial. La información que genera consiste en cuatro parámetros básicos: S1, S2, S3 y Tmax.

- ? **S1:** es la medida de hidrocarburos libres o absorbidos en la roca, expresado en miligramos de hidrocarburos por gramos de roca (mgHC/ gR).
- ? **S2:** representa los hidrocarburos generados durante la pirolisis, expresado en miligramos de hidrocarburos por gramos de roca (mgHC/ gR)

- ? **S3:** es la medida del CO<sub>2</sub> resultante de la pirolisis, expresado en miligramos de CO<sub>2</sub> por gramos de roca (mgCO<sub>2</sub>/ gR).
- ? **Tmax:** es la temperatura correspondiente al máximo de generación de hidrocarburos durante la pirolisis, es decir la temperatura a la cual se registra el máximo pico S2.

El valor de S1 depende del potencial hidrocarburífero de la roca, del grado de madurez y fenómenos de migración.

El pico S2 se refiere al crudo que el Kerógeno puede llegar a generar en una subsecuente maduración termal, el cual indica el potencial petrolero residual, y el parámetro Tmax se refiere al grado de madurez termal de la materia orgánica.

### 3.2.2 Carbono Orgánico Total

Es determinado como la diferencia gravimétrica entre el carbono total (determinado por quema) y el carbono inorgánico en la roca (determinado por ataque en ácido clorhídrico).

### 3.2.3 Parámetros Generales de Interpretación

Los Resultados arrojados por Pirólisis “Rock-Eval” y COT fueron evaluados de acuerdo los parámetros de cantidad, calidad y madurez de la materia orgánica, basados en la clasificación de Peters y Cassa, (1994).

La cantidad de materia orgánica fue evaluada mediante el parámetro de Carbono Orgánico Total (COT). Los valores de interpretación se encuentran en la tabla tres.

La calidad de la materia orgánica fue evaluada mediante el parámetro Índice de Hidrógeno (IH), obtenido a partir de la Pirólisis “Rock-Eval” (Tabla 4).

En cuanto a los valores de IH cabe resaltar que Dependiendo del tipo de kerógeno, los valores de IH van disminuyendo con el aumento de la temperatura.

La madurez de la materia orgánica, fue evaluada mediante el parámetro de T<sub>máx</sub>, obtenido a partir de la Pirólisis “Rock-Eval”, los valores utilizados en su interpretación son mostrados en la tabla cinco.

COT (%)	Interpretación
0.0 – 0.5	POBRE
0.5 – 1.0	REGULAR
1.0 – 2.0	BUENO
2.00 – 4.0	MUY BUENO
> 4.0	EXCELENTE

Tabla 3. Parámetros de interpretación de Carbono Orgánico Total (Tomado de Peter y Cassa, 1994).

IH (mgHC/g COT)	Tipo de Kerógeno
> 600	I
300 - 600	II
200 - 300	II/III
50 - 200	III
< 50	IV

Tabla 4. Parámetros de interpretación de IH para la determinación del tipo de Kerógeno (Tomado de Peter y Cassa, 1994).

Tmáx. (°C)	Interpretación
< 435	INMADURA
435 - 445	MADUREZ TEMPRANA
445 - 450	PICO DE GENERACIÓN
450 - 470	MADUREZ TARDÍA
> 470	SOBREMADURA

Tabla 5. Parámetros de interpretación de Tmax (Tomado de Peter y Cassa, 1994).

### 3.2.4 Geoquímica Paleoceno Superior

A continuación se evalúa las propiedades geoquímicas de cada pozo, de acuerdo a los parámetros interpretativos formulados anteriormente utilizando histogramas de distribución.

Las muestras (con COT mayor o igual a 0,8%) sometidas a pirolisis en este estudio, fueron graficadas en el diagrama modificado de Van Krevelen y comparadas con la interpretación realizada a través de los histogramas.

Para el pozo Tame - 2, la falta de información y de registro de roca (ripios y núcleos) en Litoteca, no permitió la recopilación y realización de análisis geoquímicos, por tal razón no se incluye en esta evaluación.

#### Pozo Coporo – 1:

La evaluación geoquímica (COT, IH y Tmax) de las muestras analizadas para este pozo, se dispersan en toda la sección de interés (Figura 49).

- ? La distribución de valores de COT identifica diez muestras (91%) en todo el intervalo, con contenido de materia orgánica pobre (0,0 – 0,5%) y una muestra

(9%), con COT regular (0,5-1,0%) localizada en la Formación Los Cuervos a 16710 pies. Para este pozo la cantidad de materia orgánica en general, manifiesta un contenido de COT menor o igual a 0,5% (Figura 20).

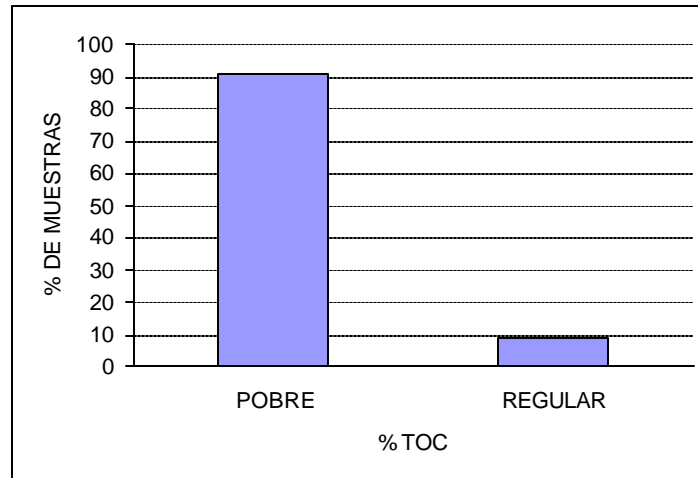


Figura 20. Histograma de la distribución del Contenido de Materia Orgánica en muestras del intervalo Paleoceno Superior, Pozo Coporo – 1.

? El análisis en la distribución de Tmax identifica ocho muestras en la parte media y superior de la sección (73%) con materia orgánica inmadura (<435C<sup>o</sup>) y el restante 27%, hacia la base del intervalo (3 muestras) en la etapa de madurez temprana (435-445C<sup>o</sup>). Para este intervalo es entonces representativo la inmadurez de la roca (Figura 21).

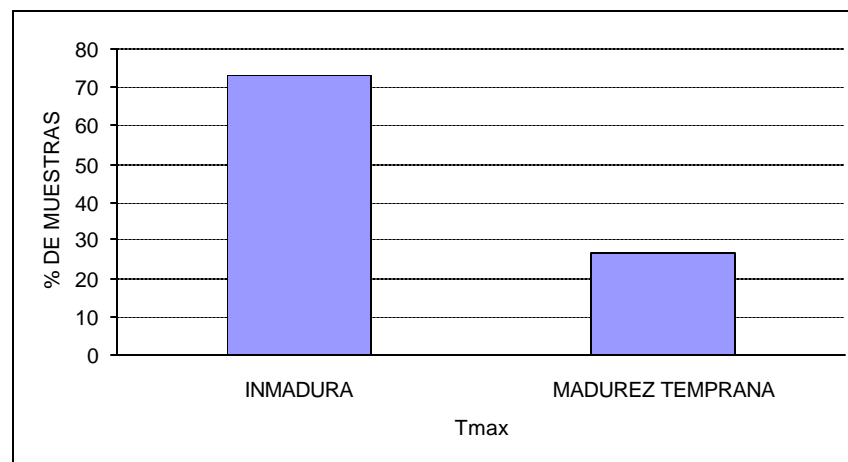


Figura 21. Histograma de la distribución de Tmax en muestras del intervalo Paleoceno Superior, Pozo Coporo – 1.

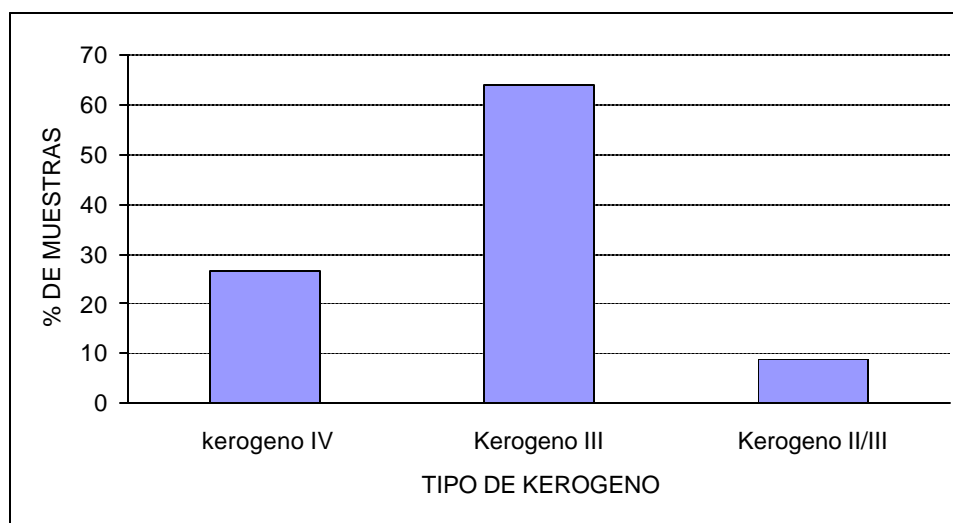


Figura 22. Histograma de la distribución de Kerógeno en muestras del intervalo Paleoceno Superior, Pozo Coporo – 1.

- ? El tipo de Kerógeno identificado corresponde II/III, III y IV. La clase principal de materia orgánica, distribuida en toda la sección, es kerógeno tipo III (7 muestras, 64%), seguido por materia orgánica tipo IV con tres muestras (27%) localizadas en el sector intermedio del intervalo, y por ultimo kerógeno tipo II/III (9%) con una muestra localizada en la parte inferior de la sección (Figura 22). En general se presenta materia orgánica predominantemente de tipo continental.

### Pozo Buenos Aires – 3:

Las muestras analizadas en este pozo corresponden a todo el intervalo referente al Paleoceno Superior (Figura 50).

- ? El COT varia de pobre a muy bueno (0,0-4,0%). El 86% (32 muestras) ubicadas principalmente en la parte media e inferior del intervalo corresponde a materia orgánica con COT que varia de pobre a regular (0,0-1,0%), el 9% (4 muestras) localizadas hacia el tope, están en el rango de COT bueno (1,0-2,0%) y el restante 5% disperso en la sección (2 muestras) esta con COT muy bueno (2,0-

4,0%). en general este intervalo presenta un regular contenido de materia orgánica (Figura 23).

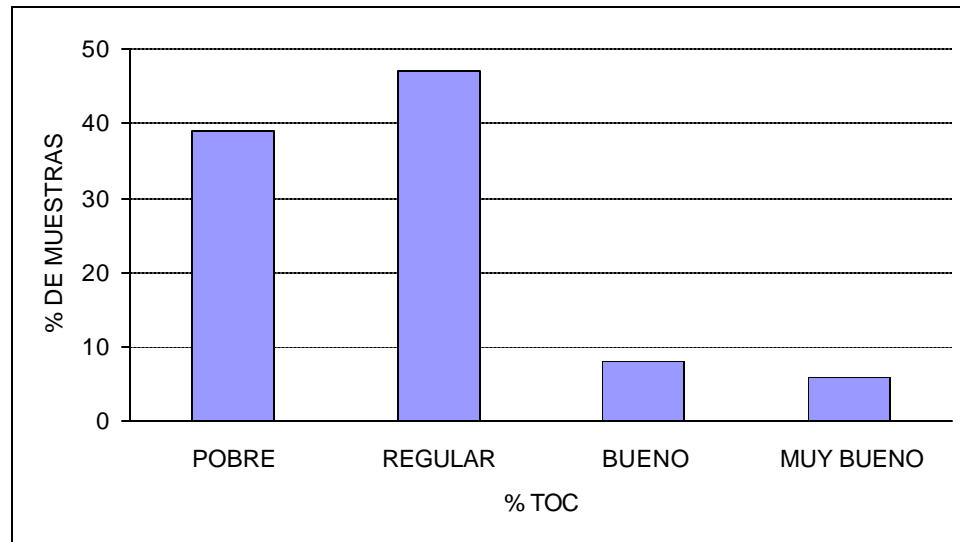


Figura 23. Histograma de la distribución del Contenido de Materia Orgánica en muestras del intervalo Paleoceno Superior, Pozo Buenos Aires – 3.

- ? Respecto al Tmax, el 20% (7 muestras) dispuestas en toda la columna están inmaduras (<435C°), el 69% (24 muestras) ubicadas principalmente hacia la base y tope de la sección se encuentran en etapa de madurez temprana (435-445C°) y tan solo el 11% (4 muestras) localizadas hacia el tope y la base se encuentra en el pico de generación (445-450C°). Podría decirse que estas muestras para el pozo Buenos Aires – 3 se encuentran en madurez temprana (Figura 24).
- ? En cuanto a la calidad de la materia orgánica se observa que nueve muestras (25%) dispuestas hacia la base y el tope del intervalo, corresponde a kerógeno de tipo IV, el 61% disperso en toda la sección, tienen características de Kerógeno de tipo III y el restante kerógeno de tipo II/III y II representa el 6 y 8% respectivamente. Para concluir, el histograma muestra una predominancia de Kerógeno tipo III, con algún porcentaje (25%) de materia orgánica degradada (Figura 25).

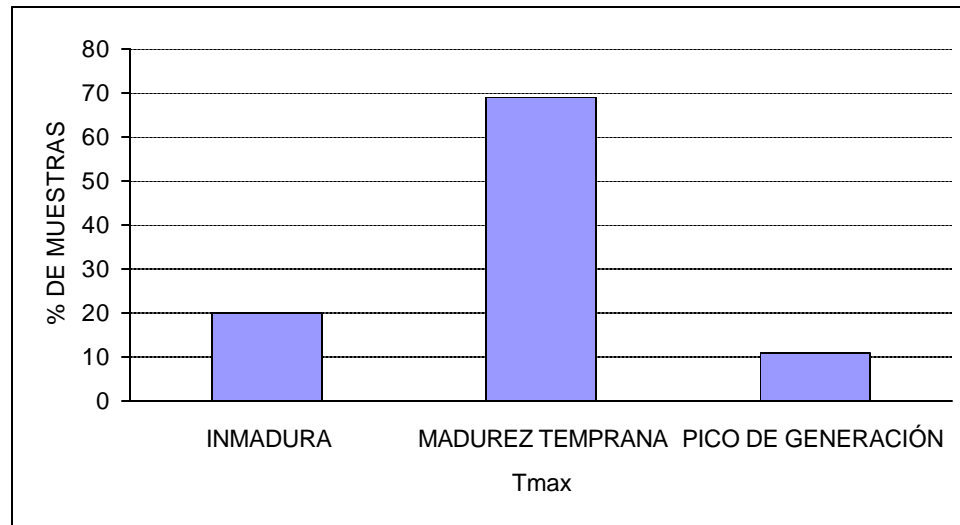


Figura 24. Histograma de la distribución de Tmax en muestras del intervalo Paleoceno Superior, Pozo Buenos Aires – 3.

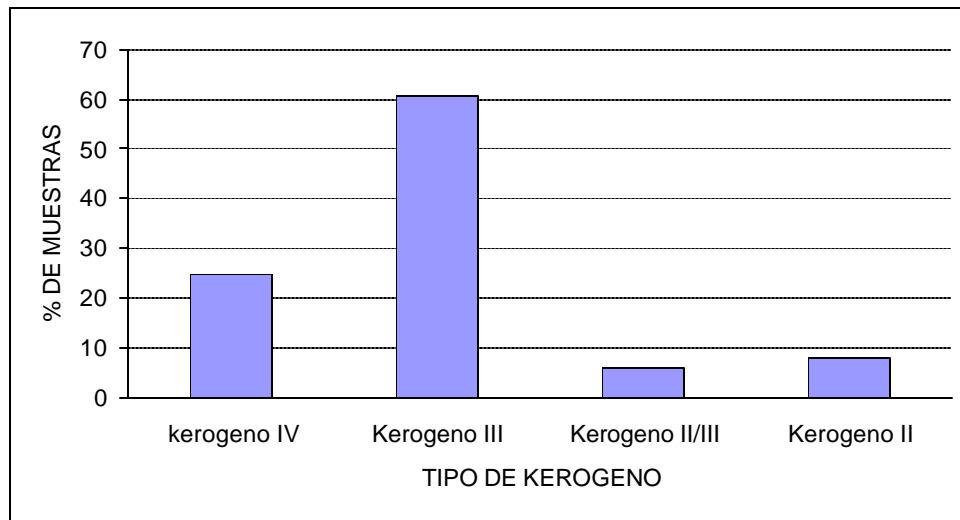


Figura 25. Histograma de la distribución de Kerogeno en muestras del intervalo Paleoceno Superior, Pozo Buenos Aires – 3.

### Pozo Cusiana – 5:

Para este pozo gran parte de la sección no tiene registros litológicos (Ripios y núcleos) en Litoteca, imposibilitando los análisis de laboratorio. Los análisis geoquímicos tanto recopilados (Anexo C) como los realizados (Anexo D) en este proyecto se localizan hacia la base y el tope de intervalo (Figura 51).

- ? El COT varía de pobre a regular, con el 89% (8 muestras) localizadas hacia el tope y la base del intervalo, correspondiente a valores de COT Pobre (0,0-0,5%) y el 11% (1 muestra) a COT regular (0,5-1,0%), indicando niveles muy bajos de COT con contenido generalizados de COT pobre (Figura 26).

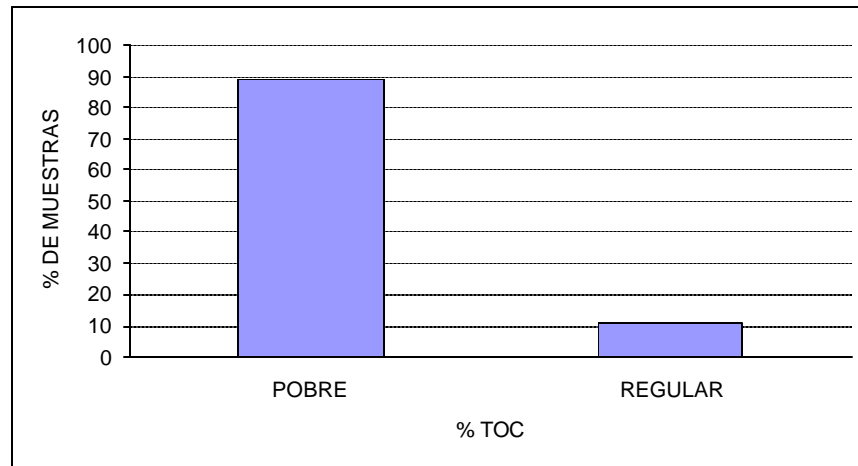


Figura 26. Histograma de la distribución del Contenido de Materia Orgánica en muestras del intervalo Paleoceno Superior, Pozo Cusiana – 5.

- ? Los valores mostrados, localizados hacia tope, indican que la madurez termal varía de inmadura a madura, el 60% (3 muestras) corresponde a inmaduras (<435C<sup>0</sup>) y el 40% (2 muestras) a madurez temprana (435-445C<sup>0</sup>) (Figura 27).

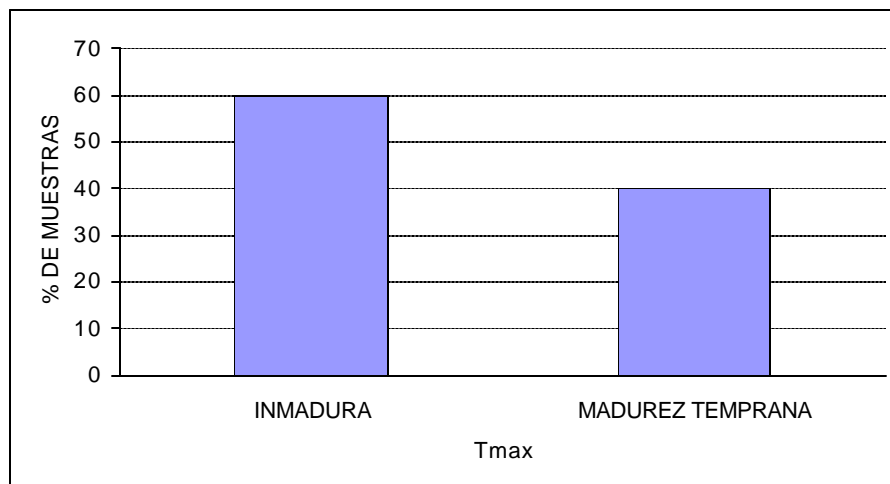


Figura 27. Histograma de la distribución de Tmax en muestras del intervalo Paleoceno Superior, Pozo Cusiana – 5.

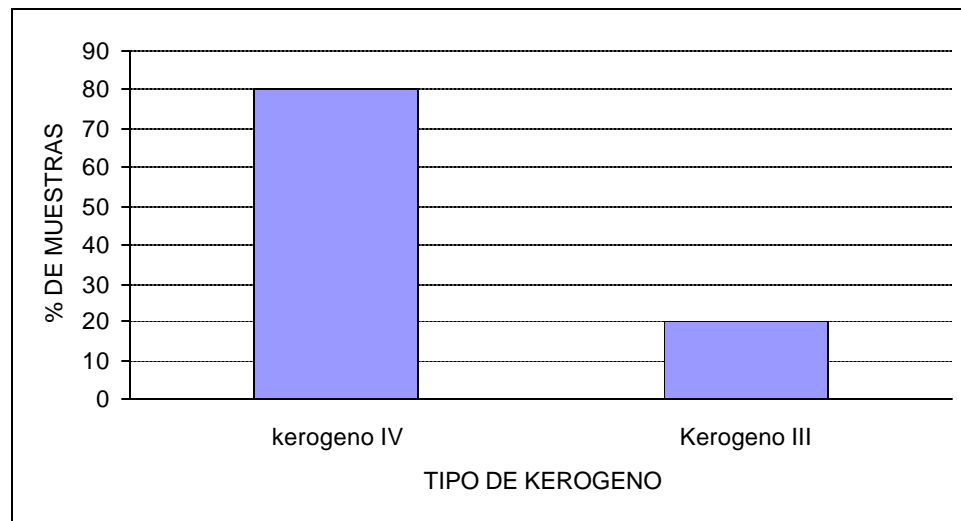


Figura 28. Histograma de la distribución de Kerógeno en muestras del intervalo Paleoceno Superior, Pozo Cusiana – 5.

- ? La distribución grafica muestra kerógeno tipo IV y III localizado en el tope del intervalo, con el 80% (4 muestras) pertenecientes a Kerógeno tipo IV y el 20% (1 muestra) a kerógeno tipo III (Figura 28). En general, se observa mayoritariamente muestras compuestas con materia orgánica de tipo IV.

### Pozo La Cabaña – 1:

Para este pozo las muestras en Litoteca están agotadas, de tal manera que los datos geoquímicos mostrador para intervalo de tiempo corresponde a recopilación bibliográfica (Figura 52).

- ? El contenido de materia orgánica oscila entre regular a muy bueno, correspondiente al 25% (1 muestra) con COT regular (0,5-1,0%), 50% (2 muestras) localizadas en la parte media y base de la sección, con COT bueno (1,0-2,0%) y el 25% (1 muestra) ubicada en la parte media con COT muy bueno (2,0-4,0%) (Figura 29). En general predominan contenidos buenos de materia orgánica.

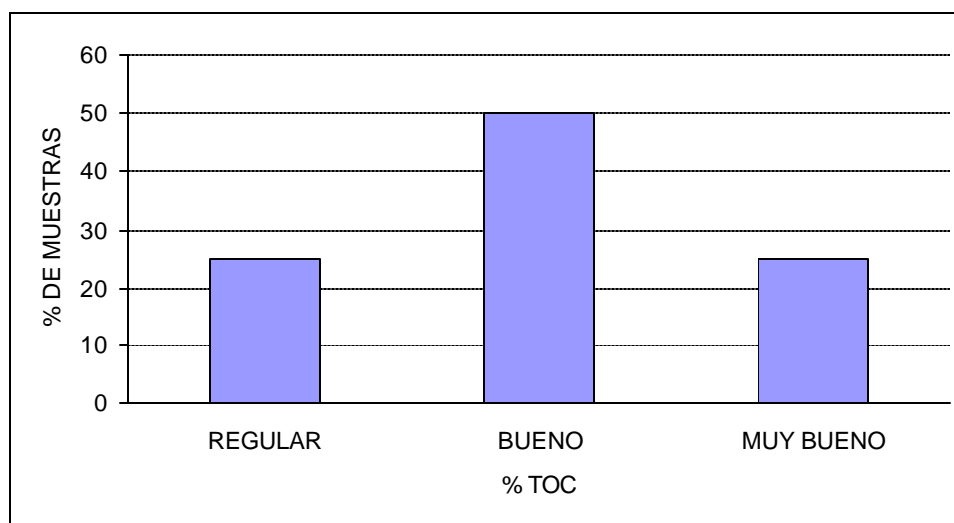


Figura 29. Histograma de la distribución del Contenido de Materia Orgánica en muestras del intervalo Paleoceno Superior, Pozo La Cabaña – 1.

? La madurez termal de este pozo indica rangos que van desde la inmadurez hasta la madurez temprana. El 75% (3 muestras) situado en la parte media de la sección corresponden al rango inmaduro y el 25% (1 muestra) restante localizado a la base del intervalo se encuentra en la etapa de la madurez temprana. En general el comportamiento de esas muestras tienden hacer inmaduro para este intervalo (Figura 30).

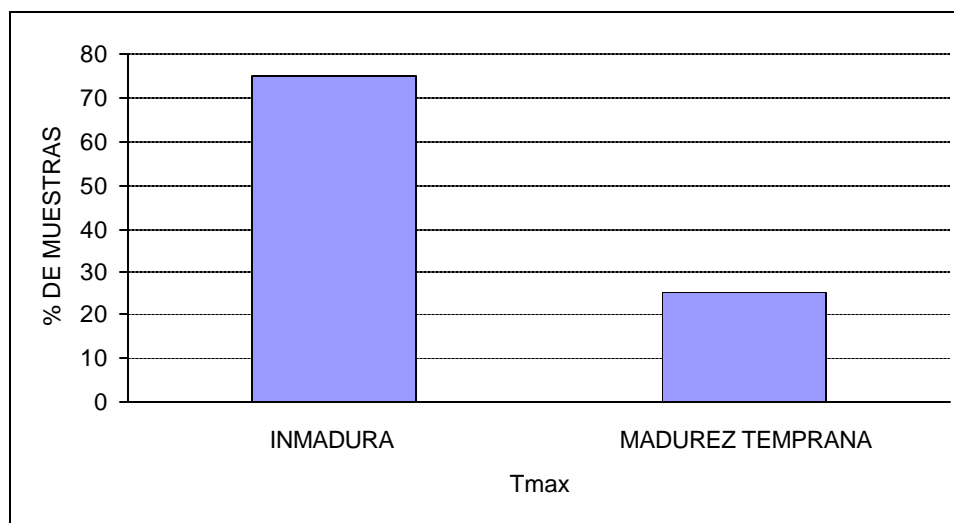


Figura 30. Histograma de la distribución de Tmax en muestras del intervalo Paleoceno Superior, Pozo La Cabaña – 1.

- ? En cuanto a la identificación del tipo de kerógeno para este pozo, el 100% (4 muestras) corresponden a materia orgánica de tipo III.

### Pozo Tocaragua – 1

- ? El contenido de materia orgánica varía de regular a excelente, distribuido en un 10% (1 muestra) hacia el tope del intervalo con COT regular (0,5-1,0%), 20% (2 muestras) localizadas en la base y en el tope, con COT bueno (1,0-2,0%), 30% (3 muestras) con COT muy bueno (2,0-4,0%) y 40% (4 muestras) ubicadas en la parte media de la sección, con COT excelente (>4%) (Figura 31 y 53). En general, la distribución de los datos indican una predominancia de contenido de materia orgánica excelente.

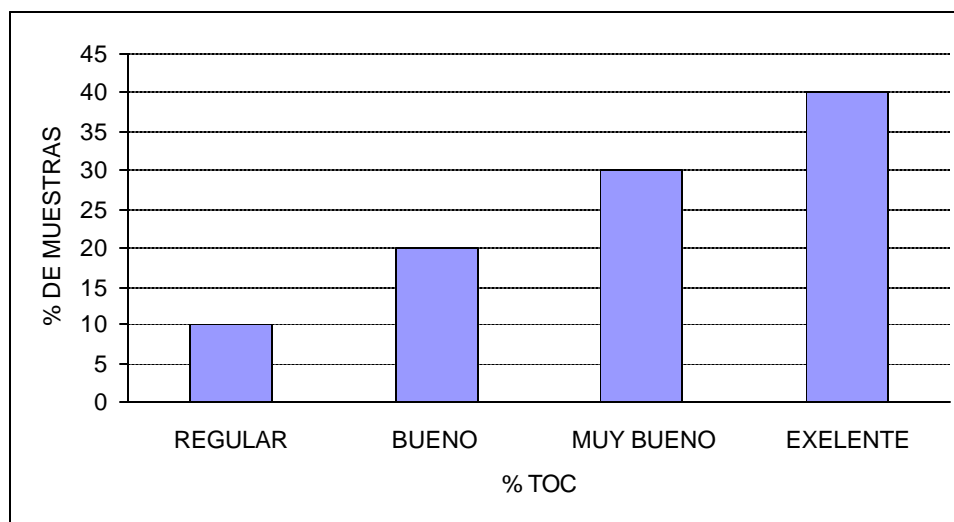


Figura 31. Histograma de la distribución de Carbono Orgánico Total en muestras del intervalo Paleoceno Superior, Pozo Tocaragua - 1.

- ? El rango de madurez termal de las muestras analizadas están entre inmaduras y madurez temprana, distribuyéndose el 80% (8 muestras) a lo largo de toda la sección con Tmax inmaduro (<435C<sup>0</sup>) y el restante 20% (2 muestras) con madurez temprana (435-445C<sup>0</sup>) (Figura 32 y53).

? La grafica de distribución revela que el Kerógeno encontrado va desde III hasta II pasando por mezclas de esto dos tipos. El 10% (1 muestra) hacia el tope del intervalo, corresponde a kerógeno de tipo III, el 50% (5 muestras) localizado en toda la columna hace referencia a kerógeno tipo II/III y el 40% (4 muestras) localizadas principalmente en la parte media de la sección referencia a materia orgánica de tipo II (Figura 33 y 53). En General para el histograma de distribución en este pozo predominan mezclas de Kerógeno tipo II y III. Determinaciones realizadas teniendo en cuenta el diagrama de Van Krevelen muestran kerógeno de tipo III rico en contenido de Hidrogeno (Figura 44).

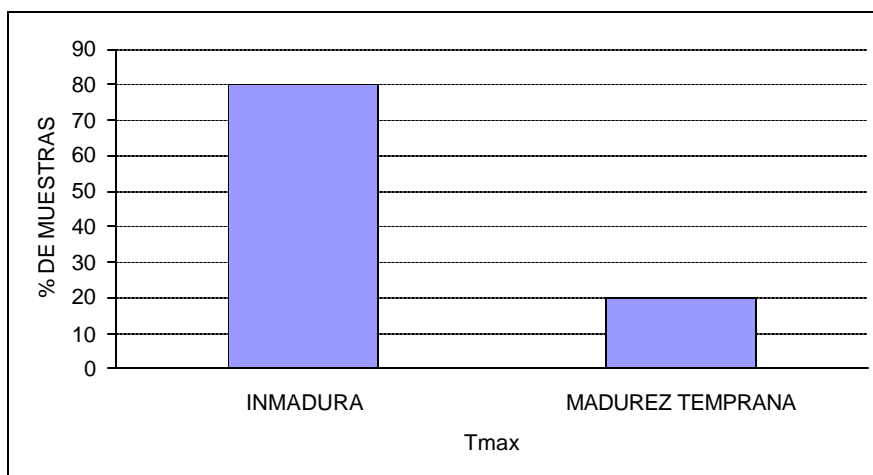


Figura 32. Histograma de la distribución de Tmax en muestras del intervalo Paleoceno Superior, Pozo Tocoragua - 1.

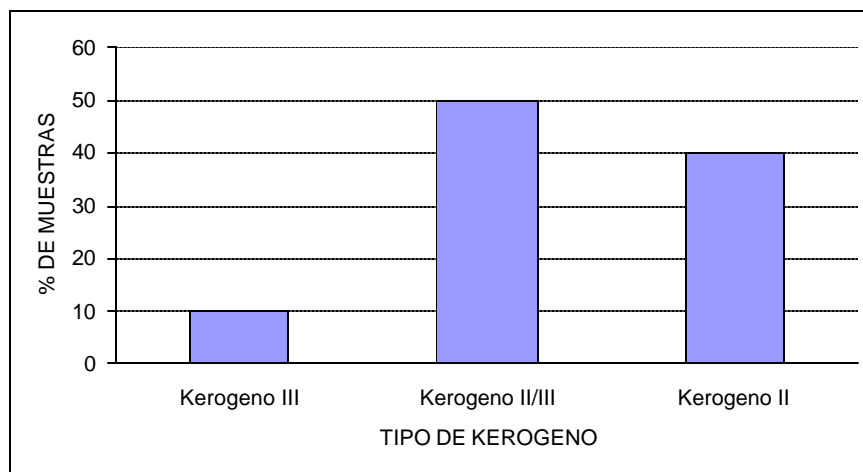


Figura 33. Histograma de la distribución de kerógeno en muestras del intervalo Paleoceno Superior, Pozo Tocoragua - 1.

### Pozo Arauca – 1

Para este pozo las muestras en Litoteca están agotadas, de tal manera que los datos geoquímicos mostrador para intervalo de tiempo corresponde a recopilación bibliográfica. Todas las muestras dispuestas para esta evaluación geoquímica son parte de la sección superior del intervalo a estudiar (Figura 54).

- ? El COT varia de regular a excelente, el 14% (1 muestra) corresponde a regular (0,5-1,0%), el 29% (2 muestras) a bueno (1,0-2,0%), el 14% a muy bueno (2,0-4,0%) y el 43% (3 muestras) a excelente (>4%). En general la distribución indica contenidos de COT excelentes (Figura 34).

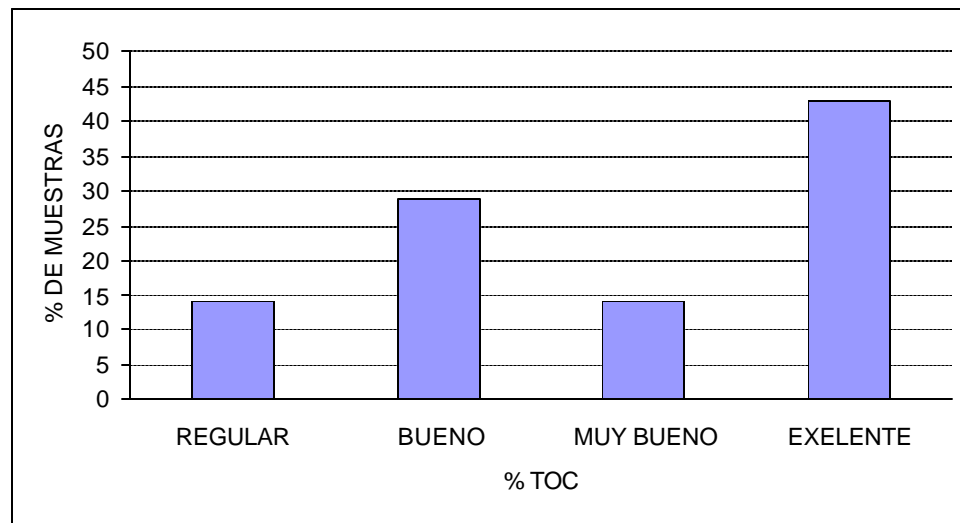


Figura 34. Histograma de la distribución de Carbono Organico Total en muestras del intervalo Paleoceno Superior, Pozo Arauca - 1.

- ? En cuanto al grado de madurez termal el 100% (7 muestras) están en el rango de inmadurez (<435C°).
- ? El tipo de materia orgánica identificada de acuerdo al histograma de distribución, indica Kerógeno de tipo II y III Con porcentaje de 29 (2 muestras) y 71% (5 muestras) respectivamente (Figura 35). El comportamiento general para este intervalo muestra una predominancia de materia orgánica de tipo III.

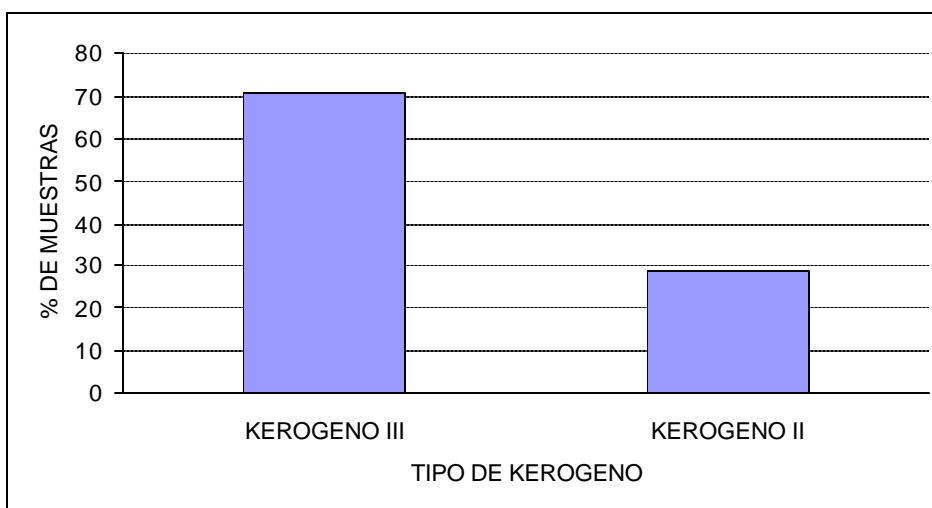


Figura 35. Histograma de la distribución de kerógeno en muestras del intervalo Paleoceno Superior, Pozo Arauca - 1.

### Pozo Arauca – 2

El muestreo realizado para este pozo en Litoteca, estuvo perjudicado por la cantidad insuficiente de material, ocurrido posterior a la preparación, que afectó la densidad del muestreo y no permitió el análisis de pirolisis para la sección inferior del intervalo (Figura 54).

- ? Los porcentajes de COT muestran valores que varían de buenos a excelente, el 20% (1 muestra) ubicado en la parte superior de la sección corresponde a COT bueno (1,0-2,0%), el 60% (3 muestras) distribuidas en todo el intervalo con COT muy bueno (2,0-4,0%), y el 20% (1 muestra) localizado en la zona media con COT excelente (>4%) (Figura 36). Generalizando para este pozo encontramos valores predominantes de COT muy bueno.
- ? El Tmax para este pozo muestra un 100% (3 muestras) en el rango de inmadurez (<430C°).
- ? El histograma muestra kerógeno de Tipo III y II, distribuido con el 33% (1 muestra), en la sección media, Kerógeno de tipo III y 67% (2 muestras),

localizadas hacia la parte superior, Kerógeno de tipo II (Figura 37). En general, y de acuerdo al histograma de distribución predominan Kerógeno de tipo II. Teniendo en cuenta el diagrama de Van Krevelen los valores graficados muestran una gran dispersión sin mostrar alguna tendencia que permita inferir el tipo de Kerógeno (Figura 44).

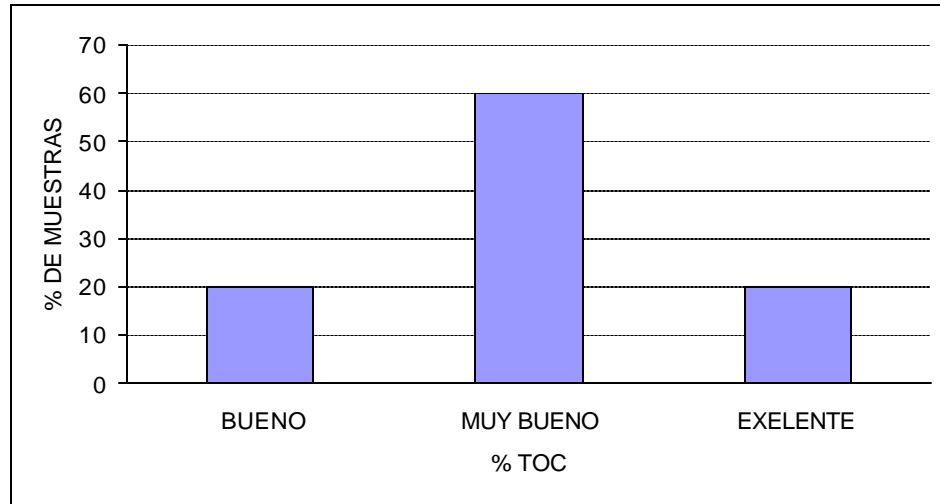


Figura 36. Histograma de la distribución de Carbono Organico Total en muestras del intervalo Paleoceno Superior, Pozo Arauca - 2.

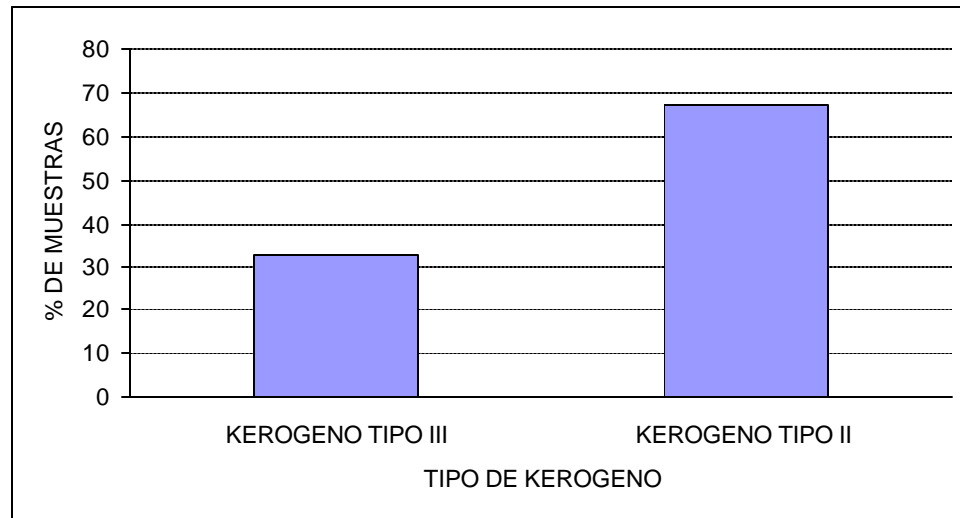


Figura 37. Histograma de la distribución de kerógeno en muestras del intervalo Paleoceno Superior, Pozo Arauca - 2.

### Pozo Arauca – 3

? El COT para este pozo varía de pobre a bueno, con COT pobre (0,0-0,5%) para el 33% (6 muestras) localizadas en la parte media del intervalo, COT regular (0,5-1,0%) para el 50% (9 muestras) ubicadas en el total de la sección y COT bueno (1,0-2,0%) para el 17% (3 muestras) en la parte inferior y superior del intervalo (Figura 38). En general se encuentra en mayor proporción COT regular.

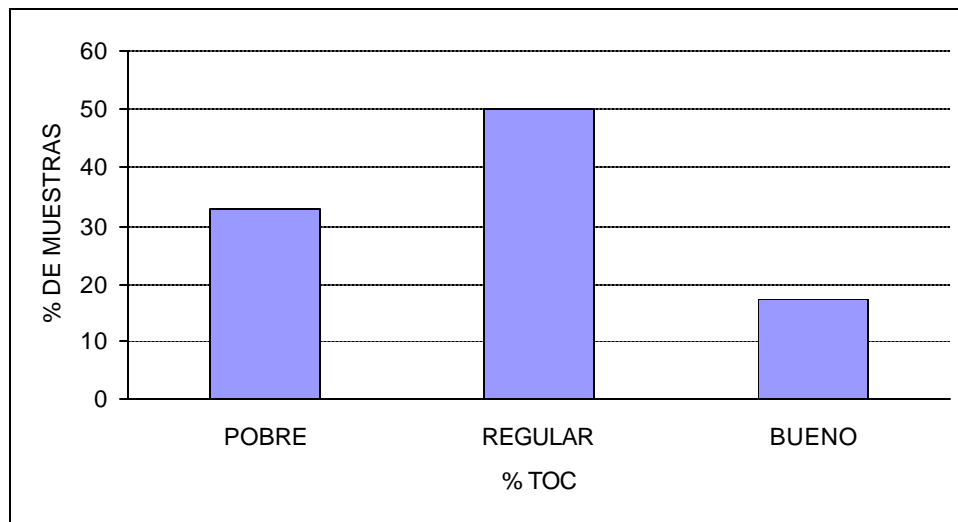


Figura 38. Histograma de la distribución de Carbono Orgánico Total en muestras del intervalo Paleoceno Superior, Pozo Arauca - 3.

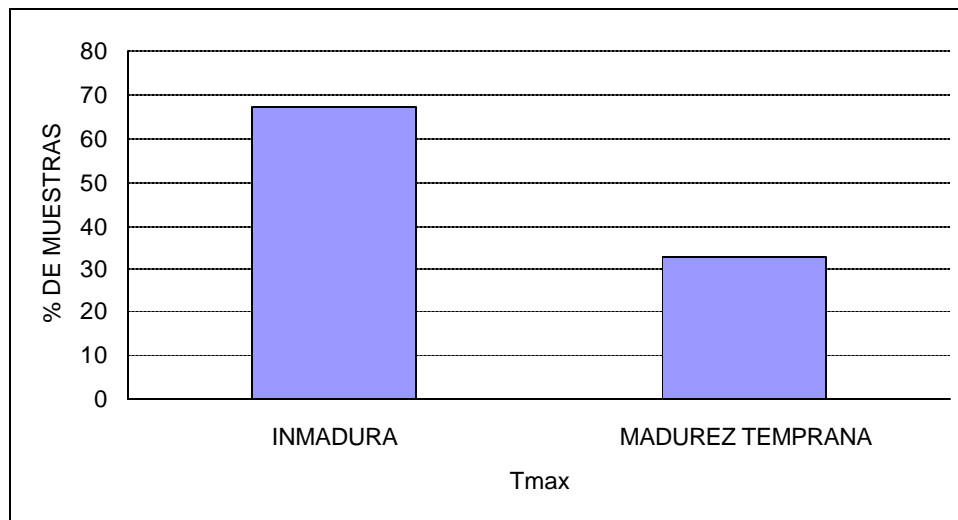


Figura 39. Histograma de la distribución de Tmax en muestras del intervalo Paleoceno Superior, Pozo Arauca - 3.

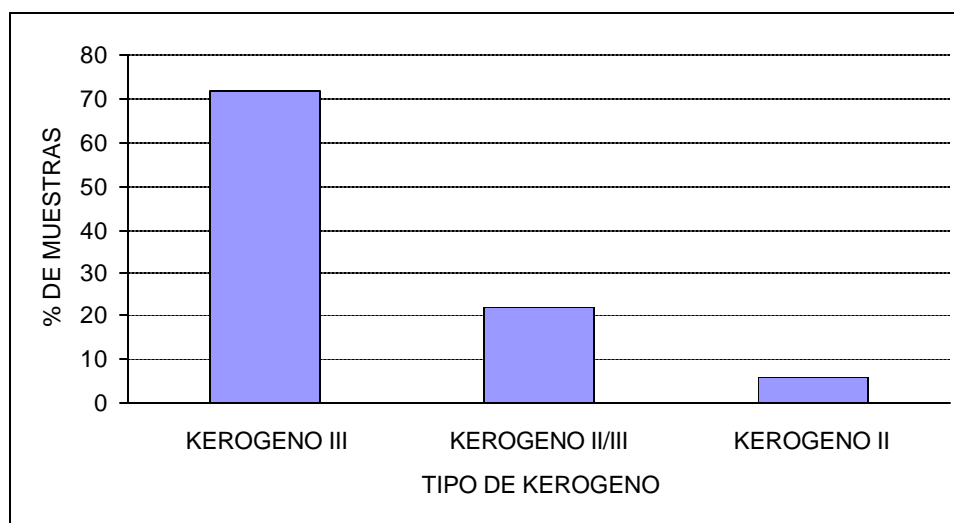


Figura 40. Histograma de la distribución de kerógeno en muestras del intervalo Paleoceno Superior, Pozo Arauca - 3.

- ? El Tmax para este pozo indica un 67% (12 muestras), localizadas en todo el intervalo, dentro del rango de inmadurez (<435C<sup>0</sup>) y el 33% (6 muestras), ubicadas hacia la base, en el rango de madurez temprana (435-445C<sup>0</sup>) (Figura 39). El análisis de la grafica indica que los valores mas representativos para este pozo son aquellos encontrados en estado de inmadurez.
  
- ? El histograma de distribución identifica Kerógeno de tipo III. II/III y II, con porcentajes de 72% (13 muestras), localizadas en toda la sección, para kerógeno tipo III, 22% (4 muestras), dispersas en el total del intervalo, para kerógeno II/III y 6% (1 muestra), ubicada hacia el tope, para kerógeno de tipo II (Figura 40). El tipo de materia orgánica predominante obedece a Kerógeno de tipo III.

#### Pozo Arauca – 4

- ? El COT varia de regular a excelente, el 75% (9 muestras), localizadas en toda la sección, corresponden a COT regular (0,5-1,0%), el 8% (1 muestra), ubicada en

la zona media, a COT bueno (1,0-2,0%), el 8% (1 muestra), a COT muy bueno (2,0-4,0%) y el 8%, situada en la base, a COT excelente (>4,0%) (Figura 41). En general, la cantidad de materia orgánica corresponden a COT regular.

- ? El Tmax oscila entre rangos inmaduros a madurez temprana, el 57% (4 muestras), localizado en la parte media y base de la sección, corresponde a Tmax inmaduro (<435C°) y el 43% (3 muestras), ubicado en zona media, a madurez temprana (435-445C°) (Figura 42). La distribución en general determina rocas predominantemente inmaduras.

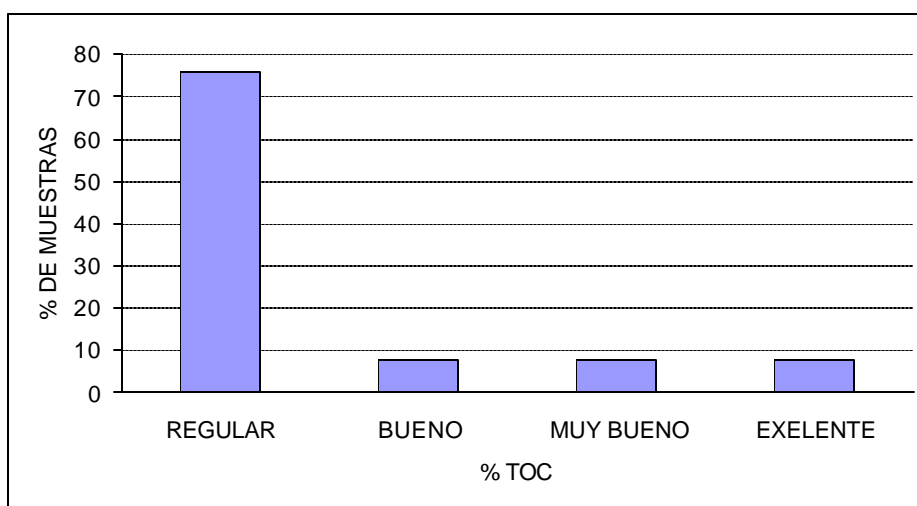


Figura 41. Histograma de la distribución de Carbono Organico Total en muestras del intervalo Paleoceno Superior, Pozo Arauca - 4.

- ? El tipo de materia identificada en al distribución permite definir Kerógeno de tipo III y mezclas (kerógeno II/III), con porcentajes del 86% (6 muestras), localizado en la zona media para kerógeno tipo III y 14% (1 muestra), ubicado en la base, para kerógeno tipo II/III (Figura 43). En general, predomina el Kerógeno de tipo III. Utilizando el método de diagrama de Van Krevelen se identificó el mismo tipo de materia orgánica predominante (Figura 44).

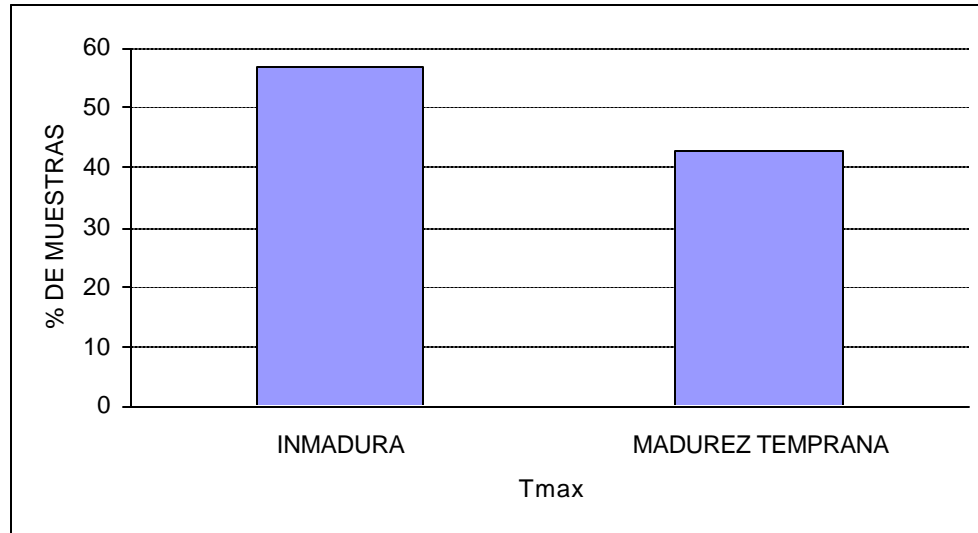


Figura 42. Histograma de la distribución de Tmax en muestras del intervalo Paleoceno Superior, Pozo Arauca - 4.

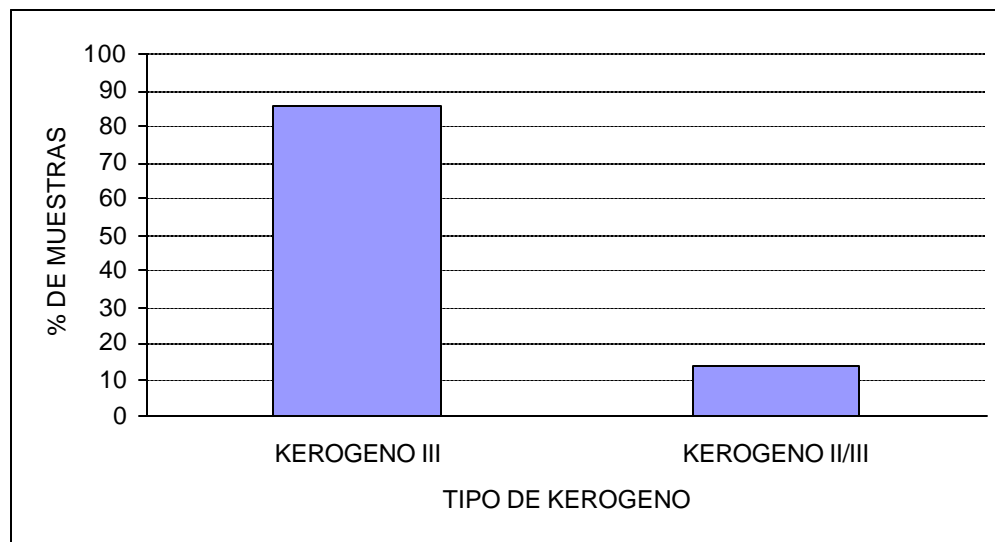


Figura 43. Histograma de la distribución de kerógeno en muestras del intervalo Paleoceno Superior, Pozo Arauca - 4.

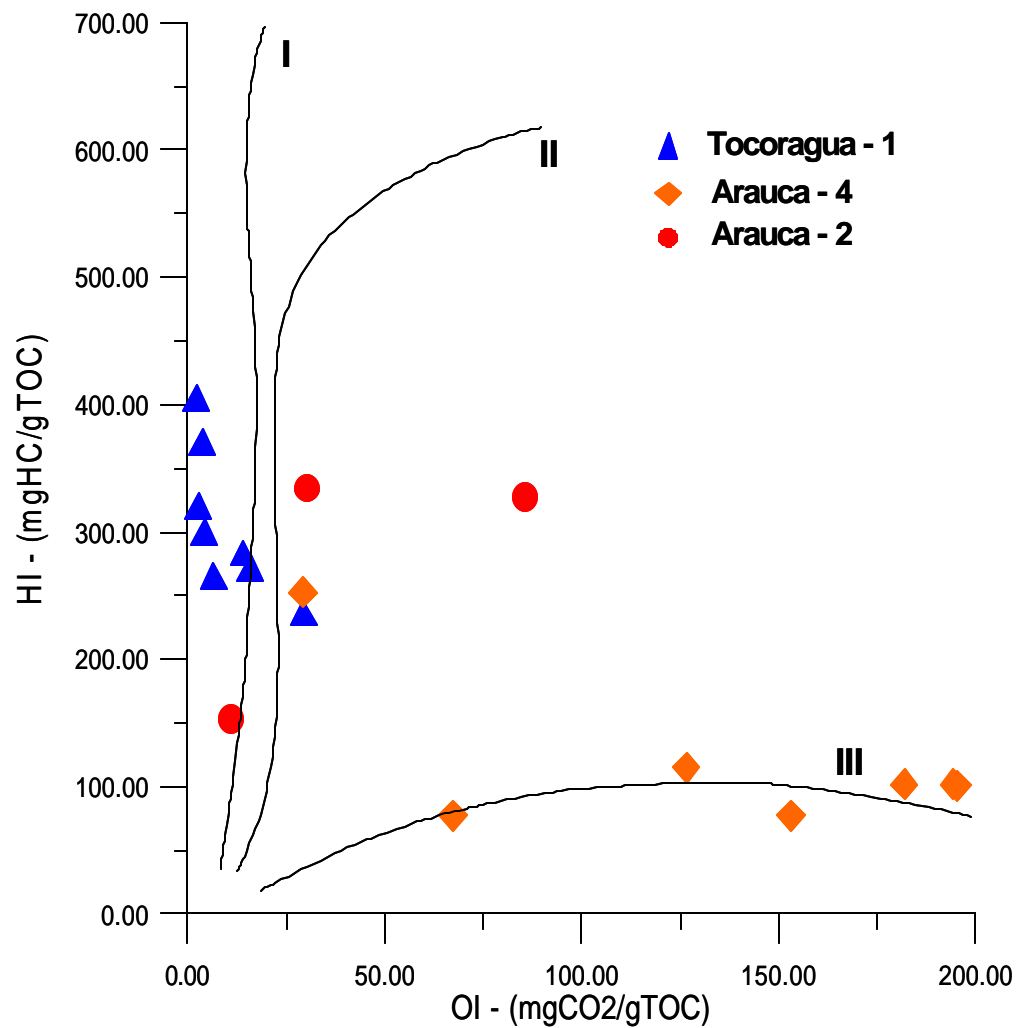


Figura 44. Diagrama modificado de Van Krevelen que muestra el Tipo de Kerógeno predominante, para los pozos Tocaragua - 1, Arauca - 2 y Arauca - 4.

### Pozo Gibraltar - 1

- ? El COT varía de pobre a regular, el 79% (23 muestras) corresponde a COT pobre (0,0-0,5%) y el 21% (6 muestras) a COT regular (0,5-1,0%). En general se identifica un porcentaje con contenido de materia orgánica pobre (Figura 45).
- ? La madurez termal mostrada por el 100% (3 muestras), localizadas en la parte superior del intervalo, determina que este pozo se encuentra en el rango de inmadurez (<435C°).

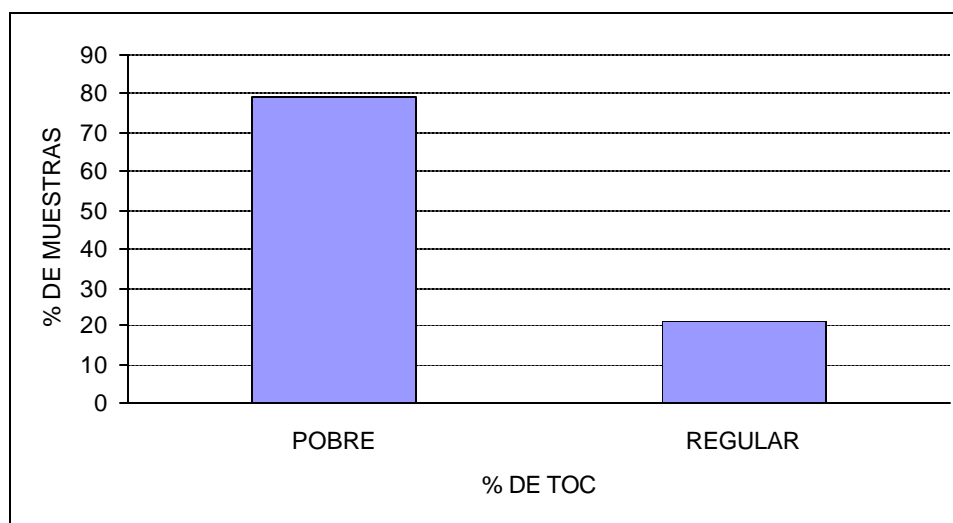


Figura 45. Histograma de la distribución de Carbono Organico Total en muestras del intervalo Paleoceno Superior, Pozo Gibraltar - 1.

- ? Los valores de IH localizados en la parte superior del intervalo, indican kerógeno de tipo IV, con un porcentaje del 100% (3 muestras). En general predomina kerógeno de tipo IV.

### 3.2.5 Síntesis Geoquímica

Para esta parte se utilizaron los histogramas de distribución de propiedades geoquímicas realizados para cada pozo, tomándose un valor único de COT, Tipo de Kerógeno y Tmax, definido por los rangos con mayor porcentaje de muestras, con el fin de determinar el comportamiento geoquímico a lo largo de la transecta.

El comportamiento de COT a lo largo de la transecta muestra tendencia de disminución hacia la región Sur (Coporo – 1), con contenidos de materia orgánica pobre (0,0-0,5%), aumentando paulatinamente en la dirección Norte, con COT para la región Central (Buenos Aires – 3, Cusiana – 5 y la Cabaña – 1) entre pobre (0,0-0,5%) a regular (0,5-1,0%), hasta valores de COT (>4%) en el Norte, correspondientes a los pozos Tocaragua – 1 y Arauca – 1 (Figura – 46). Casos especiales se suceden cerca al pozo Gibraltar – 1, en donde este mismo pozo y los pozos Arauca 4 y Arauca – 3 presentan valores de COT entre pobre (0,0-0,5%)

y regular (0,5-1,0%), que podría estar asociado a la mayor cercanía de estos pozos con zonas de emersión para esta época, como son el levantamiento del Macizo de Santander y el desarrollo del alto de Arauca, aumentado la proporción de sedimentos de origen lítico con respecto a los sedimentos de materia orgánica.

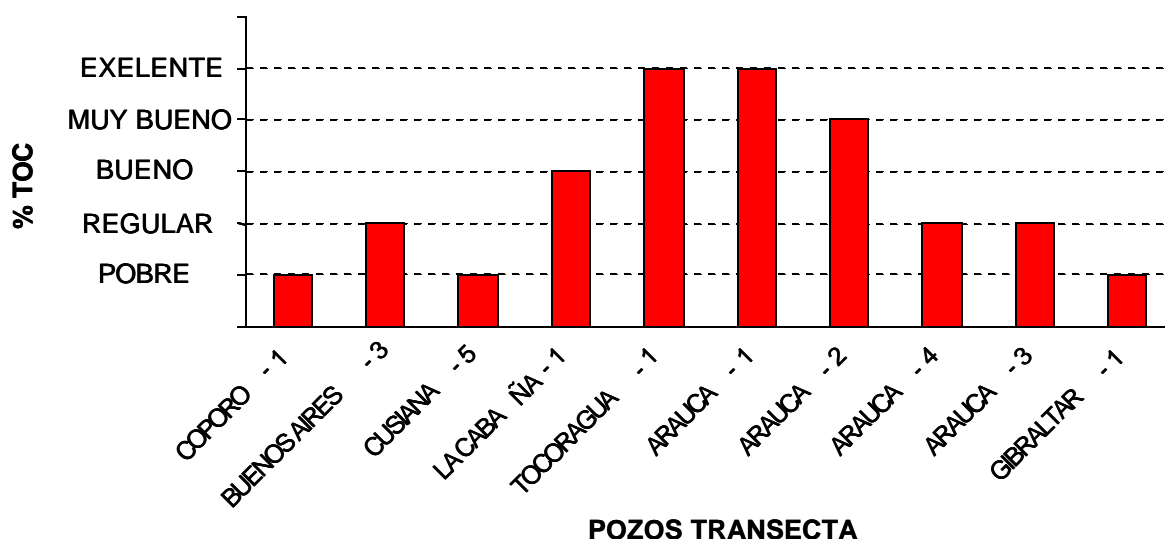


Figura 46. Comportamiento de %COT a lo largo de la transecta de estudio.

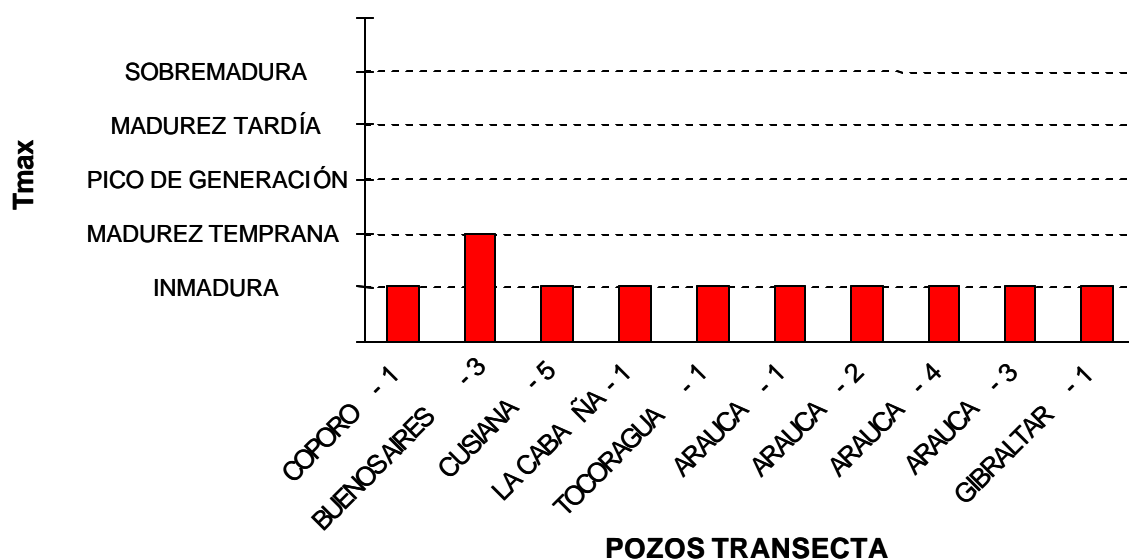


Figura 47. Comportamiento de Tmax a lo largo de la transecta de estudio.

El Tmax definido de acuerdo a los histogramas, bajo los parámetros de interpretación de Peter y Cassa (1994), muestra la mayoría de los pozos en estado inmaduro, solamente en el pozo Buenos Aires – 3 se sitúa en el intervalo de madurez temprana (Figura 47). Datos de petrografía orgánica obtenidos por recopilación bibliográfica para los pozos la Cabaña – 1, Tocoragua – 1 y Arauca – 1 (Anexo C) reporta interpretaciones similares a las realizadas utilizando los histogramas. Sin embargo, valores de reflectancia a la vitrinita ( $R_o$ : 0,72%) para el Pozo Buenos Aires – 3 sugiere una etapa mas avanzada en la maduración del Kerógeno (pico de generación).

En cuanto al tipo de kerógeno los histogramas de distribución muestran de manera general kerógeno de tipo III, con ligeras alteraciones; el pozo Tocoragua – 1 y Arauca – 2, con contenido de materia orgánica mixta (Kerógeno II/III) y kerógeno de tipo II, respectivamente (Figura 48). Interpretaciones realizadas utilizando el diagrama modificado de Van Krevelen (Figura 44) para el pozo Tocoragua – 1, sugiere la ocurrencia de materia orgánica de tipo III con alto contenido de hidrogeno (Figura 48). En conclusión, la no presencia de facies de ambientes con influencia marina para el caso de Arauca – 2 y el no necesario aumento de la calidad del kerógeno en pozos con facies trancisionales como Coporo – 1, Buenos Aires – 3, Cusiana – 5 y la Cabaña – 1, nos permitiría pensar que para estos pozos con ligeras alteraciones, la depositación de matera orgánica se realizó en cuerpos de agua continentales mas duraderos, tipo lago, que permitió condiciones de anoxia importantes y la conservación del kerógeno tipo III con esta características (alto IH).

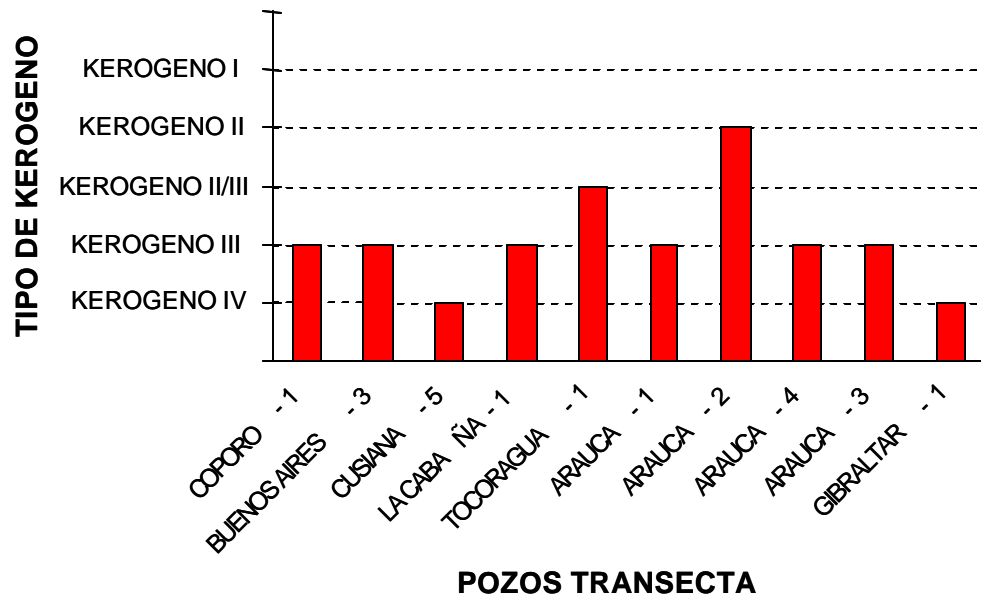


Figura 48. Comportamiento del tipo de Kerogeno a lo largo de la transecta de estudio.

### 3.2.6 Correlación Entre Parámetros Estratigráficos y Geoquímicos

Con el objetivo de determinar el comportamiento geoquímico frente a los ciclos de depositación se hace una comparación entre los parámetros geoquímicos (COT e IH) y los ciclos estratigráficos que se identificaron en las secciones estudiadas.

Para este análisis se realizaron una serie de figuras que ilustran la correspondencia entre las facies litológicas interpretadas a partir de registros, los ciclos Sedimentológicos y los principales parámetros geoquímicos.

**Pozo Coporo – 1:** Para esta sección es muy difícil identificar tendencias claras (marcadas con líneas azules) de aumento y de disminución de variables geoquímicas y su respectiva relación con los ciclos. Sin embargo se aprecia un punto de simetría que corresponde a la máxima inundación y en donde a partir de este se observa un aumento tanto de COT como de IH (Figura 49). Una posible respuesta a este comportamiento es la naturaleza misma de la sedimentación de estas facies, caracterizadas por la repentina depositación de partículas que son transportadas por el flujo fluvial. De esta manera a medida que A/S disminuye, el

flujo de sedimento se incrementa y más sedimento es transportado, y por ende mayor cantidad de materia orgánica es acarreada, permitiendo el aumento de COT de las facies depositadas. En cuanto al IH este comportamiento puede estar relacionado a la gran cantidad de materia orgánica (MO) depositada; al haber mayores cantidades de MO, hay mayores posibilidades de que esta sea potencial de hidrocarburos.

### Coporo - 1

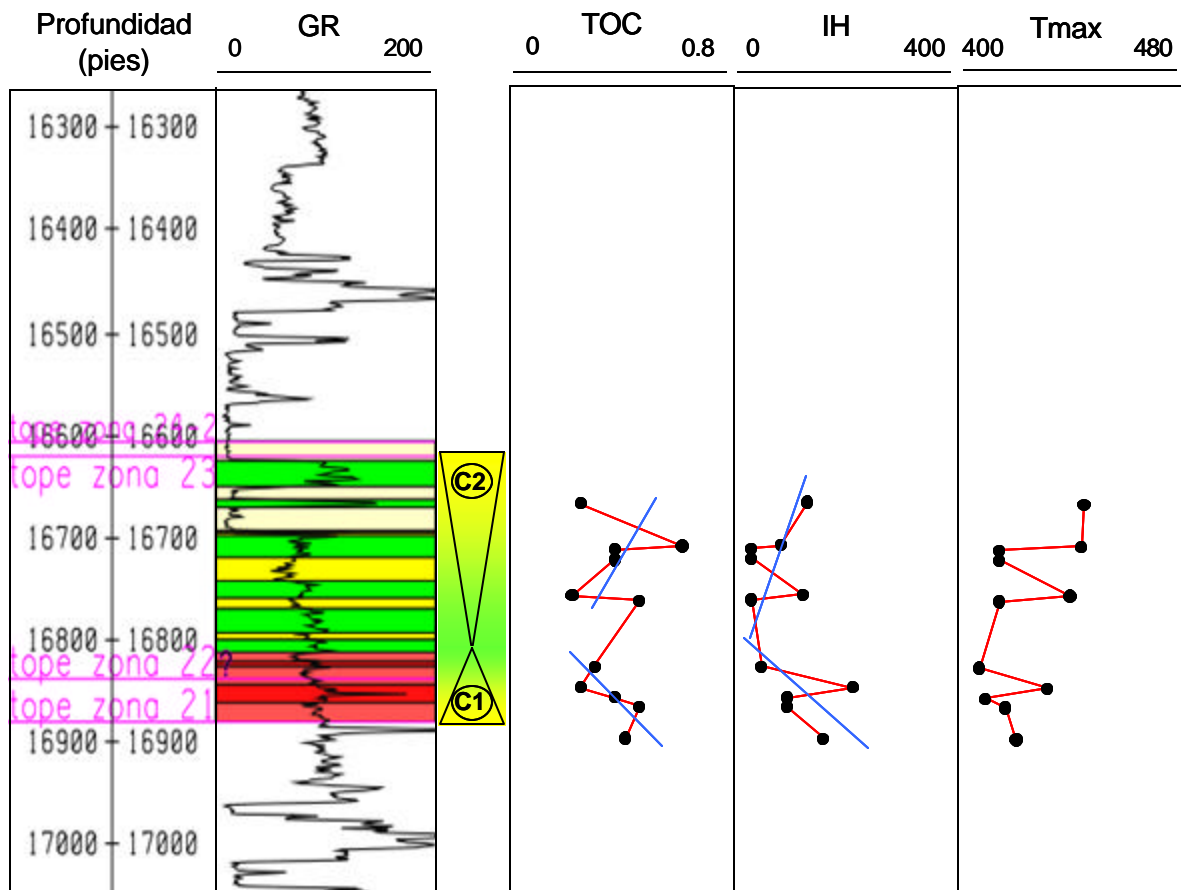


Figura 49. Principales parámetros estratigráficos y geoquímicos para el intervalo Paleoceno Tardío, pozo Coporo - 1.

En este caso el IH, aunque es un parámetro de calidad, permite ver la variación de la cantidad de la materia orgánica que llega a la zona de depositación durante un evento de somerización. Para el ciclo uno (1) con influencia marina, se observa la

misma relación estratigráfica y geoquímica con respecto al ciclo dos (2) de origen netamente continental, sugiriéndonos un ambiente de estuario determinado en mayor medida por la acción fluvial que mareal (Figura 49).

**Pozo Buenos Aires - 3:** En general se observa una tendencia de aumento de las cualidades geoquímicas tanto de COT, como de IH, a medida que ocurre el evento progradante o la disminución en la relación A/S, similar a lo descrito en el pozo Coporo – 1 (Figura 50).

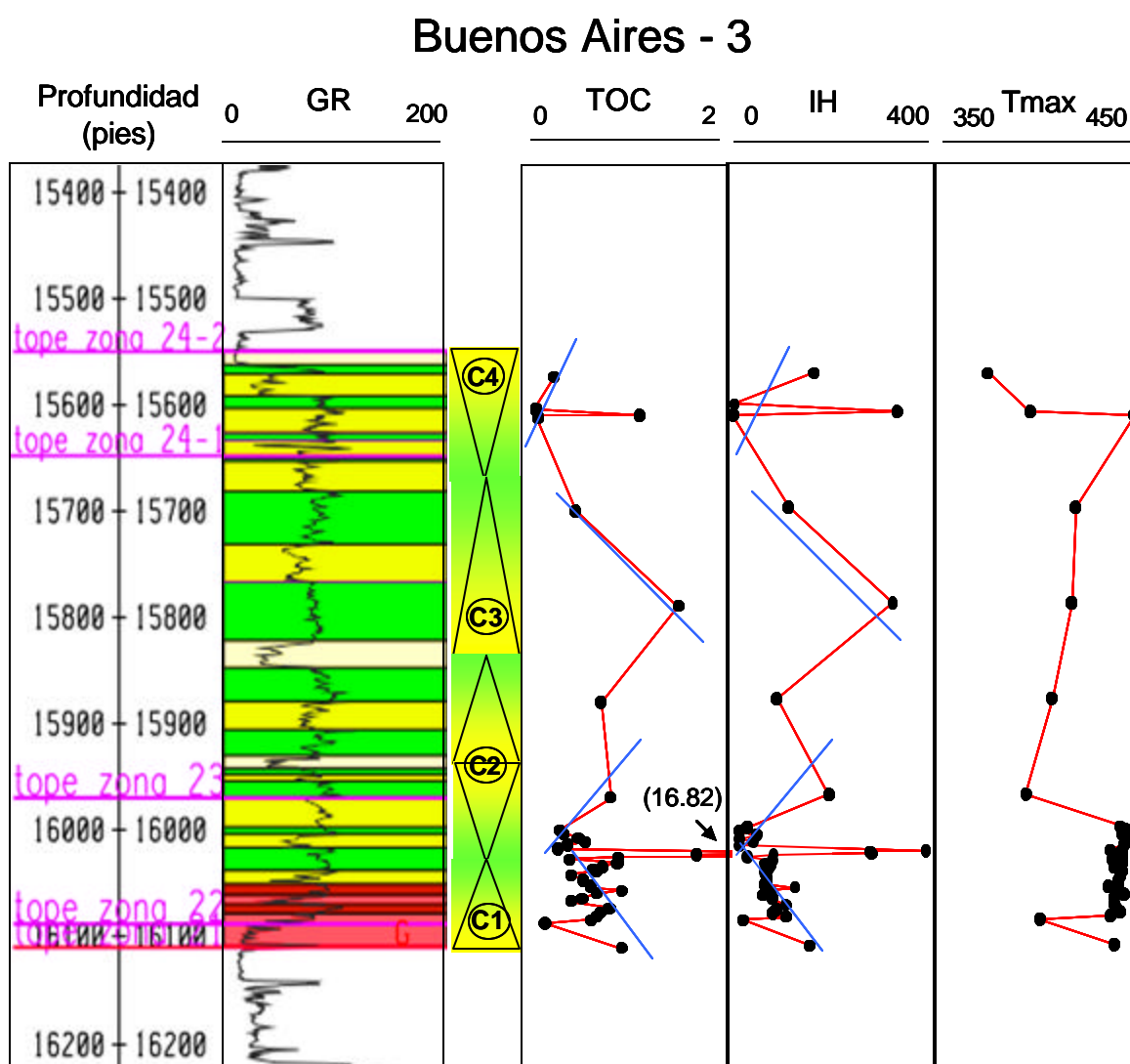


Figura 50. Principales parámetros estratigráficos y geoquímicos para el intervalo Paleoceno Tardío, pozo Buenos Aires – 3.

**Cusiana – 5:** La falta de datos no permite encontrar tendencias ni relaciones claras de las variables geoquímicas con los ciclos sedimentológicos. Sin embargo hacia el tope de la sección se observa un aumento en COT e IH, coincidente con un ciclo de somerización (Figura 51).

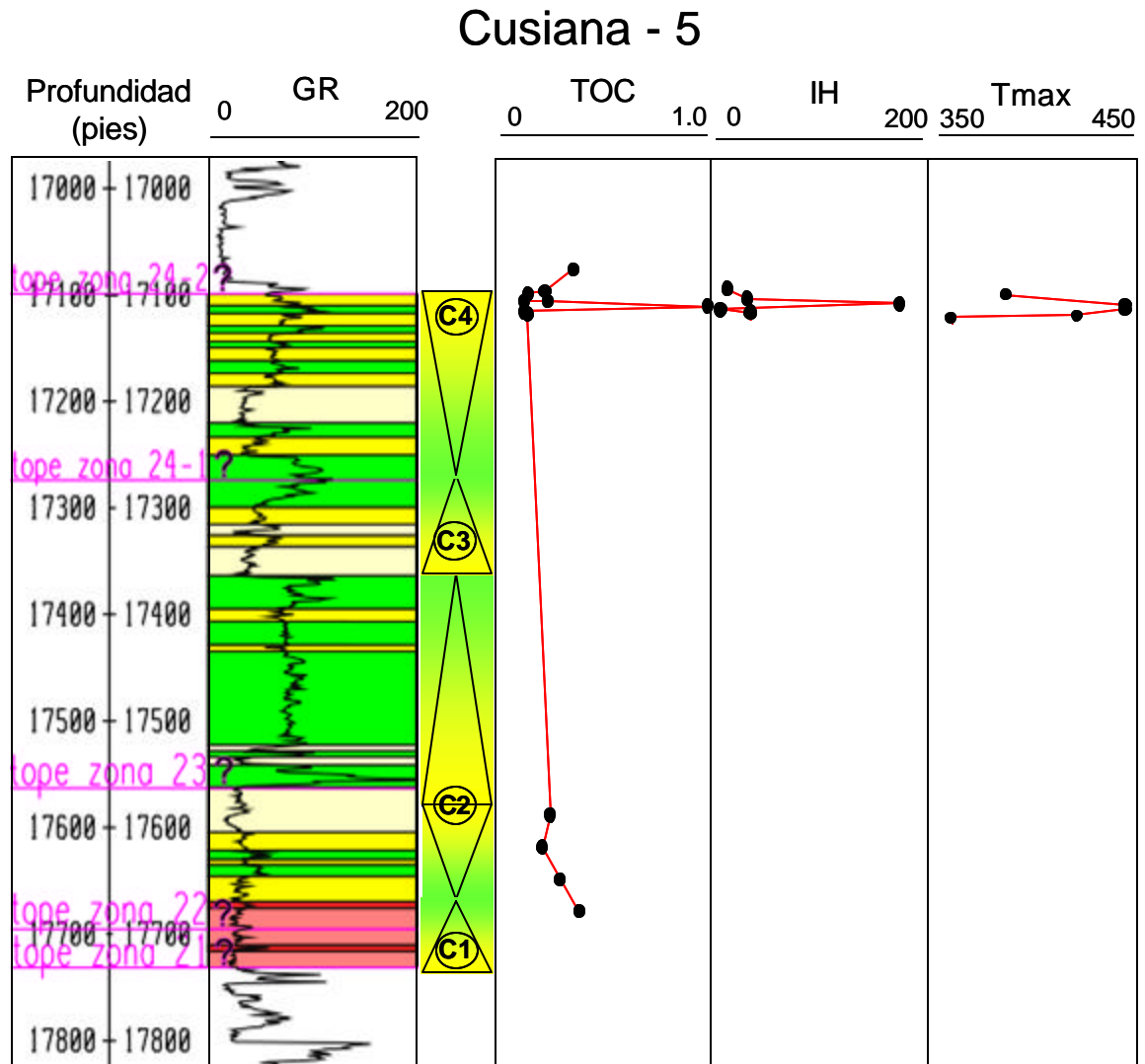


Figura 51. Principales parámetros estratigráficos y geoquímicos para el intervalo Paleoceno Tardío, pozo Cusiana – 5.

**La Cabaña – 1:** La poca densidad de datos geoquímicos no permite encontrar una tendencia lo suficientemente clara que permitan determinar el comportamiento de la variables geoquímica con respecto a los ciclos (Figura 52).

## La Cabaña - 1

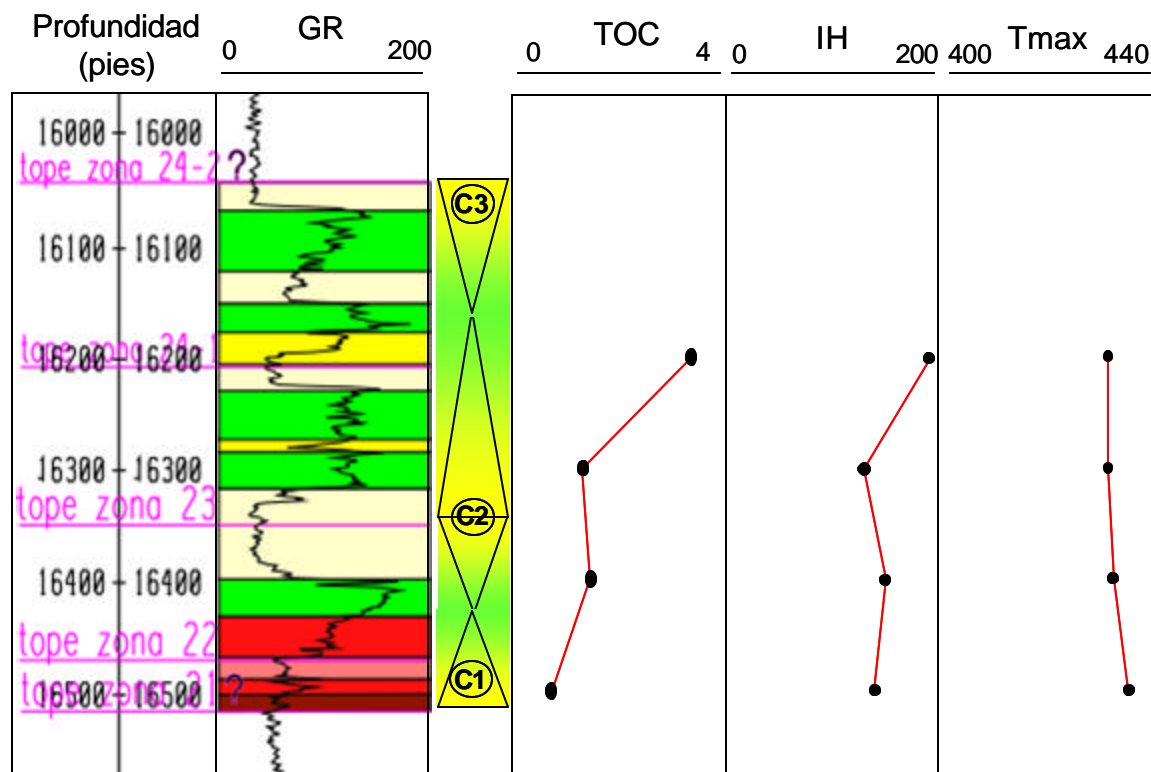


Figura 52. Principales parámetros estratigráficos y geoquímicos para el intervalo Paleoceno Tardío, pozo La Cabaña - 1.

**Tocoragua – 1:** Las tendencias de parámetros geoquímicos en relación con los ciclos de profundización muestran una disminución tanto de COT como IH. Igual comportamiento es observado a lo largo de los pozos descritos anteriormente (Figura 53).

**Tame – 2:** Para este pozo no se pudo hacer los análisis respectivos, requeridos para la caracterización geoquímica y su correspondiente correlación estratigráfica, por ausencia de ripios y núcleos en litoteca.

**Arauca – 1:** Para este pozo se obtuvieron solamente análisis geoquímicos de la parte superior, de la sección, mostrando una tendencia de aumento tanto de COT

como IH para el ciclo superior de disminución de la relación A/S (Figura 54).

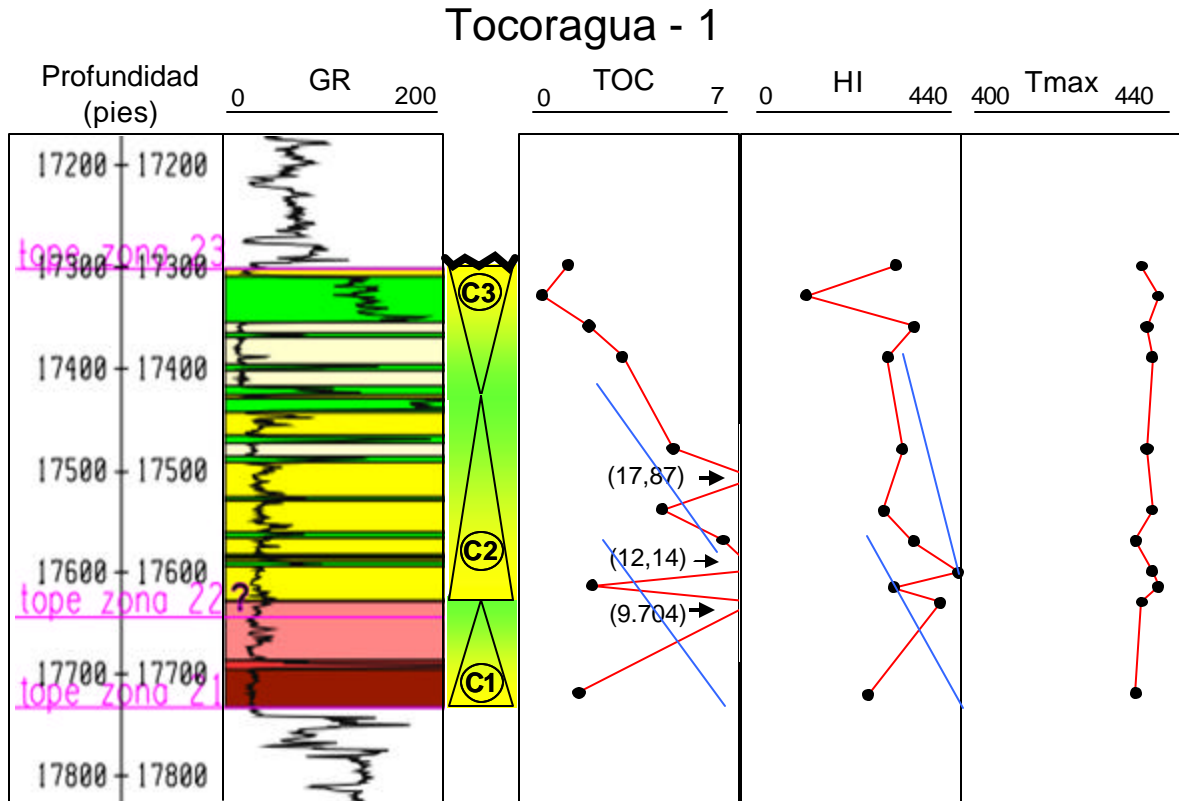


Figura 53. Principales parámetros estratigráficos y geoquímicos para el intervalo Paleoceno Tardío, pozo Tocoragua - 1.

**Arauca - 2:** La tendencia de COT muestra una disminución para aproximadamente un ciclo de profundización de la Cuenca, mostrando el mismo comportamiento a los pozos anteriormente descritos. Para este mismo ciclo el índice de hidrogeno tiende a aumentar, contrario a lo que sucede con el COT, lo que sugeriría un mejoramiento en la calidad de la materia orgánica (Figura 54). Una posible explicación podría estar relacionada con la permanencia de los cuerpos de agua que dan lugar a estos depósitos. Estos ambientes con características más lagunares, durante un aumento en el espacio de acomodación, permiten la conservación de la materia orgánica (alto IH) por efecto del ambiente reductor en el fondo del lecho, asociado al incremento en la

profundidad y a la disminución de la tasa de recarga por acción del afluyente que alimenta al cuerpo de agua.

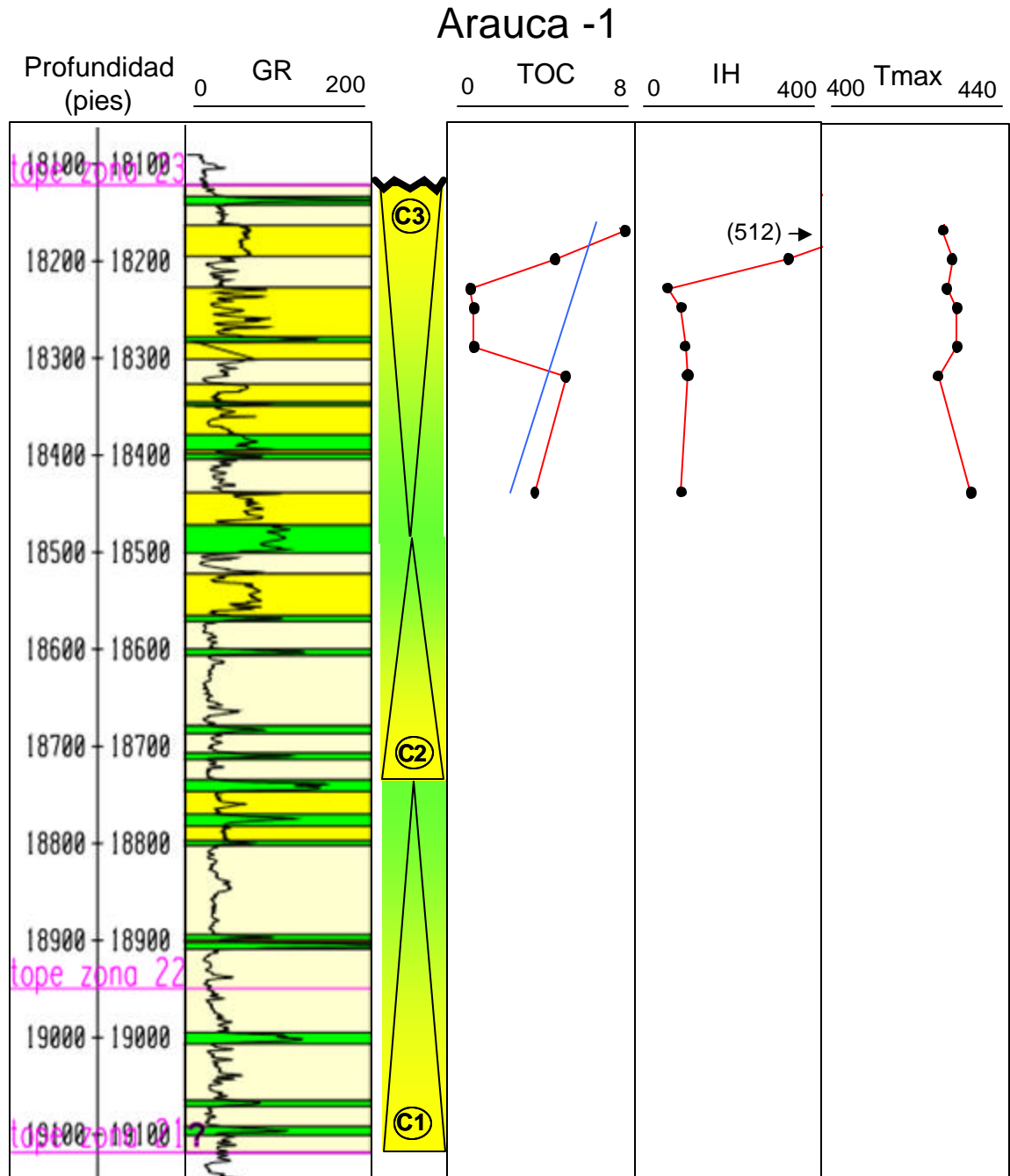


Figura 54. Principales parámetros estratigráficos y geoquímicos para el intervalo Paleoceno Tardío, pozo Arauca - 1.

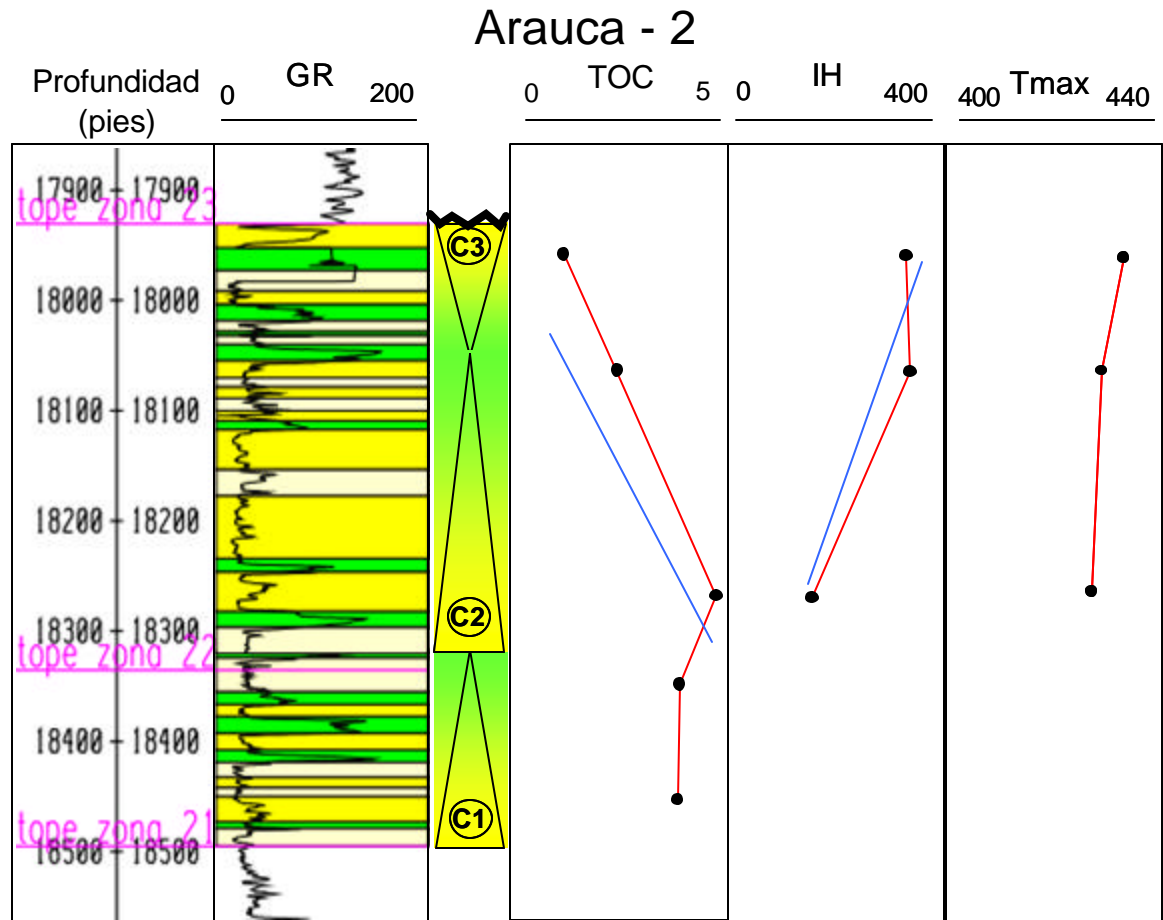


Figura 55. Principales parámetros estratigráficos y geoquímicos para el intervalo Paleoceno Tardío, pozo Arauca - 2.

**Arauca – 3:** Para esta sección se observa una tendencia de disminución de COT asociada a dos ciclos de aumento de espacio de acomodación, el IH se comporta de manera contraria (tendencia de aumento) que podría suponer Ambientes con características más lagunares hacia el punto de profundización. Comportamiento similar es observado en Arauca– 2 (Figura 56).

## Arauca - 4

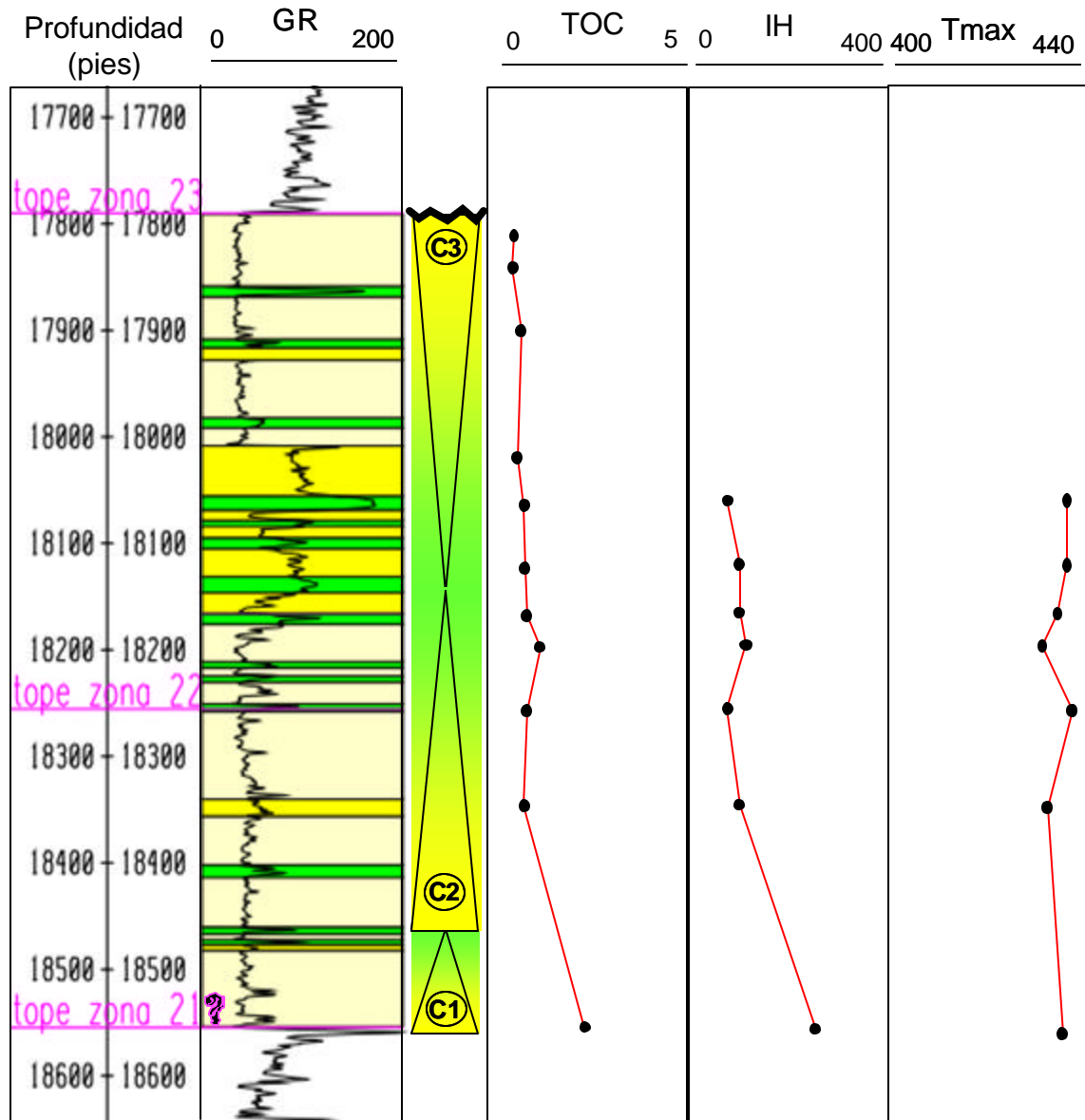


Figura 56. Principales parámetros estratigráficos y geoquímicos para el intervalo Paleoceno Tardío, pozo Arauca - 4.

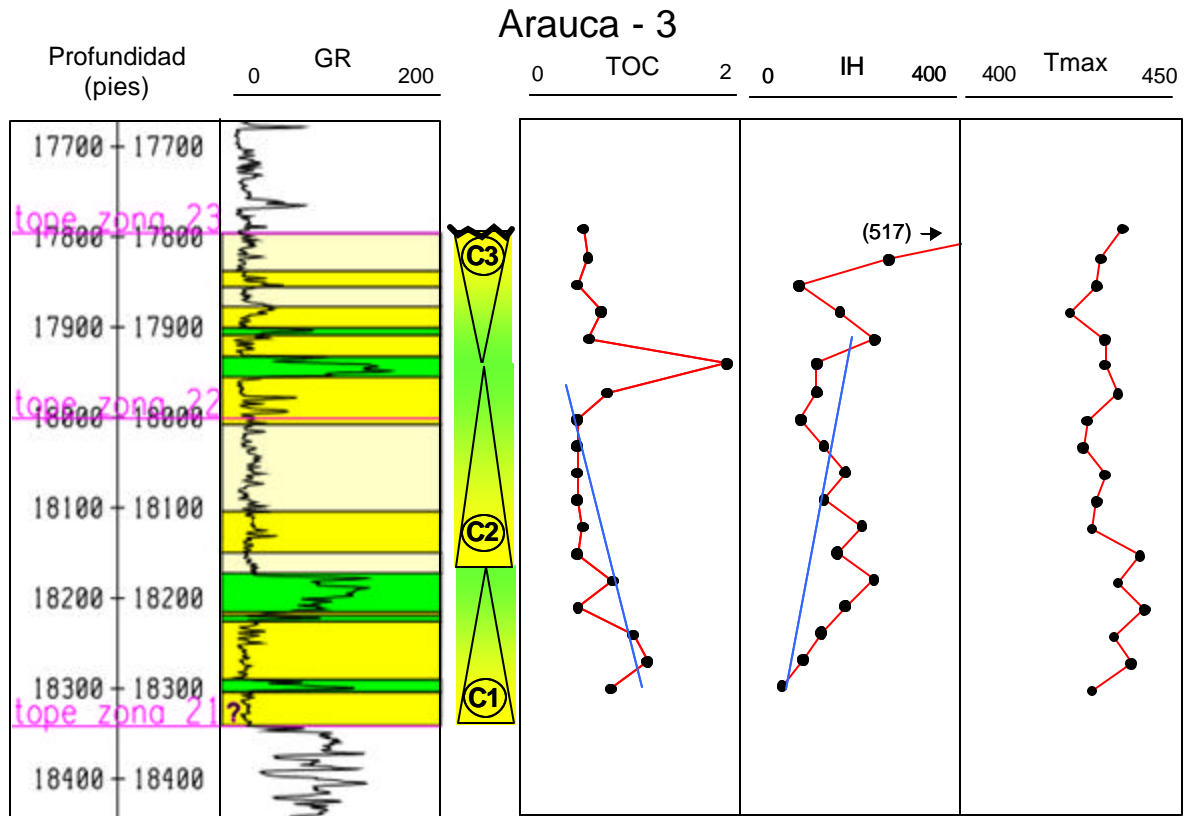


Figura 57. Principales parámetros estratigráficos y geoquímicos para el intervalo Paleoceno Tardío, pozo Arauca - 3.

**Arauca – 4:** En esta sección no se observa ningún tipo de tendencia asociada con los ciclos estratigráficos. Manteniéndose tanto los datos de COT como de IH sin ninguna alteración y con valores relativamente constantes (Figura 56).

**Gibraltar – 1:** se identifican tendencias tanto de aumento como de disminución de los valores de COT, correspondiéndose con ciclos de elevación y disminución del nivel base respectivamente (Figura 58).

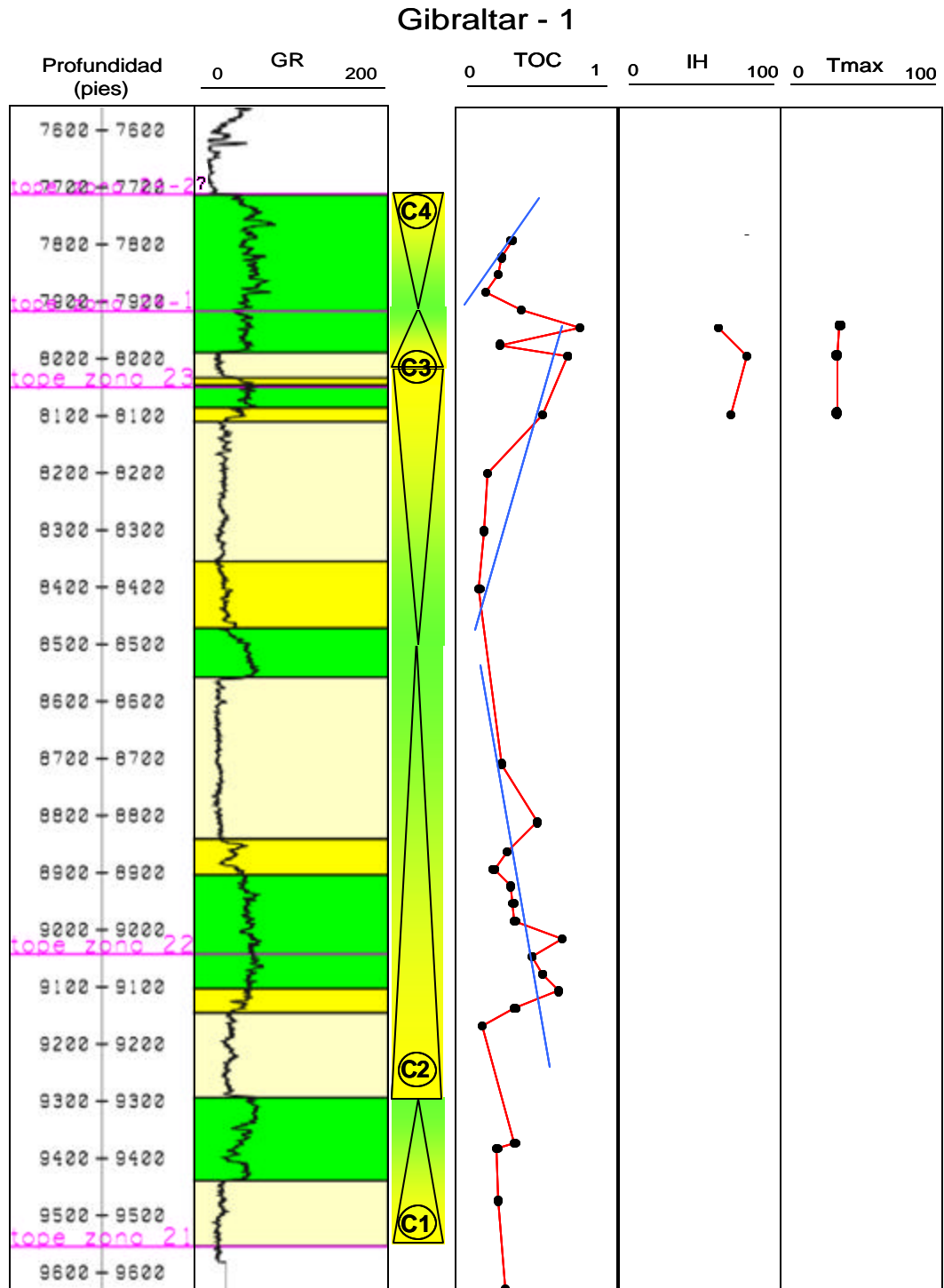


Figura 58. Principales parámetros estratigráficos y geoquímicos para el intervalo Paleoceno Tardío, Pozo Gibraltar - 1.

---

## 4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

---

El tipo de kerógeno predominante para el intervalo de tiempo Paleoceno Tardío, corresponde a materia orgánica de tipo III, con ligeras diferencias a lo largo de la transecta, asociada principalmente a la mejor preservación de la materia orgánica (alto IH), y a kerógeno de tipo IV, determinado por el retrabajamiento u oxidación de la MO (bajo IH).

La madurez termal del Kerógeno a lo largo de la transecta se muestra en estados generalizados de inmadurez, con tendencia de aumento hacia la región central del área de estudio con rangos que van desde la madurez temprana (435-445C°) hasta el pico de generación (445-450C°).

El contenido de materia orgánica a lo largo de la transecta muestra un COT que varía de pobre (0,0-0,5%) a excelente (>4%), encontrándose los mejores valores hacia la región Norte de La Cuenca de los Llanos.

Las mejores propiedades geoquímicas de las rocas se encuentran hacia el Norte de La Cuenca, con espesores de litofacies lodosas promedio de 100 pies, contrario a lo que sucede en la región Central en donde la calidad de los parámetros geoquímicos disminuye, pero corresponden a espesores promedio mucho mayores (250 pies).

Las unidades depositadas durante este intervalo de tiempo (Paleoceno Superior), son la totalidad de la Formación Los Cuervos, iniciando sobre la parte superior de la biozona 23 y terminado al tope de la biozona 24 – 2, y la sección superior de la Formación Barco, correspondiente a la zona 22 y parte inferior de la biozona 23.

La Formación Los Cuervos a lo largo de la transecta, está constituida por lodolitas con delgadas intercalaciones arenosas de origen continental, registrándose hacia el Norte de la transecta, un incremento considerable de la proporción de arenas.

Las areniscas de las Formación Barco para el tiempo Paleoceno Superior, conforman intervalos de areniscas de buena continuidad lateral. Esencialmente depositado en ambientes transicionales en la zona Central y Sur, y de tipo continental hacia la zona Norte

El estudio del intervalo Paleoceno Superior documenta un incremento hacia el Norte del intervalo de tiempo de no registro (erosión o no depósito), desaparición de las biozona 24-1 y 24-2.

Se identificaron tres zonas con diferentes condiciones de preservación del registro litológico para el Paleoceno Superior, evidenciado por la disparidad de espesores a lo largo de la transecta. La zona central (Buenos Aires – 3, La Cabaña – 1 y Cusiana – 5) con los mayores espesores y en disminución hacia la región Sur y Norte de la transecta. Los espesores anómalos para el campo Arauca y Gibraltar – 1, podría ser consecuencia del desarrollo del alto estructural de Arauca en el Paleoceno y el levantamiento del Macizo de Santander a comienzos del Paleógeno, respectivamente, el cual creó mayor espacio de acomodación y mayor material para depositar.

Durante un hemicycle de caída del nivel base el COT aumenta y la calidad del kerógeno disminuye.

Los ciclos depositacionales presentes en la transecta guardan una importante relación con la posición de las zonas palinológicas, lo que permitió que para casos donde no estuviera definida la profundidad para una determinada zona palinológica los ciclos permitieron predecir la profundidad de estas zonas, como es

el caso de la totalidad de las biozonas del pozo Cusiana – 5 y algunas biozonas en los pozos Coporo – 1, La Cabaña – 1, Tocoragua – 1, Arauca – 1, Arauca – 3 y Arauca – 4.

Con el fin de complementar el comportamiento geoquímico del intervalo Paleoceno Superior para el Piedemonte y Cuenca Llanos se sugiere la realización de tres transectas en la zona Sur, Central y Norte de la línea de correlación, en dirección Este-Oeste.

Debido a que no se encontraron cantidades suficientes de datos de petrografía orgánica que permitieran comparar estos datos con valores de Tmax, se sugiere realizar un muestreo sistemático para cada uno de los pozos, para determinar confiablemente la evolución termal de la materia orgánica a lo largo de la transecta.

En la zona Central, donde se identificó una roca madre potencial efectiva se sugiere, la realización de estudios que permitan determinar el impacto o contribución de esta roca madre en los sistemas petrolíferos de la región.

---

## 5 BIBLIOGRAFIA

---

ACOSTA, J., (2003): Structural Interpretation and Source Rock Maturation Modeling along two Distinct Transects in the Upper/Middle Magdalena Basin, Colombia., VIII Simposio Bolivariano de Exploración en las Cuencas Subandinas, Cartagena de Indias, 1-15 p.

ARIANA LTDA., (1996): Geología de Superficie en los Bloques Piedemonte y Piedemonte Occidental. Informe Final para BP Exploration Company (Colombia) Ltda.

ARIANA LTDA., (1999): Evaluación Piedemonte Llanero. Informe Final para ECOPETROL.

ARIANA LTDA., (2001): Observaciones Sobre el Terciario. Informe Final para Occidental de Colombia, Inc.

BEICIP, (1995): Cuenca de los Llanos Orientales: Estudio Geológico Regional. Informe Final para ECOPETROL Santafé de Bogotá D.C.

COOPER, M., ADDISON, F., ÁLVAREZ, R., CORAL, M., GRAHAM, R., HAYWARD, A., HOWE, S., MARTINEA, J., NAAR, J., PEÑAS, R., PULHAM, A., y TABORDA, A. (1995): Basin development and tectonic history of the Llanos Basin, eastern cordillera and middle Magdalena valley, Colombia. American Association of Petroleum Geologist, vol. 79: 1421-1443.

CARO, M., GARCÍA, D., MESA, A., RUBIANO, J., (2004) Flujo Regional de Fluidos y Migración de Petróleo: Informe Final / ECOPETROL- ICP. Piedecuesta.

CORREDOR, F., (2003): Eastward Extent of the Late Eocene-Early Oligocene Onset of Deformation across the Northern Andes: Constraints from the Northern Portion of the Eastern Cordillera Fold Belt, Colombia, and Implications for Regional Oil Exploration., VIII Simposio Bolivariano de Exploración en las Cuencas Subandinas, Cartagena de Indias, 34-45 p.

CHIGNE, N., ROJAS, L., LOPEZ C., SANCHEZ, H., LOUREIRO D., URBINA C., MONROY Z., ARNSTEIN R., (1995): Evaluación Petrolera del Piedemonte Andino y Áreas Adyacentes en los Llanos Colombo – Venezolanos. Proyecto ECOPETROL - CORPOVEN. ECOPETROL. Reporte Interno.

COLLETTA, B., HEBRARD, F., LETOUZEY, J., WERNER, P., RUDKIEWICZ, J., (1990): Tectonic Style and Crustal Structure of the Eastern Cordillera (Colombia) from a Balanced Cross Section. En: J. Letouzey (Editor), Petroleum and Tectonics in Mobile Belts. Editions Technip, Paris, pp. 81-100

DENGO, C.A; and COVEY, M.C., (1993): Structure of the Eastern Cordillera of Colombia: Implications for traps and regional tectonics: American Association of Petroleum Geologists Bulletin, v. 77, pp. 1315-1337.

DUQUE, C.H., (1997): The Llanos Basin, Colombia; in search of greater stratigraphic resolution: Journal of Petroleum Geology. 20; 1, Pages 96-99.

ECOPETROL, (1993): Estudio Técnico de Comercialidad Campos Cusiana y Cupiagua, Contratos de asociación Santiago de las Atalayas y Tauramena.

ECOPETROL - GEX., (1994): Cuenca Llanos Orientales, Proyecto Nell.

ECOPETROL, (2003): Cuenca Llanos Orientales, Bloque Catleya. INFORME TECNICO ANUAL. Vicepresidencia de Exploración y Producción. / ECOPETROL. Santafé de Bogotá, D.C.

ETAYO, F., (1985): El límite Jurásico Cretácico en Colombia. En: F. Etayo-Serna and F. Laverde-Montaña (eds.), *Proyecto Cretácico, contribuciones*. Capitulo XXII, Ingeominas Publicación Geológica Especial 16, Santafé de Bogotá D.C., 4 p.

FAJARDO, A., RUBIANO, J., REYES, A., ASESOR DR. TIMOTHY CROSS; (1993): Estratigrafía de secuencias de las rocas del Cretáceo tardío al eoceno tardío en el sector central de la Cuenca de los Llanos Orientales departamento del Casanare, ECOPETROL-ICP. Informe Interno

FAJARDO, A., REYES, J., RUBIANO, J., PEREZ, H., SANDOVAL, J., SOTO, C., DÍAZ, O., HERNÁNDEZ, C., ROJAS, L., (1998): Evaluación Regional Meta, ECOPETROL. ICP. Informe Interno.

FAJARDO, A., ROJAS, L., CRISTANCHO, J., (2000): Definición del modelo estratigráfico en la cuenca de los llanos orientales Piedemonte llanero: Informe Final / ECOPETROL- ICP. Piedecuesta.

GEOESTRATOS LTDA.-DUNIA CONSULTORES, (2002): Control Geológico de Campo en el Bloque Sirirí y Áreas Aledañas. Informe Final presentado a ECOPETROL-ICP.

GÓMEZ, E., (2001): Tectonic Controls on the Late Cretaceous to Cenozoic Sedimentary Fill of the Middle Magdalena Valley Basin, Eastern Cordillera and Llanos Basin, Colombia [Dissertation thesis]: Cornell University, 619 p.

GONZALEZ. G., (1967): A Palynological Study on the Upper Los Cuervos and Mirador Formations (lower and middle Eocene); Area Tibú, Colombia. E.J.Brill, ca. 250p

GUERRERO, J. SARMIENTO, G., (1996): Estratigrafía Física, Palinología, Sedimentología y Secuencial del Cretácico Superior y Paleoceno del Piedemonte Llanero. Implicaciones en Exploración Petrolera. Geología Colombiana No. 20, Universidad Nacional, Santafé de Bogotá D.C.

HERNÁNDEZ, C., HERNÁNDEZ, R., LUNA, O., MARTÍNEZ J., CERÓN, J., ROJAS, L., (1997): Sistemas Petrolíferos de la Provincia de los Llanos Orientales. ECOPEPETROL- Santafé de Bogotá D.C. Reporte Interno.

HOSSACK, J., (1997): Prospectivity of the Piedemonte Occidental License. ECOPEPETROL Reporte Interno.

IDROBO, E., SOTO, C., SANDOVAL, J., GOMÉZ, J., POSADA, C., LINARES, R., FAJARDO, A., QUINTERO, R., OSORIO, R., MUÑOZ, J., PULIDO, O., Modelo Integrado Campo Cupiagua. Informe Final, ECOPEPETROL – ICP. Piedecuesta.

JARAMILLO, C., (1999). Middle Paleogene Palynology of Colombia, South America; Biostratigraphic, Sequence Stratigraphic, and Diversity Implications: Thesis Doctoral, University of Florida. Gainesville, FL, United States. P: 417.

JARAMILLO, C., DILCHER, D., (2000): Microfloral Diversity Patterns of the Late Paleocene-Eocene Interval in Colombia, Northern South America: *Geology*. 28; 9, P: 815-818.

JARAMILLO, C., DILCHER, D., (2001): Middle Paleogene Palynology of Central Colombia, South America; a Study of Pollen and Spores from Tropical Latitudes: *Palaeontographica. Abteilung B: Palaeophytologie*. 258; 4-6, P: 87-213.

JARAMILLO, C., (2002): Response of Tropical Vegetation to Paleogene Warming: *Paleobiology*. 28; 2, P: 222-243.

JARAMILLO, C., RUEDA, M., (2003): Palinología del Paleógeno del Norte de la Cuenca de los Llanos Orientales, Sector Niscota-Gibraltar-Caño Limón: Informe Final / ECOPETROL. ICP. Piedecuesta.

JARAMILLO, C., A., MUÑOZ, F., COGOLLO, M., Y PARRA, F., (2003): Patronamiento Bioestratigráfico e Integración Bioestratigráfica de Pozos del Piedemonte Llanero: Informe Final / ECOPETROL- ICP. Piedecuesta.

LINARES, R., (1996): Structural Styles and Kinematics of the Medina Area, Eastern Cordillera, Colombia, M.Sc. Thesis, Univ. of Colorado, 104 p.

LINARES, R., POSADA, C., VÉLEZ, M., RUEDA, E., (2003): Modelamiento Estructural en Zonas Complejas del Piedemonte Llanero. Informe Final / ECOPETROL- ICP. Piedecuesta.

MARTÍNEZ, J., (2003): Modelamiento Estructural 3D y Aplicaciones en la Exploración y Explotación de Hidrocarburos en el Cinturón de Cabalgamiento del Piedemonte Llanero, Cordillera Oriental, Colombia., En ACGGP, ed., VIII Simposio Bolivariano de Exploración en las Cuencas Subandinas.: Cartagena de Indias, p. 106-117.

MEZA, N., MUÑOZ, J., FAJARDO, A., ARISTIZABAL, J., (2002): Evaluación geológica y de yacimientos pozo Gibraltar, Bloque Sirirí: Informe Final / ECOPEOTROL- ICP. Piedecuesta.

MORA, C., GIRALDO, N., BLANCO, Y., PASSOS, S., (2001): Evaluación Geoquímica de los Pozos Floreña n2f, Floreña-3f y Golconda -1a, Piedemonte Llanero: Informe Final / ECOPEOTROL- ICP. Piedecuesta.

MORA, C., GIRALDO, B., GONÇALVES, F., (2002): Muestreo y Estudio Geoquímico de Pozos y Columnas para Caracterización Geoquímica de Unidades del Terciario y Cretáceo: Informe Final / ECOPEOTROL- ICP. Piedecuesta.

MORA, C., (2003): Evaluación de Crudos en las Cuencas Llanos Orientales y Valle Superior y Medio del Magdalena, Colombia: Caracterización Geoquímica e Implicaciones Exploratorias. Informe final, ECOPEOTROL – ICP. Piedecuesta.

NOTESTEIN, F., HUBMAN, C., AND BOWLER, J., (1944): Geology of the Barco Concession, Republic of Colombia, South America. Geol. Soc. Amer. B 11., V. 55.

OCCIDENTAL, (2002): Pozo Gibraltar-1 Reporte Final, Tomo 1- Geología, Santafé de Bogotá D. C., 150 pp.

PETERS, E., CASSA, R., (1994): Applied Source Rock Geochemistry. Magoon & Dow, eds. The Petroleum System-from Source to Trap: AAPG Memoria 60.

RANGEL, A., GIRALDO, B., MUNAR, F., OLAYA, I., GARCÍA, M., GUTIÉRREZ, J., MANTILLA, P., NIÑO, C., (2000): Estratigrafía Química y Facies Orgánicas del Terciario Inferior y Cretácico Superior del Piedemonte Llanero y Valle Medio Oriental del Magdalena: Informe Final. Piedecuesta, ECOPEOTROL. ICP. División

de Exploración y Producción. Área Geoquímica; Colciencias; Universidad Industrial de Santander. 176p.

RANGEL, A., PASSOS, S., (2003): Caracterización de Hidrocarburos y Ocurrencia de Crudos Pesados en el Sur de la Cuenca Llanos Orientales y Yará Caguán: Informe Final / ECOPEPETROL- ICP. Piedecuesta.

ROJAS, L., (2002): Interpretación Estructural Piedemonte Central Cuenca Llanos Orientales: Reporte Interno / ECOPEPETROL. Santafé de Bogotá D.C.

ROWAN, M., LINARES, R., (2000): Fold-Evolution Matrices and Axial-Surface Analysis of Fault-Bend Folds: Application to the Medina Anticline, Eastern Cordillera, Colombia. AAPG Bulletin, 84 (6), 741-764.

SANDOVAL, L., Y DÍAZ, D., (1999): Caracterización Geoquímica y Estratigráfica de la Formación Chipáque y el Miembro C8 de la Formación Carbonera en el Área Medina, Piedemonte Llanero. Trabajo de Grado, Escuela de Geología. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. 159p.

SANMIGUEL, E., VILLAREAL, O., GARCÍA, D., (2004): Simulación de los Procesos de Enterramiento y de la Generación de Petróleo en el Área Central del Piedemonte Llanero., En ACGGP, ed., III Convención Técnica de la Asociación Colombiana de Geólogos y Geofísicos del Petróleo, Santafé de Bogotá D. C.

SARMIENTO, L., (2002): Mesozoic Rifting and Cenozoic Basin Inversion History of the Eastern Cordillera, Colombian Andes; Inferences from Tectonic Models: Santafé de Bogotá D.C., ECOPEPETROL-Netherlands Research School of Sedimentary Geology, 295p.

SUAREZ, M., (2002): Interpretación Geológica de Imágenes Landast TM Sector Norte del Piedemonte Llanero, Bloques Sirirí y Catleya, ECOPEPOTROL- Santafé de Bogotá D.C., 38 pp.

TABOADA, A., RIVERA, L.A., FUENZALIDA, A., CISTERNAS, A., PHILIP, H., BIJWAARD, H., OLAYA, J., RIVERA, C., (2000): Geodynamics of the Northern Andes: Subductions and Intracontinental Deformation (Colombia). *Tectonics*, 19 (5): 787-813.

VAN DER HAMMEN, T., (1958): Estratigrafía del Terciario y Maestrichtiano Continentales y Tectogénesis de los Andes Colombianos: *Boletín Geológico* (Santafé de Bogotá D.C.), v. 6, p. 67-128.

VERGARA, L., RODRIGUEZ, G., (1997): The upper Cretaceous and Lower Paleocene of the Eastern Bogotá plateau and Llanos thrustbelt, Colombia: Alternative Appraisal to the nomenclature and sequence stratigraphy. *Geología Colombiana* No. 22, Ingeominas, Santafé de Bogotá D.C.