

**ESTUDIO DE LA MADUREZ TERMAL DE COMPONENTES ORGÁNICOS E  
INORGÁNICOS EN ROCAS CRETÁICAS DEL CINTURÓN  
ESMERALDÍFERO OCCIDENTAL (CORDILLERA ORIENTAL, COLOMBIA).**

**JUAN CARLOS RAMIREZ ARIAS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE GEOLOGÍA  
Bucaramanga  
2007**

**ESTUDIO DE LA MADUREZ TERMAL DE COMPONENTES ORGÁNICOS E  
INORGÁNICOS EN ROCAS CRETÁICAS DEL CINTURÓN  
ESMERALDÍFERO OCCIDENTAL (CORDILLERA ORIENTAL, COLOMBIA).**

**JUAN CARLOS RAMÍREZ ARIAS:**

**Proyecto de Grado para Optar al Título de Geólogo.**

**Director**

**Geólogo Ph.D. LUIS CARLOS MANTILLA FIGUEROA (UIS)**

**Codirectores**

**Geólogo JAIME MOJICA (INGEOMINAS)**

**Geólogo Ph.D. MARIO GARCÍA GONZÁLES (UIS)**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS**

**ESCUELA DE GEOLOGÍA**

**Bucaramanga**

**2007**

## ***Dedicatoria***

***A mi Mamá y a mi Hermana***

***A mi Nena Linda***

***A mis Compañeros y Amigos***

***A José Iván***

## **Agradecimientos**

*A Luis Carlos Mantilla, por la oportunidad brindada, su apoyo y su guía*

*A Jaime Mojica por sus enseñanzas y su colaboración desde que nos conocimos*

*A Verónica y Harold por su colaboración en los laboratorios de Cali*

*A German y a todo el personal de la regional del INGEOMINAS en Cali, por su colaboración durante nuestra estadía*

*A los profesores de la Escuela de Geología por sus enseñanzas*

*A mi mamá y a mi hermana, por sus cuidados de todos estos años*

*A mi tío Oliverio y a mis primos Armin y Henry y a toda su familia, por su apoyo durante la carrera y por todo lo demás*

*A mi nena linda, por su amor y comprensión*

*A mis compañeros y amigos, por su compañía y colaboración*

*A José Iván, por sus consejos*

*A mis compañeros y amigos de la universidad, por todo*

*Al INGEOMINAS por financiar este proyecto y por su colaboración en el desarrollo del mismo*

## TABLA DE CONTENIDO

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	3
2.1. OBJETIVO GENERAL.....	3
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	3
<b>3. METODOLOGÍA</b> .....	5
3.1. FASE DE PRECAMPO.....	5
3.2. FASE DE CAMPO.....	5
3.3. FASE DE LABORATORIO.....	6
3.3.1. Difracción de Rayos X (DRX).....	6
3.3.2. Carbono Orgánico Total (COT).....	9
3.3.3. Reflectancia de la Vitrinita (Ro).....	9
3.3.4. Pirólisis Rock Eval.....	10
<b>4. GENERALIDADES DEL ÁREA DE TRABAJO</b> .....	12
4.1. LOCALIZACIÓN Y VÍAS .....	12
4.2. FISIOGRAFÍA Y CLIMA .....	13
<b>5. ANTECEDENTES</b> .....	15
5.1. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL .....	15
5.2. MARCO GEOLÓGICO LOCAL.....	18
5.2.1. Aspectos Estratigráficos.....	18
5.2.2. Aspectos Estructurales.....	24
<b>6. RESULTADOS</b> .....	28
6.1. CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA.....	28
6.2. ANÁLISIS DE CRISTALINIDAD DE LA ILLITA (IC) .....	31
6.2.1. Consideraciones Previas .....	33
6.2.2. Resultados Obtenidos .....	36
6.3. GEOQUÍMICA ORGÁNICA .....	50

6.3.1.	Consideraciones Previas .....	51
6.3.2.	Resultados obtenidos .....	58
6.3.2.1.	Carbono Orgánico Total (COT).....	58
6.3.2.2.	Parámetros Obtenidos por Pirólisis Rock Eval.....	59
6.3.2.3.	Valores de Reflectancia de Vitrinita (Ro).....	62
6.3.3.	Interpretación de los Resultados .....	63
6.3.3.1.	Materia Orgánica .....	63
6.3.3.2.	Madurez Termal de la Materia Orgánica.....	69
6.4.	TEMPERATURAS MÁXIMAS PARA LAS FORMACIONES.....	75
<b>7.</b>	<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>81</b>
<b>8.</b>	<b>RECOMENDACIONES</b> .....	<b>83</b>
<b>9.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>84</b>
<b>10.</b>	<b>ANEXOS</b> .....	<b>89</b>

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros de medición en el difractómetro de rayos X.....	7
Tabla 2. Tabla resumen de la composición mineralógica aproximada para cada una de las formaciones, basada en los resultados de difracción de rayos X (ver Anexo 1). Minerales Principales: presentes en la mayoría de las muestras y/o en gran proporción; Minerales Intermedios: presentes en menor proporción de muestras y/o menor cantidad; Minerales Menores: presentes en menor cantidad de muestras y/o en cantidades muy bajas, próximas al umbral de detección del equipo. ....	29
Tabla 3. Muestras en que se midió la cristalinidad de la illita en los agregados <2µm (IC EG) y agregados desorientados (IC DES). ....	37
Tabla 4. Resumen de las muestras para las cuales se predijo el IC por medio de la correlación planteada en la Figura 10. ....	38
Tabla 5. Relación estratigráfica de las muestras analizadas mediante COT (ver información de detalle en Anexo 3).....	60
Tabla 6. Resumen estadístico de algunos parámetros obtenidos para los resultados de pirolisis Rock Eval. ....	62
Tabla 7. Tabla de valores obtenidos de Ro. ....	63
Tabla 8. Clasificación de los tipos de kerógeno, sus macerales, ambiente y potencial. Tomado y modificado de Merrill (1991). ....	64
Tabla 9. Clasificación general del potencial de una roca fuente dependiendo de su contenido de COT. Tomado de Merrill (1991). ....	65
Tabla 10. Indicadores de la calidad de la materia orgánica en una roca fuente. Tomado de Merrill (1991). ....	66
Tabla 11. Tabla de parámetros utilizados para la obtención de temperaturas máximas y sus resultados mostrados en la Figura 38 a manera de perfil de temperatura.....	76

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Mapa de ubicación del área de estudio. Apoyado en mapa político disponible en Encarta (2005). .....	13
Figura 2. Mapa de distribución de facies y ambiente tectónico durante el Berriasiano Valanginiano (Etayo <i>et al.</i> , 1997).....	16
Figura 3. Columna estratigráfica generalizada para la zona de estudio. Modificado de Reyes (2006). .....	19
Figura 4. Mapa estructural generalizado del Cinturón Esmeraldífero Occidental. Tomado de Reyes (2006). .....	26
Figura 5. Ubicación de deltas muestreados y analizados con difracción de rayos X.....	28
Figura 6. Mapa de localización general de todas las muestras analizadas para cristalinidad de la illita. ....	32
Figura 7. Detalle del esquema geológico de la Figura 15, donde se indica la localización de las columnas estratigráficas estudiadas y el Túnel la Paz.....	32
Figura 8. Medición de la cristalinidad de la illita, según Kubler (1967).....	33
Figura 9. Clasificación de las zonas de evolución metapelítica con los rangos de profundidad, temperatura y de cristalinidades de illita (IC). Modificado de Collo <i>et al.</i> , 2005. ....	35
Figura 10. Correlación IC entre muestras glicoladas y desorientadas de las columnas levantadas por el INGEOMINAS. ....	36
Figura 11. Histograma de distribución del IC en las muestras seleccionadas. ....	39
Figura 12. Distribución de los valores de IC discriminados según la edad de las rocas (Edad determinada según estudios bioestratigráficos realizados por el INGEOMINAS y documentados en Reyes <i>et al.</i> , 2006).....	41
Figura 13. Ubicación de las muestras clasificadas según su rango de IC. ....	42

Figura 14. Detalle de la ubicación de las muestras clasificadas según su rango de IC en la zona de las columnas levantadas.....	42
Figura 15. Sección Pauna-Borbur donde se observan las inversiones (flechas rojas) en el perfil de IC, en partes intermedias del Valanginiano (Formación Furatena), en la base del Hauteriviano-Barremiano (Formación Muzo) y de nuevo en la base del Aptiano Superior (Formación Capotes).....	43
Figura 16. Sección Borbur-Q. Buriburi donde se observan las inversiones (flechas rojas) en el perfil de IC, en la parte baja y superior de la Formación Furatena. ....	44
Figura 17. Sección Borbur-Q. Buriburi donde se observan las inversiones (flechas rojas) en el perfil de IC, en la parte media y superior de la Formación Capotes. ....	45
Figura 18. Correlación de los IC de las secciones levantadas por el INGEOMINAS.....	46
Figura 19. Mapa de ubicación de los túneles con análisis de cristalinidad de illitas.....	47
Figura 20. Mapa de ubicación de afloramientos de interés con análisis de cristalinidad de illitas.....	48
Figura 21. Mapa de ubicación de las muestras analizadas por pirolisis Rock Eval y LECO TOC.....	50
Figura 22. Detalle del mapa de ubicación, donde se muestran las columnas levantadas por el INGEOMINAS y el túnel La Paz. ....	51
Figura 23. Modelo de distribución del carbono orgánico total en una muestra de roca. Tomado de Merrill (1991).....	52
Figura 24. Efecto de la madurez termal en un volumen dado de carbono orgánico. Se observa la disminución del valor de COT y el aumento del carbono residual a medida que aumenta la madurez termal. Tomado y modificado de Merrill (1991).....	54

Figura 25. Perfiles de Ro representativos de diferentes procesos geológicos encontrados en secuencias sedimentarias. Tomado y modificado de Merrill (1991). .....	58
Figura 26 Histograma de distribución de COT en las muestras analizadas.....	59
Figura 27. Histograma de distribución de los valores de Tmax de todas las muestras analizadas. ....	61
Figura 28. Histograma de distribución de los valores de los picos S1, S2 y S3 de todas las muestras analizadas.....	61
Figura 29. Histograma de distribución de los valores de IH e IO de todas las muestras analizadas. ....	61
Figura 30. Histograma de distribución de los valores de IP de todas las muestras analizadas. ....	62
Figura 31. Distribución de COT en las muestras recolectadas discriminadas según las formaciones. Las muestras de Formaciones del Cretácico Superior se agruparon debido a que eran muy pocas.....	67
Figura 32. Histograma de distribución de COT en las muestras de las columnas, por cada sección y el total de las columnas. ....	67
Figura 33. Histograma de distribución de COT en las muestras recolectadas en las campañas de la UIS-INGEOMINAS. Se muestra también la distribución en los principales túneles.....	68
Figura 34. Diagrama de Van Krevelen donde se observan las etapas de madurez termal de la materia orgánica basados en las relaciones atómicas O/C vs. H/C (A.) y en el IO vs. IH (B.) obtenidos por pirolisis. Modificado de Bordenave (1993). ....	70
Figura 35. Comparación de varios parámetros indicadores de la madurez y su correlación con las etapas de madurez de la materia orgánica y los límites de generación de petróleo y gas. P= Petróleo, GH= Gas Húmedo, GS= Gas Seco, IP=Índice de Productividad. Tomado y modificado de Merrill (1991). ....	71
Figura 36. Diagrama de Van Krevelen con los puntos de las muestras analizadas. Todas las muestras caen en el área de la Metagénesis. ....	73

Figura 37. Perfil de Ro aproximado para la zona de estudio donde se muéstrale valor medido y los valores extrapolados que se esperarían para la muestra BCMM134g, en A con una extrapolación lineal y en B con una extrapolación exponencial.....	74
Figura 38. Columna estratigráfica generalizada con el perfil de temperatura obtenido a partir de los datos de la tabla 11. Modificado de Reyes (2006).....	77
Figura 39. Diagrama de soterramiento aproximado para la zona de estudio. Apoyado en los datos tomados de Reyes <i>et al.</i> (2006) y Cortés <i>et al.</i> (2006). .....	80

## LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Tabla de Semicuantificación Mineral por Difracción de Rayos .....	90
Anexo 2. Resumen de las muestras analizadas, su ubicación y tipo de análisis realizado. COT: Carbono Orgánico Total, RE: Rock Eval, IC: Índice de Cristalinidad Medido, IC PRED: Índice de Cristalinidad Predicho.....	99
Anexo 3. Tabla de Resultados de Pirolisis Rock Eval y COT .....	102
Anexo 4. Columna Estratigráfica en el Sector Pauna-San Pablo de Borbur con el perfil de IC. Modificado de INGEOMINAS- GEOSEARCH LTDA. (2005). .....	104
Anexo 5. Columna Estratigráfica en el Sector San Pablo de Borbur- Quebrada Buriburi con el perfil de IC. Modificado de INGEOMINAS-GEORESOURCES EXPLORATION LTDA. (2005).....	105
Anexo 6. Columna Estratigráfica en el Sector Jerusalén-La Paz con el perfil de IC. Modificado de INGEOMINAS-GEORESOURCES EXPLORATION LTDA. (2005). .....	106

## RESUMEN

TITULO: ESTUDIO DE LA MADUREZ TERMAL DE COMPONENTES ORGÁNICOS E INORGÁNICOS EN ROCAS CRETÁICAS DEL CINTURÓN ESMERALDÍFERO OCCIDENTAL (CORDILLERA ORIENTAL, COLOMBIA).\*

**Autor:** JUAN CARLOS RAMIREZ ARIAS.\*\*

**Palabras clave:** Cristalinidad de Illitas, Reflectancia de Vitrinita, Pirolisis Rock Eval, Mineralización de Esmeraldas.

La zona de estudio se encuentra ubicada en el Cinturón Esmeraldífero Occidental, en la Cordillera Oriental de Colombia. Esta zona presenta un registro completo de las rocas depositadas durante el Cretácico y muestran una deformación intensa que provocó fallas de cabalgamiento y plegamientos, la cual se inició desde el Mioceno Medio, con el levantamiento final de la Cordillera Oriental.

Las mediciones de cristalinidad de illitas (IC) realizadas en la fracción arcilla menor de 2 $\mu$ m, muestran que la mayoría de las rocas de la región presentan valores de IC en el rango de la epizona, con otra población importante en la anquizona. Los perfiles de IC en las columnas muestran fuertes anomalías termal en la base de las Formaciones Muzo y Capotes, las cuales pueden atribuirse a la circulación de fluidos hidrotermales alóctonos, provenientes de reacciones de devolatilización de rocas sedimentarias más profundas. Esta anomalía termal también se observa en las zonas mineralizadas y fuertemente deformadas dentro de los túneles muestreados, la cual se puede atribuir a la misma causa antes mencionada.

El estudio de los componentes orgánicos en rocas de la zona, por medio de análisis Rock Eval mostró que estas rocas han alcanzado una etapa avanzada de metagénesis, como se evidencia en un diagrama tipo Van Krevelen de IH vs. IO. Los valores de COT observados en los túneles productores de esmeraldas muestran valores de 2-5%, mientras que los valores de los túneles no productores son de 1-2%.

Las anomalías termal identificadas y los valores de COT observados pueden llegar a ser criterios útiles en la exploración de esmeraldas en esta región.

---

\* Proyecto de Grado.

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

## ABSTRACT

TITLE: STUDY OF THE THERMAL MATURITY OF ORGANIC AND INORGANIC COMPONENTS ON CRETACEOUS ROCKS OF EMERALDIFEROUS WESTERN BELT (EASTERN MOUNTAIN RANGE, COLOMBIA).\*

Author: JUAN CARLOS RAMIREZ ARIAS\*\*

Keywords: Illite Cristalinity, Vitrinite Reflectance, Rock Eval Pyrolysis, Emerald Mineralization.

The zone of study is located in Emeraldiferous Western Belt, in the Eastern Cordillera of Colombia. This zone displays a complete registry of the rocks deposited during the Cretaceous and intense deformation that caused thrust faults and folds, which began since Middle Miocene, with the final rise of the Eastern Cordillera.

The Illite Cristalinity measurements (IC) made in clay fraction smaller than  $2\mu\text{m}$ , show that most of rocks of this region presents values of IC in the rank of epizone, with another important population in anchizone. IC profiles in the columns show strong thermal anomalies in the base of the Muzo and Capotes Formations, which can be attributed to the circulation of alloctonous hidrotermals fluids, originating of devolatilization reactions of deeper sedimentary rocks. This thermal anomaly also is observed in the zones mineralized and strongly deformed within the sampled tunnels, which can be attributed to the same cause before mentioned.

The study of organic components of the zone by Rock Eval pyrolysis showed that these rocks have reached an advanced metagenesis stage, as demonstrated in Van Krevelen diagrams of HI vs. OI. The values of TOC observed in the producing emerald tunnels show values of 2-5%, whereas the values of the nonproducing tunnels are of 1-2%.

The thermal anomalies identified and the observed values of TOC can get to be useful criteria in the emerald exploration in this region.

---

\* Proyecto de Grado

\*\* Facultad de Fisicoquímica. Escuela de Geología. Director: Luís Carlos Mantilla Figueroa.

## 1. INTRODUCCIÓN

El presente proyecto se desarrolló en el marco del proyecto de Investigación denominado: "Investigación Petrográfica y Geoquímica de las Sedimentitas del Cretácico Inferior y sus Manifestaciones Hidrotermales Asociadas (Cordillera Oriental de Colombia): Implicaciones en la Búsqueda de Esmeraldas"; suscrito entre la Universidad Industrial de Santander (UIS) y el INGEOMINAS, a finales del año 2005, bajo el marco del acuerdo específico inter-institucional No. 01 (complementario al Convenio Marco de Cooperación No. 005 de 2001).

El conocimiento de la arquitectura estratigráfica de una cuenca sedimentaria y la evolución deformacional, termal e hidrotermal de sus unidades rocosas constituyentes, son aspectos claves para entender su formación y evolución geológica. De igual manera, éste conocimiento resulta de enorme utilidad en trabajos de exploración de yacimientos minerales (hidrocarburos, depósitos minerales MVT, etc.), debido a que permiten reconocer anomalías termales, niveles de alto paleoflujo hidráulico, entre otros aspectos.

Existen varios métodos propuestos para determinar la madurez termal de las rocas sedimentarias, ya sea utilizando los componentes orgánicos (índice de alteración de los conodontos, reflectancia de vitrinita, etc.) presentes en las rocas, o estudiando sus componentes inorgánicos (cristalinidad de la illita, cristalinidad de la clorita, geotermometría de intercambio isotópico entre minerales, etc.). Cada uno de estos métodos tiene sus ventajas y desventajas, según las características de las rocas a analizar. Por esta razón, se suele utilizar varios métodos con un mismo propósito.

Con el propósito de estudiar la madurez termal de las rocas sedimentarias, fundamentalmente del Cretácico Inferior, aflorantes en el área del Cinturón Esmeraldífero Occidental, se seleccionaron rocas de tres columnas estratigráficas del área y de algunos túneles desarrollados para la explotación de esmeraldas. Un estudio paleontológico previo, realizado por el INGEOMINAS, permitió un buen control estratigráfico, debido a que con anterioridad no se habían definido unidades bioestratigráficas. A las muestras seleccionadas se les analizó la materia orgánica mediante pirólisis Rock Eval y Reflectancia de vitrinita (Ro). Por otro lado, varias de estas muestras fueron tratadas para separar illitas <2 micras (componentes inorgánicos), a las cuales se les determinó su madurez termal a partir de su índice de cristalinidad.

Los resultados obtenidos permiten establecer que la secuencia sedimentaria de rocas cretácicas aflorantes en el área del cinturón esmeraldífero occidental, presentan una evolución termal compleja, debido a que no presenta la estructura termal típica formada bajo un gradiente de temperatura regional (aporte homogéneo de calor derivado del manto). La mayor madurez termal alcanzada por los componentes orgánicos e inorgánicos en las rocas de la Formación Muzo y Capotes (la primera es la unidad hospedadora de esmeraldas), en comparación con aquellos componentes de las rocas de la unidad infrayacente Furatena, apuntan a que el calor necesario para alcanzar ese mayor grado de madurez termal, debió ser transportado por fluidos calientes migratorios (muy seguramente correlacionables con los fluidos hidrotermales responsables de la mineralización esmeraldífera).

Por lo anteriormente mencionado, la presencia de la anomalía termal descrita, es considerada en éste trabajo como un criterio de exploración importante a tener en cuenta para definir áreas con potencial esmeraldífero.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1. OBJETIVO GENERAL

Estudiar la madurez termal de los componentes orgánicos e inorgánicos en un grupo de rocas de edad Cretácico, aflorantes en el cinturón esmeraldífero occidental (Cordillera Oriental, Colombia), a partir de análisis de IC (Cristalinidad de Illitas), Reflectancia de la vitrinita (Ro) y parámetros geoquímicos tipo Rock Eval.

### 2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Revisión y análisis bibliográfico sobre la geología del área de estudio y sobre los métodos de análisis que se aplicarán en la investigación propuesta.
- Realizar un trabajo de campo con el propósito de reconocer la geología del área, según la nueva base cartográfica geológica propuesta por el INGEOMINAS, y elaborada en el marco de éste proyecto de cooperación inter-institucional. Asimismo, realizar un muestreo de rocas en columnas y sectores concretos del área.
- Analizar las muestras de rocas (tomadas de las columnas anteriormente mencionadas y de otros sectores concretos del área) mediante DRX en polvo desorientado, para identificar cuales de ellas presentan illita en suficiente cantidad y con menor grado de interferencia (reflexiones basales de paragonita y otras arcillas), para así realizar el análisis de la cristalinidad de las illitas presentes en las fracciones granulométricas < 2 micras.

- Realizar un análisis de las características geoquímicas de la materia orgánica presente en rocas (de columnas y sectores concretos del área de estudio), mediante análisis tipo Rock Eval (Tmax, S1, S2, S3, IH, IO) y análisis de reflectancia de la vitrinita en las muestras de columnas en las que se presente este maceral.
- Definir las condiciones máximas de temperatura alcanzadas por las rocas estudiadas del cinturón esmeraldífero Occidental (Cordillera Oriental), con base en los parámetros de madurez termal de los componentes orgánicos e inorgánicos anteriormente mencionados.

### **3. METODOLOGÍA**

El presente trabajo se llevó a cabo a través de las siguientes fases:

#### **3.1. FASE PRECAMPO**

Durante la fase de precampo se realizó la recopilación bibliográfica de la zona de estudio y demás relacionada con el tema de interés, la recopilación se realizó utilizando los medios disponibles en las bibliotecas de la UIS, INGEOMINAS, ICP y por medio de Internet. También se consultaron los mapas geológicos a escala 1:100000 de la zona y las memorias de los respectivos mapas; además se buscaron los mapas topográficos, mapas viales e imágenes de satélite, con el fin de familiarizarse con la zona de estudio.

Previo al viaje a campo, se realizó una reunión técnica plenaria entre el personal técnico de la UIS y del INGEOMINAS que participan en el proyecto, la cual se llevó a cabo en la sede del INGEOMINAS de Bogotá. En esta reunión se mostró el trabajo de campo y de laboratorio realizado hasta el momento por el INGEOMINAS, y luego de una discusión técnica conjunta se planearon los trabajos de campo para fines de un muestreo más específico (en túneles y en áreas concretas de superficie).

#### **3.2. FASE DE CAMPO**

En la fase de campo de este proyecto se realizó una visita al área de estudio por parte del grupo de tesistas y el director de proyecto (Grupo UIS) en compañía del personal de INGEOMINAS vinculado a este proyecto.

Inicialmente se llevó a cabo un reconocimiento de la geología del área, la cual fue guiada por el personal del INGEOMINAS, resaltando las principales estructuras y unidades cronoestratigráficas definidas anteriormente por ellos mismos, a la vez que se recolectaron algunas muestras de superficie en las zonas que presentaban algún interés específico. Posteriormente se visitaron los túneles de mayor interés definidos en la fase de precampo, con el fin de realizar el levantamiento y muestreo sistemático de cada uno de ellos y se continuó con el muestreo en superficie en las zonas adyacentes a los túneles y otras de afloramientos de interés.

### 3.3. FASE DE LABORATORIO

La fase de laboratorio se llevó a cabo en los laboratorios del INGEOMINAS, regional CALI; la UIS, sede Principal y Guatiguará; y en laboratorios de EE. UU. (Baseline Resolution, Inc., Shenandoah, Texas).

#### 3.3.1. Difracción de Rayos X (DRX)

Las muestras recolectadas en la fase de campo por el grupo de la UIS y las recolectadas por el personal del INGEOMINAS en otras campañas en las que se levantaron las columnas estratigráficas fueron analizadas mediante difracción de rayos X en un difractómetro marca Rigaku, modelo RINT2000 en las instalaciones del INGEOMINAS, Regional Cali. Las especificaciones técnicas del equipo son las siguientes:

Goniómetro = RINT2000, goniómetro de ángulo amplio, 185°

Portamuestra = Estándar de aluminio

Monocromador = Automático, 3.3539

Rendijas DS= 1°

Rendijas SS= 1°

Rendijas RS= 0,15mm

Contador = Contador de centelleo

Inicialmente las muestras se analizaron en polvo desorientado para determinar los minerales presentes; para estas mediciones se tomaron aproximadamente 20 g de cada muestra, los cuales se trituraron manualmente con un martillo dentro de un papel blanco lo cual se realizó en los laboratorios de la Escuela de Geología de la UIS. Posteriormente se pulverizaron en un molino de rodillo de tungsteno en los laboratorios del INGEOMINAS, Regional Cali. La fracción de la muestra se seleccionó de modo que fuese representativa de la muestra total o del mineral problema específico, de esta muestra pulverizada se tomaron aproximadamente 2 g y se montaron en el portamuestra estándar de aluminio para realizar las mediciones, las cuales se realizaron con los parámetros de la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros de medición en el difractómetro de rayos X.

<b>PARÁMETRO</b>	<b>MEDICIÓN DESORIENTADA</b>	<b>MEDICIÓN ORIENTADA</b>	<b>MEDICIÓN GLICOLADA</b>
<b>Modo de escaneo</b>	2 Theta / Theta		
<b>Unidad X</b>	grados		
<b>Unidad Y</b>	cuentas por segundo (cps)		
<b>Inicio</b>	2.00°		
<b>Parada</b>	70.00°	30.00°	20.00°
<b>Muestreo (step)</b>	0.02°	0.015°	
<b>Velocidad</b>	5%/minuto	3%/minuto	
<b>Voltaje</b>	40 kV		
<b>Amperaje</b>	30 mA		

De las muestras analizadas anteriormente se seleccionaron algunas de las columnas y de algunos de los túneles de interés para realizar el análisis de la cristalinidad de la illita. Dado que para dicho análisis es necesaria una separación de la fracción menor de 2  $\mu\text{m}$  y su montaje en agregados orientados, se probaron diferentes metodologías existentes utilizando una misma muestra, para observar de que modo se obtenían los mejores resultados y de la manera más rápida. Para lo cual se utilizaron la metodología documentada en Mantilla (2003), la utilizada por el Dr. Thorez y la utilizada en el INGEOMINAS Regional Cali (Mojica, J., comunicación verbal), dados los resultados obtenidos se decidió utilizar la metodología usada por el personal del INGEOMINAS con una pequeña modificación. En la metodología aplicada se toman 10 g de la muestra pulverizada a malla 100 y se les agrega agua destilada o desionizada hasta completar 100 ml, ésta mezcla se pone en un agitador durante 20 minutos, luego de lo cual se deja en reposo por 15 minutos, a continuación se extrae la mitad superior de la suspensión y se pone en una probeta de 100 ml, agregándole agua destilada o desionizada hasta completar este volumen, allí se deja reposar durante 50 minutos y después se extraen los 10ml superiores, los cuales se llevan a una centrífuga durante 100 segundos a 1000 rpm, la suspensión se extrae y se vuelve a centrifugar a 3500 rpm durante 10 minutos o hasta que la suspensión quede cristalina, el agua sobrenadante se desecha y el precipitado se disgrega en 1 ml de agua, de este mililitro se toma la mitad y se dispersa sobre un vidrio portaobjetos en un área de 1,5 X 1,5 cm en la parte superior del mismo, la cual es la única área efectiva para la medición en el difractómetro utilizado, ésta se deja secar a temperatura ambiente para su posterior medición. Esta medición inicial se conoce como la medición orientada, después se ponen las placas orientadas en una campana de vacío con etilenglicol y se calienta a 40°C durante 6 horas, lo cual se conoce como la glicolación, posteriormente se mide de nuevo en el difractómetro y esta medición se conoce como glicolada. Dado que las muestras carecen de esmectitas y halloysita, se obvió el calentamiento a 500°C o quemado.

Las mediciones orientadas y etilenglicoladas se realizaron bajo los parámetros descritos en la Tabla 1:

Los difractogramas se analizaron con el software D-Max para la identificación de los minerales presentes realizando la comparación con los perfiles de difracción reportados en la base de datos Powder Diffraction File (PDF-2) del Internacional Center for Diffraction Data (ICDD), además se realizó una determinación semicuantitativa de los mismos. Para el análisis de la cristalinidad de la illita, los archivos binarios se exportaron a formato ASCII para poder trabajarlos en Excel y de este programa transformarlos a formato .xrd para trabajarlo en el software PowderX de la Escuela de Química de la UIS y así poder medirla de manera más fácil y precisa.

### 3.3.2. Carbono Orgánico Total (COT)

Las muestras seleccionadas para el análisis de COT fueron las mismas para el análisis de pirólisis rock eval. La técnica seleccionada fue el método LECO, el cual arroja valores mucho más confiables. Algunas de las muestras fueron analizadas en los laboratorios de Geología de la sede de Guatiguará y las demás fueron enviadas a los laboratorios Baseline Resolution Inc, en Texas, para su análisis simultáneo de pirólisis Rock Eval.

En los laboratorios de Geología de Guatiguará se utilizó un analizador LECO SC-144DR.

### 3.3.3. Reflectancia de la Vitrinita (Ro)

Las muestras en las que se realizaron análisis de Ro fueron seleccionadas de las diferentes columnas levantadas por el INGEOMINAS, las cuales fueron:

Columna San Pablo de Borbur-Buriburi.

Columna Pauna-San Pablo de Borbur.

Columna Jerusalén-La Paz.

Columna Otanche-El Encanto.

Las muestras seleccionadas se distribuyeron de manera que se pudiese abarcar de mejor manera estas secciones. Las muestras se trituraron y se escogió la fracción entre malla 25 y 30. A esta fracción se le realizó un ataque con HCl y HF para eliminar la matriz mineral y poder concentrar la materia orgánica, de modo que se pudieran obtener mayor cantidad de mediciones, este proceso de concentración de la materia orgánica se realizó en los laboratorios GEMS Ltda. El concentrado de la materia orgánica se puso en agujeros de 10 mm perforados en los moldes de resina, junto con unas gotas de resina epóxica, se dejan secar y se pulen en una pulidora automática Wurtz.

Para la medición de la Reflectancia de la Vitrinita (Ro), realizada en los laboratorios de la Escuela de Geología de la UIS (Sede Guatiguará), se empleó un microscopio de luz reflejada Zeiss, modelo Axiotron equipado con un fotómetro MPM400. En la toma de datos de Ro se utilizaron objetivos de inmersión de 20 y 50 aumentos y oculares de 10 aumentos. La calibración del instrumento se realizó empleando el estándar de zafiro de 0,57% en la longitud de onda de 546 nm. El manejo del fotómetro y el procesamiento de los datos de Ro se realizaron con el software PHOTAN. El método para la toma de datos de Ro sigue los lineamientos de la norma ASTM 2798.

#### 3.3.4. Pirólisis Rock Eval

Los análisis de pirólisis Rock Eval fueron realizados en los laboratorios Baseline Resolution Inc., en Texas (EE.UU.).

Tal como se documenta en Bordenave (1993) y por comunicación electrónica de Walker, P. (Baseline Resolution Inc., 2006), el procedimiento para este tipo de análisis es el siguiente: se calienta una pequeña cantidad de muestra (100 mg) en una atmósfera de Helio a 300°C durante 3 minutos, en esta etapa se obtiene el pico S1 que corresponde a los hidrocarburos libres presentes en la muestra. Después se aumenta la temperatura a una velocidad de 25°C/min hasta 600°C, durante esta segunda etapa de calentamiento son expulsados los hidrocarburos y los compuestos que contienen oxígeno. Los hidrocarburos forman el pico S2 que corresponde al potencial presente de la roca. Los compuestos de oxígeno descompuestos entre 300 y 390°C y el CO<sub>2</sub> resultante, es medido como el pico S3.

La temperatura a la que el pico S2 es máximo se conoce como T<sub>max</sub>, y es un indicador de la madurez termal alcanzada por la roca. Con estos datos obtenidos y los datos de COT se pueden realizar algunos cálculos para caracterizar la materia orgánica de la roca y otros parámetros de madurez.

El instrumento es calibrado con un shale de Eagleford que tiene un T<sub>max</sub> de 419°C y un pico S2 de 16.91 mg/g. El estándar es corrido cada 10 muestras para revisar el estado de los instrumentos. Corridas aleatorias son realizadas también para revisar los resultados (Walker, P., comunicación electrónica).

## **4. GENERALIDADES DEL ÁREA DE TRABAJO**

### **4.1. LOCALIZACIÓN Y VÍAS**

El área de estudio hace parte del cinturón esmeraldífero occidental de la Cordillera Oriental de Colombia, y se enmarca dentro de la denominada cuenca de Cundinamarca-Boyacá. Este cinturón esmeraldífero está localizado al occidente del departamento de Boyacá, y al noroccidente del departamento de Cundinamarca. Las poblaciones más importantes del área en el departamento de Boyacá pertenecen a la provincia Occidente y son Muzo, Quípama, Otanche y San Pablo de Borbur; en el departamento de Cundinamarca pertenecen a la provincia de Ríonegro, los cuales son Yacopí y La Palma. (Figura 1). El área objeto de este trabajo se encuentra localizada dentro de las planchas 169 y 189 (IGAC).

La red vial existente en la zona une a los municipios presentes en la región, pero ésta se ve bastante afectada por las lluvias que provocan deslizamientos y deterioro generalizado, debido a la falta de obras que impidan tales daños y a un adecuado mantenimiento de las mismas. El acceso al área se puede hacer por la vía Bucaramanga-Chiquinquirá-San Pablo de Borbur-Otanche-Quípama-Yacopí-La Palma, u otras alternas dependiendo del estado de la mencionada anteriormente.

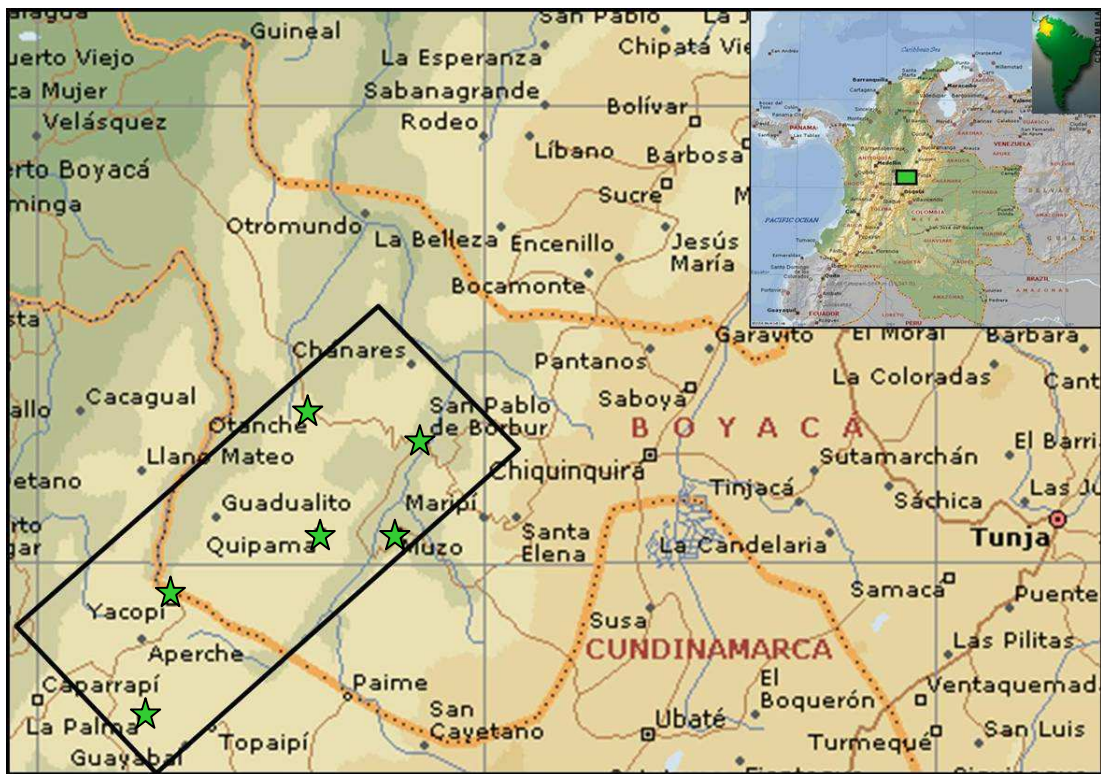


Figura 1 Mapa de ubicación del área de estudio. Apoyado en mapa político disponible en Encarta (2005).

#### 4.2. FISIOGRAFÍA Y CLIMA

La zona de estudio se caracteriza por presentar un relieve moderado a fuerte que varía en elevaciones desde los 400 hasta los 2100 m.s.n.m., estando las zonas más bajas hacia el occidente, su relieve está caracterizado por ser de tipo montañoso mixto de origen estructural-denudativo, característica principal de los terrenos con litologías duras y blandas, que en esta zona presentan geformas como sinclinales colgados, pequeñas laderas estructurales y crestas, con desarrollo limitado y predominio de montañas, laderas y faldas de origen denudativo. Presenta un drenaje subparalelo y subdendrítico de densidad media, con desarrollo de valles juveniles. Los ríos que drenan esta área pertenecen a la

cuenca hidrográfica del río Magdalena. Los más importantes son los ríos Canutillo, Ibacapí, Piedras, Minero, Chinche, Tambrias, Murca y Patá.

El clima de esta región se clasifica como cálido húmedo en las zonas más bajas y en las zonas más altas se clasifica como templado húmedo a muy húmedo. La temperatura media anual en las zonas más altas oscila entre los 18°C y los 24°C, y en las zonas bajas es superior a los 24°C. En toda la zona se presenta una precipitación anual entre 2500 y 4500 mm/año, distribuidos en 150 a 250 días de lluvia al año, con temporadas de lluvia marcadas en Abril-Mayo y en Octubre-Noviembre, aunque los periodos intermedios no son completamente secos (recursos electrónicos R-HydroNET v1.0 y Definiciones Pertinentes a la Variable).

## 5. ANTECEDENTES

### 5.1. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

Como ya se dijo, la zona de estudio se encuentra ubicada en la Cordillera Oriental de Colombia, la cual está caracterizada por un basamento constituido por rocas ígneas y metamórficas de edad Precámbrico y Paleozoico, el cual ha sufrido múltiples episodios deformativos durante eventos orogénicos pre-Mesozoicos. Éste basamento está suprayacido por una secuencia sedimentaria de gran espesor, de edad Mesozoico y Cenozoico, las cuales, a su vez, han sido fuertemente deformadas durante el Neógeno por fallamientos y plegamientos (Taboada *et al.*, 2000).

El Valle del Magdalena, la Cordillera Oriental y los Llanos Orientales constituyeron una cuenca sedimentaria importante desde el Triásico hasta el Mioceno Medio. El desarrollo de la cuenca se inició durante el Triásico hasta principios del Cretácico con una megasecuencia synrift relacionada a la separación de Norte y Sur América en el proto-Caribe. El desarrollo de la cuenca continuó durante el Cretácico en un ambiente tectónico de back-arc al este de la subducción Andina con un predominio de una sedimentación marina (Cooper *et al.*, 1995).

La invasión marina de principios del Cretácico tuvo lugar en lo que hoy es la parte central de la Cordillera Oriental y el Valle del Magdalena, indicando que ésta zona constituyó un gran depocentro durante ésta época y por lo que muestran las reconstrucciones paleogeográficas realizadas por Etayo *et al.* (1997), ésta condición se mantuvo durante la mayor parte del Cretácico Inferior (Figura 2).



tectónica que provocó cabalgamientos y plegamientos con vergencia hacia el oeste en el Valle Medio del Magdalena (Taboada *et al.*, 2000), ésta deformación terminó la depositación de sedimentos a través de Colombia, pero los efectos posteriores de la carga reestablecieron la cuenca en la que se depositó la secuencia pre-Andina hasta el Mioceno temprano (Cooper *et al.*, 1995). Además a estas fases tectónicas, también se identifica una última fase pre-Andina durante Oligoceno más bajo, caracterizada por cabalgamientos y plegamientos a lo largo de los flancos de la Cordillera Oriental (Branquet *et al.*, 1999 en Taboada *et al.*, 2000). Durante las fases del Eoceno-Oligoceno, probablemente ocurrió deformación transpresiva dextral a lo largo de los sistemas de fallas de Romeral y Salinas como resultado de la convergencia oblicua entre la placa Paleo-Caribe y el Noroeste de Suramérica. La acreción del terreno San Jacinto parece correlacionarse con estas fases deformativas (Duque-Caro, 1984 en Taboada *et al.*, 2000).

El inicio de la deformación Andina en la Cordillera Oriental durante el Mioceno Medio, aisló el Valle del Magdalena de la Cuenca de los Llanos (Cooper *et al.*, 1995). Esta deformación se debió a la acreción del arco Baudó-Panamá, que al parecer bloqueó la subducción oceánica normal de la Placa Caribe debajo del continente, provocando que la velocidad de convergencia entre las placas disminuyera de modo que la deformación activa se trasladó hacia el este, hacia zonas de la litosfera continental debilitadas por la misma subducción de bajo ángulo y finalmente acomodó el acortamiento de esta deformación a lo largo de las cuencas extensionales Mesozoicas por medio de la inversión de fallas normales antiguas. El acortamiento de la litosfera continental está asociada con una subducción de buzamiento E-SE de la Placa Paleo-Caribe debajo de la Cordillera Oriental (Taboada *et al.*, 2000).

La zona de estudio pertenece al segmento central de la Cordillera Oriental el cual incluye la Sabana de Bogotá y sus Piedemontes Oriental y Occidental, en los

cuales se observan fallas inversas buzando hacia la Cordillera. El levantamiento principal en el área de la Sabana de Bogotá ocurrió entre 3 y 5 Ma, según los datos palinológicos de depósitos del Plioceno (Helmens y Van der Hammen, 1995 en Taboada *et al.* 2000), aunque deformaciones compresivas anteriores se pueden identificar en esta zona, en especial del Mioceno, en la zona axial de la Cordillera Oriental, donde rocas sedimentarias plegadas están suprayacidas por depósitos del Plioceno inclinados con una pronunciada inconformidad angular (Taboada *et al.*, 1996 en Taboada *et al.*, 2000).

## 5.2. MARCO GEOLÓGICO LOCAL

### 5.2.1. Aspectos Estratigráficos

En el área de estudio afloran rocas del Cretácico e incluso del Paleógeno, en zonas adyacentes, fuera de la zona de estudio afloran rocas de edad Jurásico pertenecientes a la Formación Arcabuco al NW del municipio de Florián (Santander), y al NW de Pauna y al W de Tununguá se presentan algunos depósitos Cuaternarios de origen fluvio-torrencial.

En el Cinturón Esmeraldífero Occidental la cartografía reciente realizada por el INGEOMINAS (Reyes *et al.* 2006) estableció una secuencia litoestratigráfica basada en los cambios litológicos y su contenido fósil (Figura 3). Esto se hizo debido a que en esta área convergen nomenclaturas diferentes, consideradas en trabajos geológicos anteriores, las cuales provienen de los departamentos de Boyacá-Santander, Cundinamarca y Valle superior y medio del Magdalena; pero las variaciones faciales encontradas con respecto a las unidades utilizadas en las regiones antes mencionadas, hace difícil adoptar una de estas nomenclaturas; lo anterior ha llevado a que en esta cartografía se propongan algunas unidades informales de acuerdo a las características lito y bioestratigráficas. A continuación, se describirán las principales unidades de interés y que han sido objeto del

presente estudio, las cuales fueron cartografiadas y descritas en Reyes *et al.* (2006):

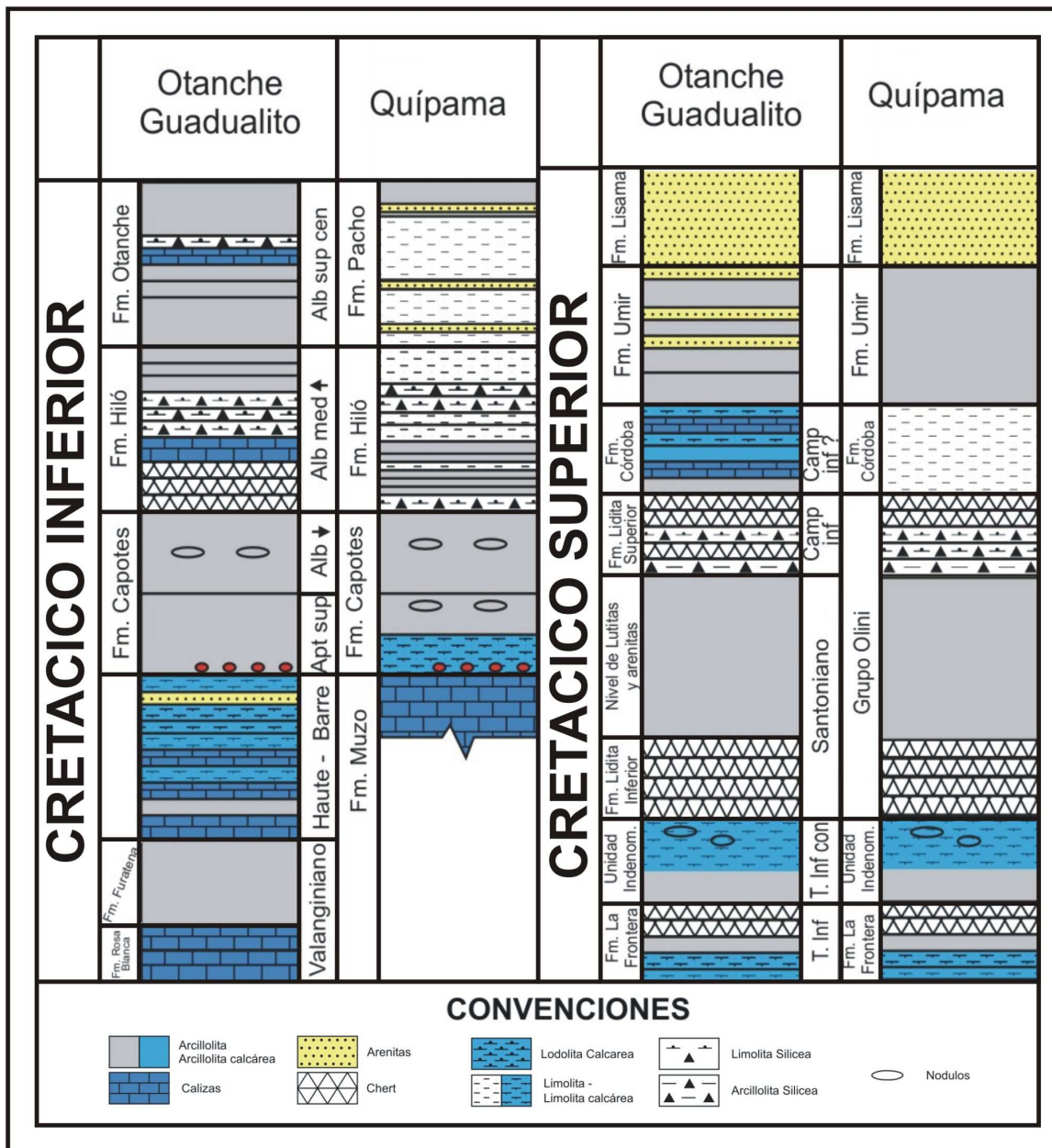


Figura 3. Columna estratigráfica generalizada para la zona de estudio. Modificado de Reyes (2006).

- Formación Rosablanca

En esta unidad se encuentran cortes productivos de esmeraldas, siendo el más conocido el de Peñas Blancas; el cual está localizado en el eje de la estructura. Esta unidad presenta intercalaciones de micritas algunas veces carbonosas en capas gruesas y medias con lodolitas calcáreas y arcillolitas carbonosas. Se calcula que la Formación Rosablanca presenta como mínimo un espesor de 600 m (incompleto), hacia el norte del área de estudio. Al SW de La Belleza, sobre el flanco oriental del Anticlinal de Portones, el límite inferior de la unidad es inconforme angular con la Formación Arcabuco, mientras que sobre el flanco occidental es concordante con la Formación Cumbre. Al W y SW de Florián el límite superior es concordante-transicional con la Formación Ritoque, mientras que en el área restante, este límite puede ser concordante-neto o concordante transicional rápido con la Formación Furatena. Los datos bioestratigráficos indican de manera preliminar, que la parte alta de la Formación Rosa Blanca es de edad Valanginiano (Etayo, F., comunicación verbal, 2005 en Reyes *et al.* 2006).

- Formación Furatena

Esta unidad presenta un espesor aproximado de 1000 m, según columnas levantadas en la carretera Borbur-Buriburi (INGEOMINAS-GEORESOURCES EXPLORATION LTDA., 2005 en Reyes *et al.* 2006) y en la carretera Borbur-Pauna (INGEOMINAS- GEOSEARCH LTDA., 2005 en Reyes *et al.* 2006). La Formación Furatena está compuesta por intercalaciones de limolitas micáceas, lodolitas calcáreas, shales y arcillolitas. Existen concreciones calcáreas con pirita y presentan una deformación muy penetrativa. Esta unidad suprayace a micritas de la Formación Rosablanca de manera concordante e infrayace a arcillolitas calcáreas de la Formación Muzo en un contacto neto. Las amonitas han arrojado una edad Valanginiana (Etayo, F., comunicación verbal, 2005 en Reyes *et al.* 2006).

- Formación Muzo

Esta Formación aflora de manera generalizada en la zona de estudio formando parte de las estructuras presentes ya sea en áreas pequeñas o franjas delgadas asociadas a los pliegues; aunque también cubre algunas zonas de considerable extensión como al E y SE de Yacopí y al W de Pauna donde se presenta una franja bastante amplia. Esta unidad es una secuencia en general calcárea, sin embargo en la plancha 170, al norte de la Falla de Ibacapí, se observa meteorizada y no se reconoce su composición calcárea y al norte de Pauna tiene un carácter silíceo. En general está compuesta por lodolitas calcáreas y micritas con venas de calcita y pirita. Se observan lodolitas albitizadas y zonas de brechas hidrotermales cerca a las zonas mineralizadas. Esta unidad alberga la mayoría de las minas productoras de esmeraldas de la región (las demás se encuentran en la Formación Rosablanca), aunque también presenta minas no productoras, por lo cual es de gran interés para la exploración,

INGEOMINAS- GEOSEARCH LTDA., (2005) en Reyes *et al.* (2006) levantaron una columna en la carretera Borbur-Pauna en donde el espesor de este intervalo es de 160 m; en la plancha 169 y 189, por cortes realizados sobre el mapa, el espesor aproximado es de 300 m.

El contacto inferior es transicional a neto con la Formación Furatena y el superior es neto a transicional con la Formación Capotes. La edad que arrojan las amonitas recolectadas es Barremiano (Etayo, F., comunicación verbal, 2005 en Reyes *et al.* 2006). Hacia el norte de la Falla de Ibacapí, ésta unidad descansa sobre rocas de las Formaciones Ritoque o Rosablanca en un contacto neto, mientras en el resto del área de estudio descansa sobre la Formación Furatena.

- Formación Capotes

Esta Formación se encuentra distribuida de manera generalizada en toda el área de estudio, aflorando en áreas de extensión variable, dependiendo de su posición

estructural. La secuencia presenta arcillolitas y limolitas principalmente, son comunes las concreciones con amonitas y en algunos sectores la parte inferior es calcárea. El espesor aproximado es de 750 m; el límite inferior con la Formación Muzo es concordante, pero considerando la edad de ésta última y la edad de la parte baja de la Formación Capotes como Aptiano tardío se presenta un hiato correspondiente al Aptiano inferior. El límite superior con la Formación Hiló es transicional.

- Formación Hiló

Esta unidad aflora en la principalmente dentro de las planchas 169 y 189, en general se expresa como una unidad de morfología suave. La Formación Hiló presenta principalmente arcillolitas silíceas, chert en capas plano paralelas, intercaladas con capas calcáreas, también presenta algunos niveles ricos en fauna de amonitas y bivalvos. En el sector de Nazareth, presenta un espesor aproximado 250 m, esta unidad descansa concordantemente con la Formación Capotes y la suprayace de igual manera la Formación Otanche; los contactos inferior y superior son transicionales. Las amonitas arrojan una edad de Albiano Medio a Albiano Superior (Etayo, F., comunicación verbal, 2005 en Reyes *et al.* 2006).

- Formación Otanche

Aflora en las planchas 169 y 189 formando principalmente franjas alrededor de los sinclinales de Guadualito, Otanche, Santa Helena y Churupaco. La unidad presenta arcillolitas limosas ligeramente calcáreas y carbonosas intercaladas con limolitas laminadas, micritas y porcelanitas. De esta unidad aflora la base; el espesor aflorante se estima en 140 m calculados mediante corte geológico, en el núcleo del Sinclinal de Churupaco. El límite inferior con la Formación Hiló es concordante-transicional; el límite superior no aparece en la zona de estudio. Se

tomaron amonitas en la base de la unidad que indican edad Albiano tardío bajo, se infiere una edad total de Albiano Medio- Cenomaniano (Etayo, F., comunicación verbal, 2005 en Reyes *et al.* 2006).

- Formación La Frontera

Aflora en las planchas 169 y 189 formando franjas alrededor de los sinclinales de Guadualito, Otanche y Santa Helena. Es un paquete silíceo, constituido por capas de porcelanitas, chert y lodolitas arcillosas hacia el techo, la cual genera una morfología abrupta. El espesor aproximado son 50 m, el límite inferior es neto y el límite superior es transicional rápido. La edad arrojada por las amonitas es Turoniano pars. (Etayo, F., comunicación verbal, 2005 en Reyes *et al.* 2006). Esta unidad se puede correlacionar con la Formación La Frontera.

- Unidad No Denominada

Ésta unidad se compone principalmente de lodolitas, lodolitas calcáreas, micritas con concreciones calcáreas, arcillolitas laminadas con foraminíferos y restos fosfáticos. El espesor aflorante es de por lo menos 300 m; en el núcleo del Anticlinal de Terama deben aflorar como mínimo unos 100 m de espesor. El límite superior con el Grupo Olini es concordante-neto; el límite inferior no aparece en el área de estudio. Se colectaron varias muestras de amonitas que representan el Coniaciano (Etayo, F., comunicación verbal, 2005 en Reyes *et al.* 2006); la posición estratigráfica allí, es similar a la del nivel de “Ruedas de carreta” del Valle Superior del Magdalena o al Miembro Cucaita de la Formación Conejo.

- Grupo Olini

Aflora entre las fallas de Caparrapí y Bituima, en una franja alargada orientada SW-NE. Las tres formaciones que conforman el Grupo Olini en el VSM no se

diferencian en la zona de estudio, por esta razón se cartografió como grupo. La unidad esta constituida por micritas, porcelanitas en ocasiones calcáreas, chert y fosforitas; la estratificación es plana paralela con capas medianas y delgadas principalmente, las capas más delgadas muestran partición prismática; hacia la base se presentan algunas concreciones micríticas de hasta 1 m de diámetro. El límite superior con la Formación Córdoba se presume concordante; el límite inferior es concordante-neto. Se tienen algunas muestras de amonitas de la parte basal que indican edad Coniaciano (Etayo, F., comunicación verbal, 2005 en Reyes *et al.* 2006), en general la edad es Coniaciano Superior- Santoniano.

- Formación Cordoba

Esta unidad aflora haciendo parte de los sinclinales de Otanche, Santa Helena y Guadualito; también aflora al W de la Falla de Caparrapí en escamas tectónicas relacionadas con esta estructura y en el núcleo del Sinclinal del Alto de Ruedas. La unidad se compone de lodolitas calcáreas grises, intercaladas con limolitas arcillosas grises: se presentan foraminíferos bentónicos. El espesor aflorante, mínimo es de 500 m; Rodríguez & Ulloa (1994), reportan 662m de espesor en la localidad tipo de la Formación Córdoba, en la línea de ferrocarril Córdoba-Cambrás. Tanto el límite inferior como el superior son concordantes y netos. Rodados de amonitas de la Formación Córdoba indican edad Campaniano Inferior (Etayo, F., comunicación verbal, 2005 en Reyes *et al.* 2006).

### 5.2.2.Aspectos Estructurales

La composición lodosa de las unidades ejerce una influencia en la deformación de las rocas, debido a su comportamiento dúctil, generando plegamientos intensos y fallas poco definidas geomorfológicamente (Figura 4). El plegamiento es notorio a escala regional y local; regionalmente se presentan pliegues sinclinales amplios con cierres frecuentes y poco deformados. Los anticlinales que los separan no

están bien definidos y presentan cierres muy rápidos y apretados, el anticlinal de La Chapa – Borbur, es el único amplio y muy regional. A escala de afloramiento hay pliegues de poca amplitud (m) y generalmente asimétricos. En las zonas esmeraldíferas éste plegamiento es muy apretado y llegan a ser isoclinales y están relacionados con la mineralización.

Las fallas son inversas con movimientos transcurrentes importantes, usualmente no tienen una expresión morfológica definida y su cartografía debe hacerse teniendo un control bioestratigráfico. El movimiento combinado de las fallas (inverso y transcurrente), determina segmentos rectos, cuando es transcurrentes y segmentos sinuosos cuando el predominio es inverso; igualmente los pliegues en general son oblicuos a las fallas, lo que refuerza su carácter transcurrente.

Los planos de falla usualmente no están mineralizados y las brechas que normalmente se reconocen en las minas son de origen hidrotermal, pero se pueden confundir con las tectónicas cuando una falla esta afectando una zona mineralizada, en algunos casos repitiendo la secuencia. Por lo observado en campo las fallas son posteriores a la mineralización de esmeraldas, así coincidan con áreas mineralizadas.

- Fallas

Las fallas son mayoritariamente inversas de cabalgamiento con vergencia al occidente en dirección NE, algunas presentan segmentaciones o terminan en rampas laterales de dirección NW. A continuación se nombran algunas de las fallas regionales e intermedias presentes en el área:

- Falla de Zulia-Albania
- Falla del Río Minero
- Falla de Peñas Blancas
- Falla de San Martín
- Falla Tambrias
- Falla La Victoria
- Falla La Venta
- Sistema de fallas de La Salina

- Falla de Itoco
- Falla de Tobia
- Falla del Río Pata
- Falla de Caparrapí

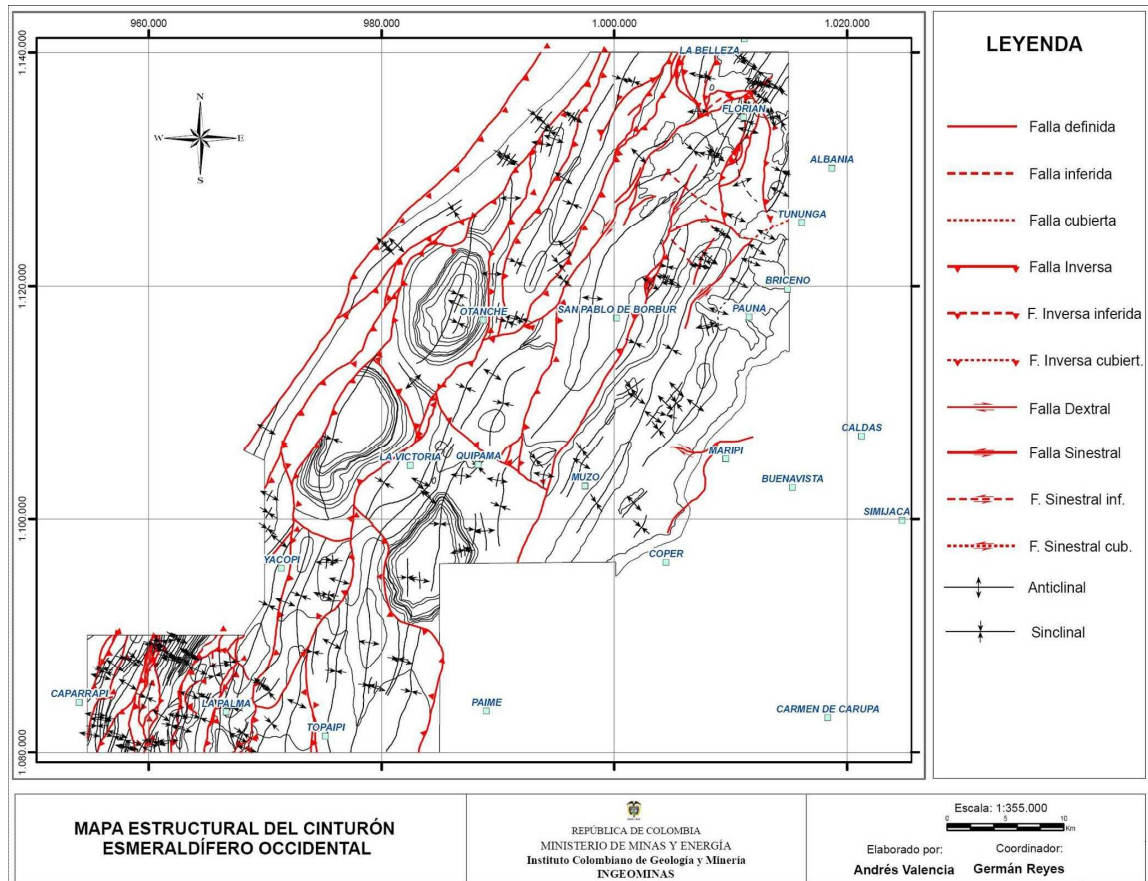


Figura 4. Mapa estructural generalizado del Cinturón Esmeraldífero Occidental. Tomado de Reyes (2006).

- Pliegues

Los pliegues del área están en tres escalas: una regional con sinclinales amplios con cierres periclinales y el anticlinal de la Chapa – Borbur; el segundo de escala intermedia con sinclinales y anticlinales angostos y poco extensos (hasta 10 Km.) y la tercera escala es de afloramiento, en donde son frecuentes tanto sinclinales como anticlinales, en ocasiones tan apretados que toman una apariencia isoclinal.

A continuación se nombran algunas estructuras regionales y otras de escala intermedia.

- Anticlinal de Portones
- Anticlinal de Florián
- Anticlinal de Gallineros
- Anticlinal de Pauna
- Anticlinal de Furatena
- Anticlinal Alto de La Chapa – Borbur
- Anticlinal de Coscuez
- Anticlinal de Nimaima-Guayabal
- Anticlinal de Otromundo
- Anticlinal de Ibama
- Anticlinal de La Glorieta
- Anticlinal de Yacopí
- Anticlinal de Hinche
- Anticlinal de La Osa
- Anticlinal de Terama
- Sinclinal de El Almendro
- Sinclinal de las Delicias
- Sinclinal de Furatena
- Sinclinal de La Belleza
- Sinclinal y Anticlinal de Muzo
- Sinclinal de Río Pescadero
- Sinclinal de Coscuez
- Sinclinal de Santa Bárbara
- Sinclinal de Otanche
- Sinclinal de Santa Helena
- Sinclinal de Guadualito
- Sinclinal de Topaipi
- Sinclinal de Yacopí Grande
- Sinclinal de Yacopí
- Sinclinal de La Palma
- Sinclinal de Churupaco
- Sinclinal del Alto de Ruedas
- Sinclinal de Caparrapí

## 6. RESULTADOS

### 6.1. CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA

Aunque dentro de los objetivos de éste trabajo de proyecto de grado no se contempla un estudio de caracterización mineralógica detallada de las rocas muestreadas, sí se realizaron análisis de identificación mineralógica, en aras de poder establecer algunas diferencias composicionales entre las distintas formaciones. Esto con el propósito de poder contar con un criterio mineralógico, que nos sirviera a manera de referente adicional (distinto a los parámetros de IC, Ro, etc., realizados en el marco de éste trabajo) para establecer posibles grados de madurez termal de las rocas a partir de los campos de estabilidad de los minerales neoformados.

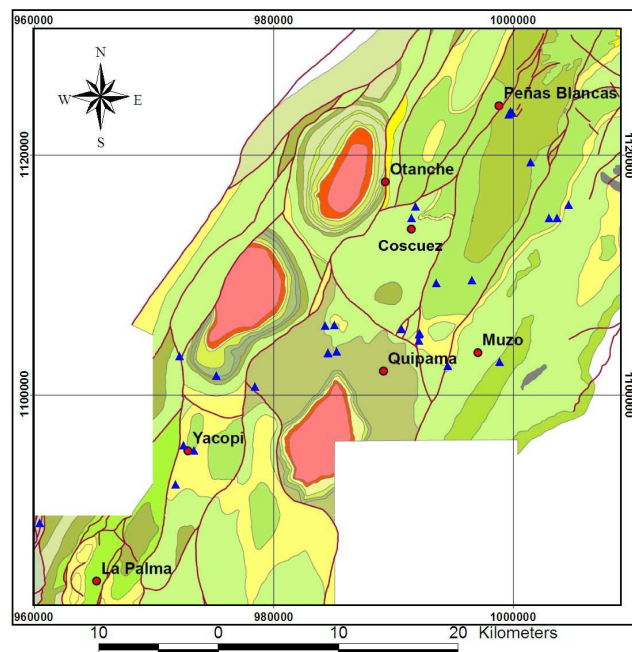


Figura 5. Ubicación de deltas muestreados y analizados con difracción de rayos X.

Se realizaron aproximadamente 270 análisis de difracción de rayos X en polvo desorientado con el fin de determinar la composición mineralógica de las muestras recolectadas (Ver Anexo 1), ya que debido a su granulometría tan fina, se hacía muy difícil su identificación macroscópica. La ubicación de los deltas muestreados aparece en la Figura 5.

Tabla 2. Tabla resumen de la composición mineralógica aproximada para cada una de las formaciones, basada en los resultados de difracción de rayos X (ver Anexo 1). **Minerales Principales:** presentes en la mayoría de las muestras y/o en gran proporción; **Minerales Intermedios:** presentes en menor proporción de muestras y/o menor cantidad; **Minerales Menores:** presentes en menor cantidad de muestras y/o en cantidades muy bajas, próximas al umbral de detección del equipo.

<b>FORMACIÓN</b>	<b>MINERALES PRINCIPALES</b>	<b>MINERALES INTERMEDIOS</b>	<b>MINERALES MENORES</b>
<b>La Frontera</b>	Calcita+Cuarzo	Albita+Illita+Pirita	Clorita+ <b>Pirofilita</b> + Esmectitas
<b>Hilò-Pacho</b>	Cuarzo+Illita+Albita+ Clorita	Calcita+Dolomita	
<b>Capotes</b>	Cuarzo+Illita	Albita+Calcita+ <b>Paragonita</b> +Clorita	Pirita+Dolomita+ Ankerita+Yeso+ <b>Pirofilita</b>
<b>Muzo</b>	Albita+Cuarzo	Calcita+Illita	Dolomita+Pirita+ Ankerita+Clorita+ Yeso+ <b>Paragonita</b> + <b>Cloritoide</b>
<b>Furatena</b>	Cuarzo+Illita	Clorita	<b>Paragonita</b> +Pirita
<b>Rosablanca</b>	Calcita+Cuarzo	Albita+Illita+ Dolomita	<b>Paragonita</b> +Pirita

Estos análisis permiten establecer, para cada formación, la composición mineralógica promedio que se resume en la Tabla 2. En esta tabla se observa que

la Formación Rosablanca presenta un predominio de calcita y cuarzo, y presencia aleatoria de albita, illita y dolomita en proporciones intermedias; en cantidades menores se encuentra paragonita y pirita. Para la Formación Furatena predomina el cuarzo y la illita, con un contenido subordinado de clorita y cantidades menores de pirita, yeso, calcita y paragonita. La Formación Muzo está compuesta principalmente de albita y cuarzo, con cantidades intermedias de calcita e illita y en menor proporción se presentan dolomita, pirita, ankerita, clorita, yeso, paragonita y cloritoide. En la Formación Capotes se presentan en mayor proporción cuarzo e illita, en cantidades intermedias albita, calcita, paragonita y clorita; y en menor proporción pirita, dolomita, ankerita yeso y pirofilita. En las rocas de las Formaciones Pacho e Hiló se presentan como minerales principales cuarzo, illita, albita y clorita, y en menor proporción calcita y dolomita. Para la formación La Frontera los minerales más abundantes son calcita y cuarzo, como constituyentes intermedios tenemos albita illita y pirita, y en cantidades menores clorita pirofilita y esmectitas.

Aunque actualmente se están desarrollando otras tesis de grado tendientes a estudiar más detalladamente esta información mineralógica y su significado, es importante resaltar, para el objetivo de este trabajo, la presencia de cloritoide en la Formación Muzo, el cual también se reportó en la Formación Capotes, cerca del municipio de Muzo, en muestras recolectadas en campañas posteriores. También resalta el contenido de paragonita en las Formaciones Muzo y Capotes, el cual es mayor en la segunda y mayor también que las unidades infrayacentes, pero ésta no aparece en las unidades superiores.

La mayor presencia de paragonita y la aparición de cloritoide en las unidades Muzo y Capotes, parecen estar indicando procesos de reacción mineral en condiciones de temperatura que se proyectan en el campo de un metamorfismo de muy bajo grado, lo cual no se evidencia en las Formaciones infrayacentes ni en las suprayacentes, las cuales presentan minerales de menor temperatura, estos

contrastes evidencian una anomalía termal desde el punto de vista de los campos de estabilidad de los minerales presentes en éstas Formaciones.

## 6.2. ANÁLISIS DE CRISTALINIDAD DE LA ILLITA (IC)

Una vez realizados los análisis mineralógicos de las muestras, se pudo comprobar la abundancia de illita en éstas. Por esta razón, se decidió estudiar su cristalinidad, en fracciones < 2 micras; para garantizar que éstas realmente correspondieran a illitas neoformadas y no a illitas heredadas.

El estudio de cristalinidad de las illitas se realizó, básicamente, con el propósito de estimar cualitativamente la máxima temperatura alcanzada por las rocas presentes en el área, al igual que para comparar las temperaturas alcanzadas en aquellas zonas con y sin aquellas alteraciones hidrotermales relacionadas genéticamente con la mineralización esmeraldífera (Mantilla *et al.*, 2006, informe preliminar). Asimismo, se realizó para poder comparar los valores de cristalinidad en las rocas de las diferentes Formaciones estudiadas.

Estudios previos sobre cristalinidad de illitas en el área de estudio son muy escasos, por no decir que ausentes. Durante la revisión bibliográfica solo se encontró un estudio sobre cristalinidad de illitas (Nolasco, 2004) realizado en rocas de la Formación Rosablanca y Paja, aflorantes en el sector Bolívar-Guavatá (Departamento de Santander). En éste estudio, se reportan ambientes de epizona y anquizona en áreas donde estas rocas del Cretácico Inferior desarrollan localmente planos de anisotropía tipo '*Slaty*' y '*Pencil Cleavage*'.

Las muestras tomadas para el presente estudio, corresponden a muestras de columnas, túneles y algunos afloramientos (Figuras 6 y 7).

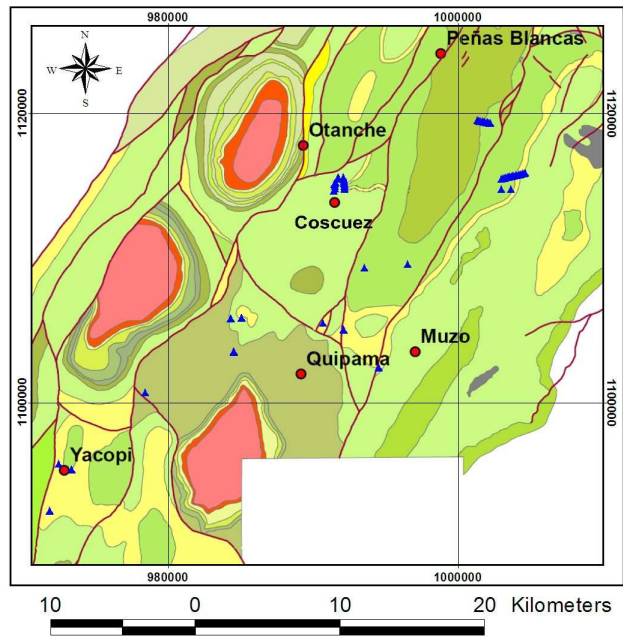


Figura 6. Mapa de localización general de todas las muestras analizadas para cristalinidad de la illita.

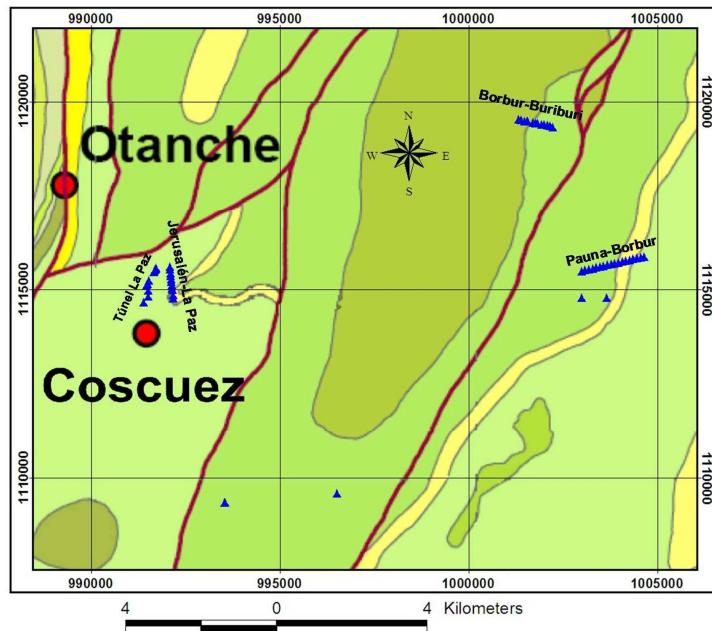


Figura 7. Detalle del esquema geológico de la Figura 15, donde se indica la localización de las columnas estratigráficas estudiadas y el Túnel la Paz.

Con el propósito de facilitar elementos de discusión que contribuyan a la tarea interpretativa de los datos de cristalinidad de la illita, previa a la presentación de los datos, se hace un breve resumen de los aspectos básicos relacionados con ésta técnica de estudio.

### 6.2.1. Consideraciones Previas

La estimación de la cristalinidad de las illitas (Kubler, 1967; en Moore y Reynolds 1997), se refiere a un parámetro que se calcula a partir de la relación que tiene la anchura a media altura del pico de la illita a  $10 \text{ \AA}$ . Este valor, es conocido igualmente como FWHM (Full Wide Height Médium), pero ésta medición directa solo es equivalente en muestras en que este pico no está superpuesto con otros como el de la paragonita y otros tipos de illitas.

Entre todos los índices propuestos, el índice de Kubler (1967), es el que ha tenido mayor aceptación. Por ésta razón, es el que se empleará en el presente estudio. En síntesis, éste índice se define como la anchura a media altura de la primera reflexión basal de la illita (Figura 8). En un principio esta anchura se expresó en mm, pero ahora se expresa en  $^{\circ}\Delta 2\theta$ . La disminución del valor numérico, indica aumento de cristalinidad.

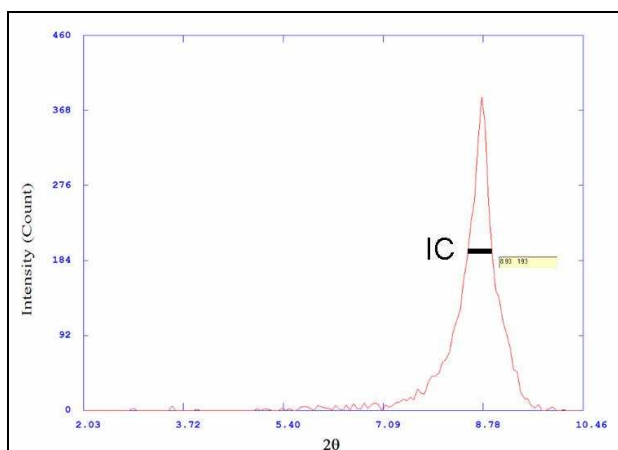


Figura 8. Medición de la cristalinidad de la illita, según Kubler (1967).

La cristalinidad de la illita es un método que permite estimar la evolución que sufren los filosilicatos durante los procesos de diagénesis y el metamorfismo de bajo grado (Kubler, 1967; Frey, 1987; Moore y Reynolds, 1997; Collo *et al.*, 2005; entre otros).

Según Frey (1987), los factores que afectan a la cristalinidad de la illita, son:

- La temperatura
- La presión de fluidos
- La deformación
- El tiempo
- La litología
- La composición química de las illitas
- La interferencia con otras reflexiones basales
- Los errores de medida
- Las condiciones experimentales

La calibración del equipo es un requisito necesario para realizar cualquier estudio de cristalinidad. Por esta razón se utilizan patrones que permiten establecer comparaciones con otras zonas de estudio. No obstante, en condiciones instrumentales de medición iguales, los resultados tendrían un carácter semicuantitativo y de todas maneras, constituye un factor importante para determinar y comparar condiciones de evolución termal entre sectores, tal como es el caso de los resultados aquí presentados.

Según Segonzac (1970), la evolución termal de las illitas, permite dividir zonas de madurez termal, tal como se ilustra en la Figura 9.

Las características de cada una de estas zonas, según este autor, se describen a continuación:

- Zona de Sedimentación: Las illitas (heredadas), son el producto de la degradación de biotitas preexistentes, sericitas, cloritas, etc.
- Diagénesis cercana: La illita se encuentra aún muy heterogénea, debido a procesos incipientes de adsorción interlaminar.
- Diagénesis tardía: Comienzan las arcillas a absorber el potasio favorecido por la compactación y expulsión de agua interlaminar con un incremento de la temperatura que produce un reordenamiento del red cristalina. La cristalinidad por lo tanto, se hace altamente uniforme independientemente de la litología.
- La Anquizona: se refiere a la zona intermedia entre el campo sedimentario y el metamórfico. Las illitas y las cloritas son los filosilicatos dominantes en la fracción arcilla.
- La Epizona: La illita ya empieza a transformarse gradualmente a micas, normalmente llamada sericita, con un amplio rango en su composición química dentro de la serie celadonita-fengita-moscovita y un contenido de sodio.

Zona Metapelítica	Profundidad (km) 25-33°C/km	Temperatura (°C)	Índice de Cristalinidad de la Illita ( $\Delta^{\circ}2\theta$ )
Diagénesis Temprana	3.5-4	100	1.0
Diagénesis Tardía	6.5-8	200	0.42
Anquizona	10-12	300	0.25
Epizona			

Figura 9. Clasificación de las zonas de evolución metapelítica con los rangos de profundidad, temperatura y de cristalinidades de illita (IC). Modificado de Collo *et al.*, 2005.

### 6.2.2. Resultados Obtenidos

El análisis de la cristalinidad de la illita (IC), se realizó en un total de 40 muestras de columnas y de túneles (Tabla 3), las cuales se escogieron del total de muestras analizadas previamente mediante difracción de rayos X (DRX). Esta selección se realizó para garantizar analizar solo aquellas muestras con los más altos contenidos de illita, y aquellas que tuviesen el mínimo de interferencia de otras reflexiones basales (Paragonita y otras arcillas). Por otro lado, se evitaron muestras con contenido alto de carbonatos, para evitar complicaciones durante la separación de la fracción  $<2\mu\text{m}$  (Ver Anexo 1).

Debido a que el número de las muestras analizadas es relativamente bajo, se decidió probar una correlación entre el IC en las muestras glicoladas y el IC en las muestras desorientadas; las muestras seleccionadas para probar ésta correlación fueron aquellas localizadas en las columnas estratigráficas ya mencionadas, lo cual arrojó un resultado que consideramos satisfactorio ( $R^2=0.784$ ), tal como se muestra en la Figura 10.

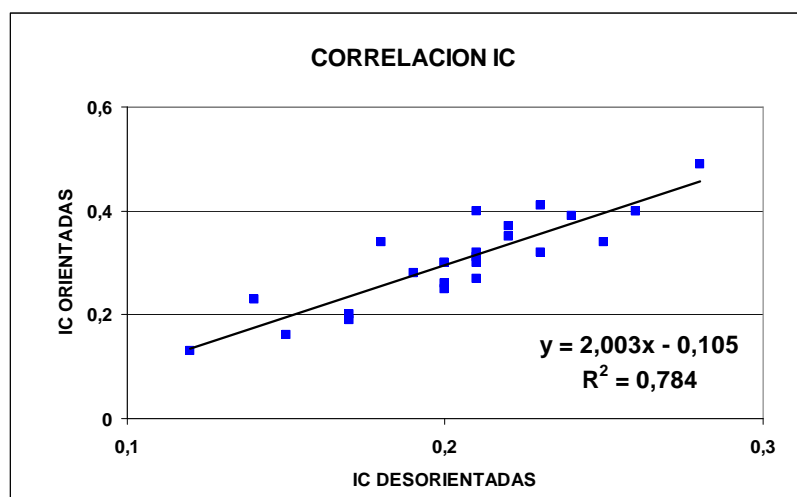


Figura 10. Correlación IC entre muestras glicoladas y desorientadas de las columnas levantadas por el INGEOMINAS.

Tabla 3. Muestras en que se midió la cristalinidad de la illita en los agregados <math><2\mu\text{m}</math> (IC EG) y agregados desorientados (IC DES).

FORMACION	EDAD	SECTOR MUESTREADO	MUESTRA	IC EG	IC DES
PACHO	ALBIANO MEDIO	Q. El Cedro (La Corona)	LME021004	0,16	
HILO		Vereda El Ramal	LME013001	0,18	
CAPOTES	APTIANO SUPERIOR	Sección Jerusalén-La Paz	BCMM001g	0,26	0,20
			BCMM027g	0,40	0,26
			BCMM048g	0,34	0,25
			BCMM055g	0,40	0,26
			BCMM061g	0,37	0,22
			BCMM076g	0,28	0,19
		Vía Yacopí-La Glorieta	LME015001	0,25	
		Sección Pauna-Borbur	PaJR061g	0,13	0,12
PaJR065g	0,20		0,17		
MUZO	HAUTERIVIANO-BARREMIANO	Vía Pauna-Borbur	LME002001	0,32	
		Vía Quípama-Muzo	LME010001	0,33	
			LME010004	0,16	
		Túnel La Paz (Coscuez)	LME030026	0,23	
			LME030028	0,34	
			LME030030	0,32	
			LME030032	0,27	
			LME030035	0,44	
		Sección Pauna-Borbur	PaJR056g	0,19	0,17
			PaJR058g	0,23	0,14
		FURATENA	VALANGINIANO	Sección Borbur-Q. Buriburi	BCMM125g
BCMM138g	0,40				0,21
BCMM151g	0,41				0,23
BCMM161g	0,30				0,20
BCMM203g	0,34				0,18
Cerro El Tigre	LME007001			0,20	
	LME007002			0,20	
Vía Quípama-Otanche	LME008001			0,28	
Sección Pauna-Borbur	PaJR005g			0,27	0,21
	PaJR010g			0,30	0,20
	PaJR015g			0,25	0,20
	PaJR017g			0,16	0,15
	PaJR025g			0,35	0,22
	PaJR031g			0,31	0,21
	PaJR037g	0,32	0,23		
PaJR048g	0,30	0,21			
PaJR052g	0,32	0,21			

Tabla 4. Resumen de las muestras para las cuales se predijo el IC por medio de la correlación planteada en la Figura 10.

FORMACION	EDAD	SECTOR MUESTREADO	MUESTRA	IC EG PREDICHO	IC DES
PACHO	ALBIANO MEDIO	Q. El Cedro (La Corona)	CJE019002	0,18	0,14
			LME020001	0,10	0,10
			LME021002	0,36	0,23
			LME021003	0,36	0,23
CAPOTES	APTIANO SUPERIOR	Sección Jerusalén-La Paz	BCMM022g	0,36	0,23
			BCMM034g	0,18	0,14
			BCMM039g	0,22	0,16
			BCMM068g	0,18	0,14
		Vía Quipama-Vereda San Luis	LME025002	0,10	0,10
			LME025003	0,14	0,12
MUZO	HAUTERIVIANO-BARREMIANO	Vía Quipama-Muzo	LME010002	0,22	0,16
		Mina La Glorieta (Yacopi)	LME014013	0,10	0,10
			LME014014	0,18	0,14
			LME014015	0,24	0,17
		Mina Chirripay (Yacopi)	LME016003	0,18	0,14
			LME016020	0,18	0,14
			LME016022	0,10	0,10
		Túnel 5 (Muzo)	LME016027	0,12	0,11
			LME022001	0,14	0,12
		Mina el Limonar (Quípama)	LME022021	0,21	0,16
			LME024002	0,36	0,23
			LME024008	0,23	0,17
		Túnel Las Pavas (Muzo)	LME024012	0,14	0,12
			LME027006	0,22	0,16
			LME027011	0,14	0,12
			LME027017	0,14	0,12
			LME027018	0,14	0,12
			LME027020	0,18	0,14
			LME027024	0,16	0,13
		Túnel La Paz (Coscuez)	LME030010	0,16	0,13
			LME030016	0,28	0,19
			LME030018	0,10	0,10
			LME030024	0,30	0,20
			LME030025V	0,24	0,17
			LME030034	0,36	0,23
		Sección Pauna-Borbur	LME030037	0,24	0,17
			PaJR053g	0,20	0,15
		FURATENA	VALANGINIANO	Sección Boubur-Buriburi	BCMM111g
BCMM134g	0,22				0,16
BCMM180g	0,28				0,19
BCMM189g	0,24				0,17
Vía Pauna-Borbur	LME003001			0,20	0,15
Sección Pauna-Borbur	PaJR020g			0,26	0,18
	PaJR040g			0,30	0,20
	PaJR042g	0,28	0,19		
ROSABLANCA	VALANGINIANO	Sección Borbur-Buriburi	BCMM086g	0,14	0,12
			BCMM090g	0,12	0,11
			BCMM099g	0,18	0,14
			BCMM105g	0,20	0,15
		Sección Pauna-Borbur	PaJR001g	0,12	0,11

Aplicando ésta correlación se obtuvo el IC de 50 muestras más de las columnas levantadas por el INGEOMINAS y de las recolectadas en túneles y afloramientos durante la primera campaña UIS-INGEOMINAS (Ver Tabla 4).

Considerando el total de los resultados (sin hacer aun discriminación entre formaciones, etc.), se puede resumir en términos generales que los valores de IC medidos directamente se encuentran en su mayoría en el rango entre 0.25-0.42°Δ2θ, aunque existen otras dos población de muestras que presenta valores en un rango <0.25°Δ2θ y >0.42 (2 muestras), respectivamente. Los valores de IC obtenidos por medio de la correlación planteada para las muestras de túneles y otros puntos de interés se encuentran en su mayoría en el rango <0.25°Δ2θ y en menor proporción en el rango 0.25-0.42°Δ2θ. Graficando el total de los datos obtenidos se observa que la mayoría se encuentra en el rango <0.25°Δ2θ (52 muestras), con una población menor en el rango 0.25-0.42°Δ2θ (36 muestras) y solo 2 muestras con IC>0.42°Δ2θ (Figura 11).

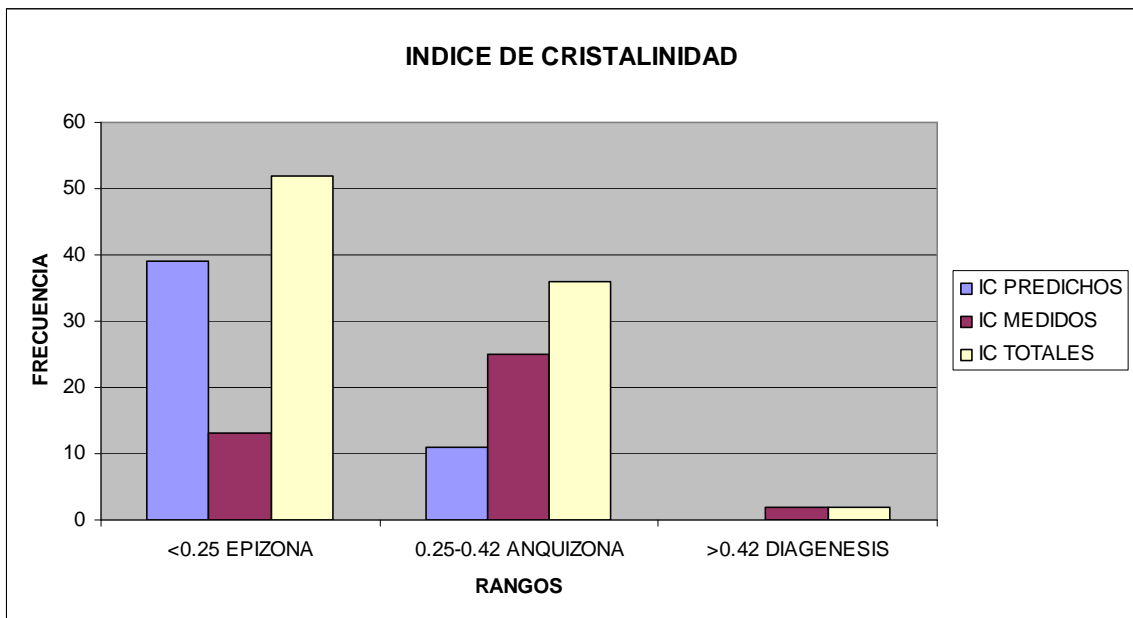


Figura 11. Histograma de distribución del IC en las muestras seleccionadas.

La distribución de los datos obtenidos por medición directa y por extrapolación (Figura 11) muestra tendencias diferentes entre los dos métodos cuya moda corresponde, en el caso de los datos medidos, a la anquizona y para los datos extrapolados corresponde a la epizona, lo cual se debe principalmente al hecho de que las muestras con el IC predicho corresponden a las zonas mineralizadas y con alteraciones, y no se debe a un error en la correlación planteada. Al combinar la totalidad de los datos obtenidos se observa que la distribución de los datos es unimodal asimétrica, cuya moda está en el rango de la epizona ( $IC < 0.25$ ).

Para poder observar mejor las relaciones entre las muestras de las diferentes edades, se discriminaron tomando en cuenta éste factor. Al graficar ésta distribución a manera de porcentaje de muestras en cada rango, dado que la cantidad de muestras de cada edad es diferente, se pueden observar ciertas anomalías en la distribución de las abundancias de las muestras de cada edad (Figura 12). Al realizar éste tipo de gráficas se esperaba que las muestras más antiguas presentaran una mayor abundancia en rangos equivalentes a los de mayor evolución termal. Al contrario de lo esperado para una evolución termal normal, las muestras más antiguas, que en este caso son de edad Valanginiano, presentan la mayoría de los datos en el rango de la anquizona, mientras que las demás muestras más jóvenes (Hauteriviano-Barremiano, Aptiano Superior y Albiano Medio) presentan una mayor abundancia en el rango de la epizona.

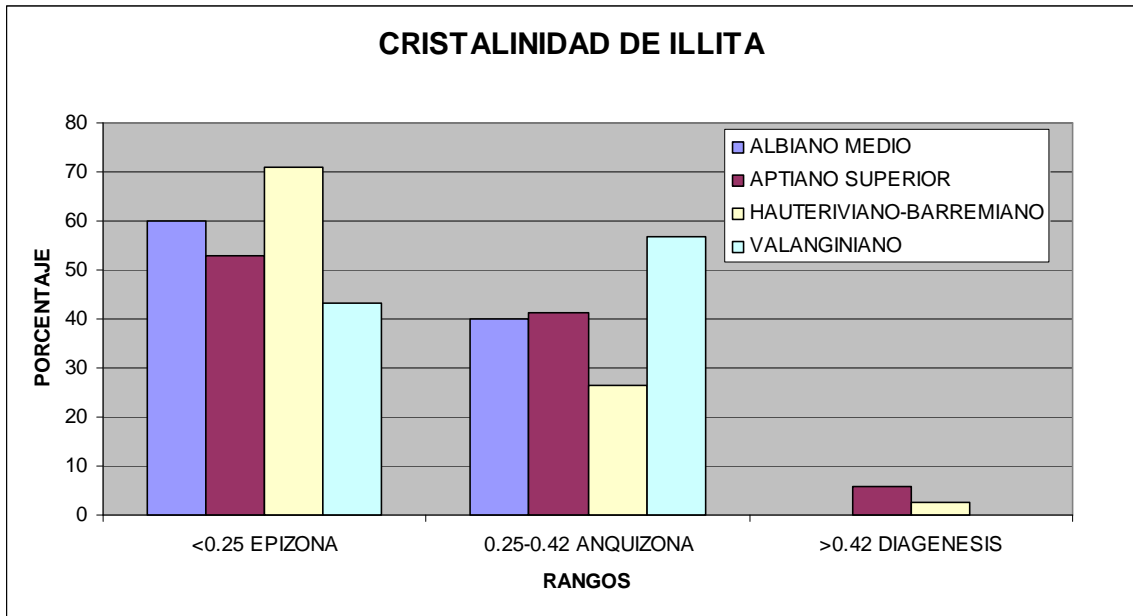


Figura 12. Distribución de los valores de IC discriminados según la edad de las rocas (Edad determinada según estudios bioestratigráficos realizados por el INGEOMINAS y documentados en Reyes *et al.*, 2006).

Proyectando los valores de cristalinidad obtenidos sobre el mapa geológico del área, (Figura 13) no se identifica una relación clara entre los valores de cristalinidad proyectados y una estructura geológica concreta, aunque es evidente que para poder observar este tipo de relaciones se requiere una mayor densidad de muestreo.

Sin embargo, para poder establecer alguna variación específica de los valores de cristalinidad, se analizaron más detalladamente sus valores con relación a las columnas muestreadas (variación en la vertical), y a lo largo del túnel La Paz (variación en la horizontal) (Figura 14).

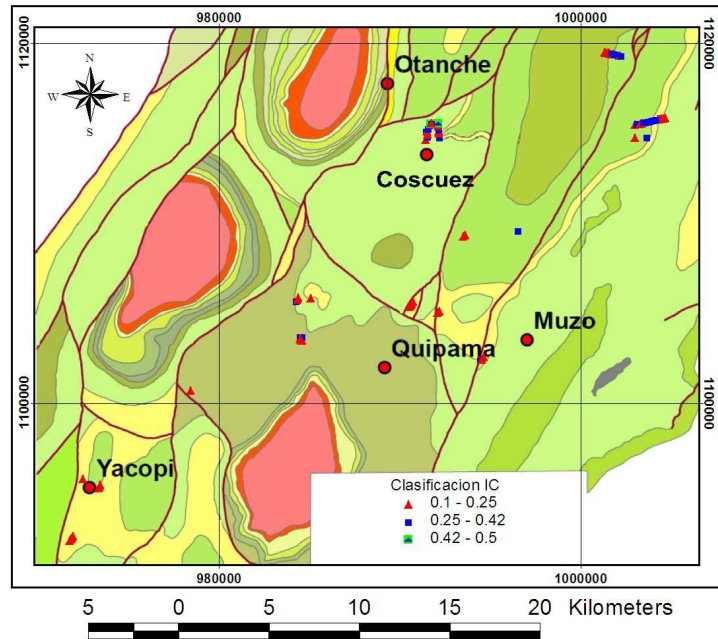


Figura 13. Ubicación de las muestras clasificadas según su rango de IC.

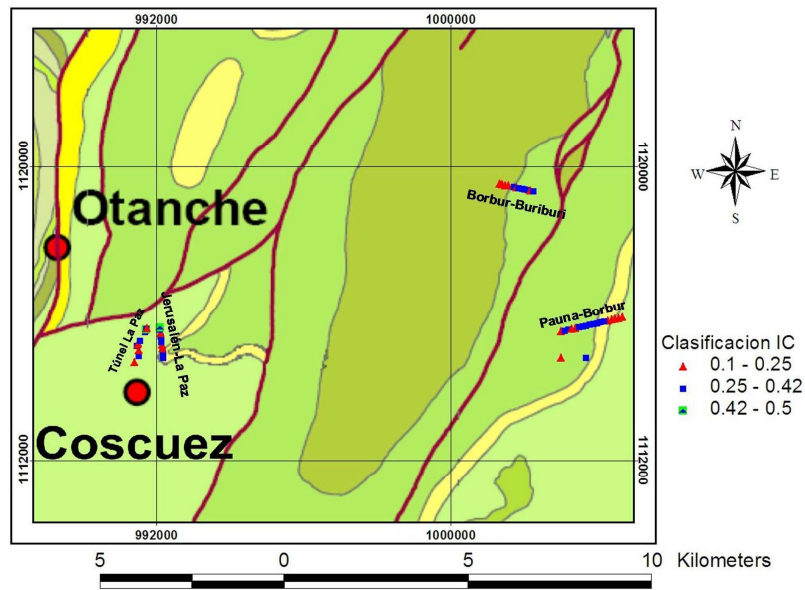


Figura 14. Detalle de la ubicación de las muestras clasificadas según su rango de IC en la zona de las columnas levantadas.

Con el propósito anteriormente mencionado, se asignaron los valores de IC a cada una de las muestras de cada columna estudiada. Con relación a la columna de Pauna-Borbur (Figura 15), el perfil de IC muestra un comportamiento anómalo, ya que presenta deflexiones inversas a lo esperado, debido a que a medida que se asciende estratigráficamente este perfil debería desplazarse hacia valores de IC mayores, pero en esta columna el perfil presenta deflexiones fuertes hacia valores de IC menores, ubicados en la parte baja de la Formación Furatena, en la base de la Formación Muzo y de nuevo en la base de la Formación Capotes.

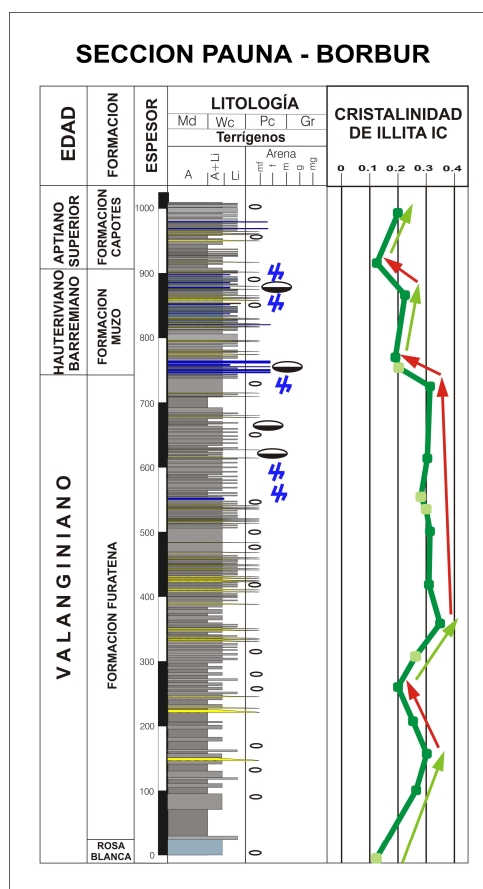


Figura 15. Sección Pauna-Borbur donde se observan las inversiones (flechas rojas) en el perfil de IC, en partes intermedias del Valanginiano (Formación Furatena), en la base del Hauteriviano-Barremiano (Formación Muzo) y de nuevo en la base del Aptiano Superior (Formación Capotes).

El perfil obtenido para la columna Borbur-Q. Buriburi (Figura 16), que representa el segmento superior de la Formación Rosa Blanca y la Formación Furatena, también presenta un comportamiento anómalo con deflexiones inversas hacia valores de IC más bajos cerca de la base de Furatena y de nuevo en el segmento superior de la misma Formación.

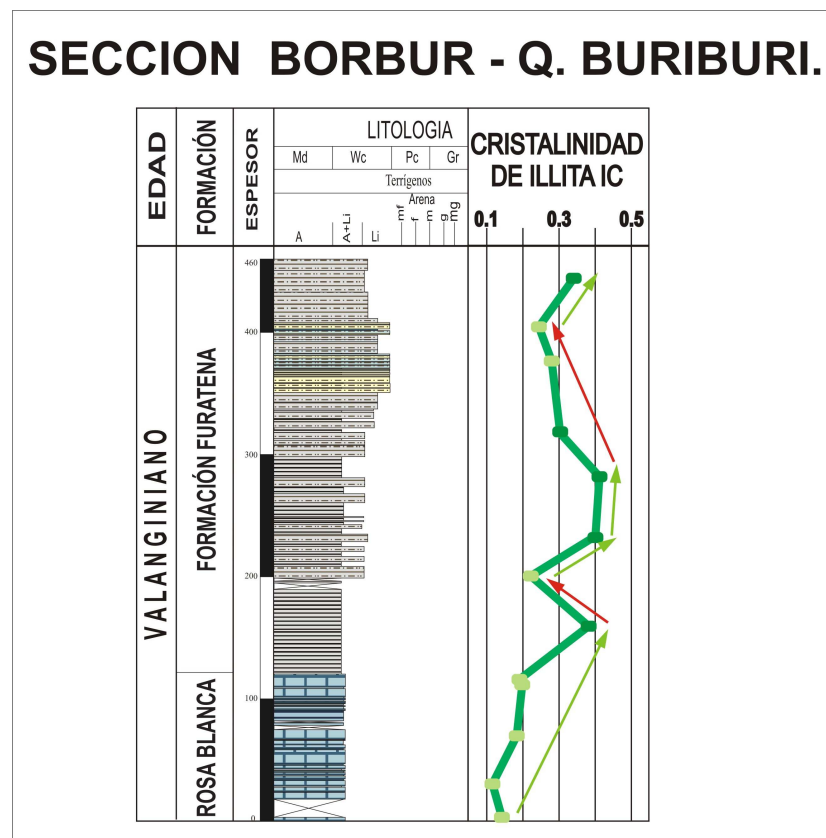


Figura 16. Sección Borbur-Q. Buriburi donde se observan las inversiones (flechas rojas) en el perfil de IC, en la parte baja y superior de la Formación Furatena.

En el caso de la columna Jerusalén-La Paz (Figura 17), que abarca la Formación Capotes, presenta en su perfil dos deflexiones inversas, la primera cerca del medio de la columna y la segunda cerca del tercio superior de la misma, las cuales

son bastante pronunciadas, ya que pasan de valores próximos a  $0.40^{\circ}\Delta 2\theta$  hasta valores de  $0.20^{\circ}\Delta 2\theta$ .

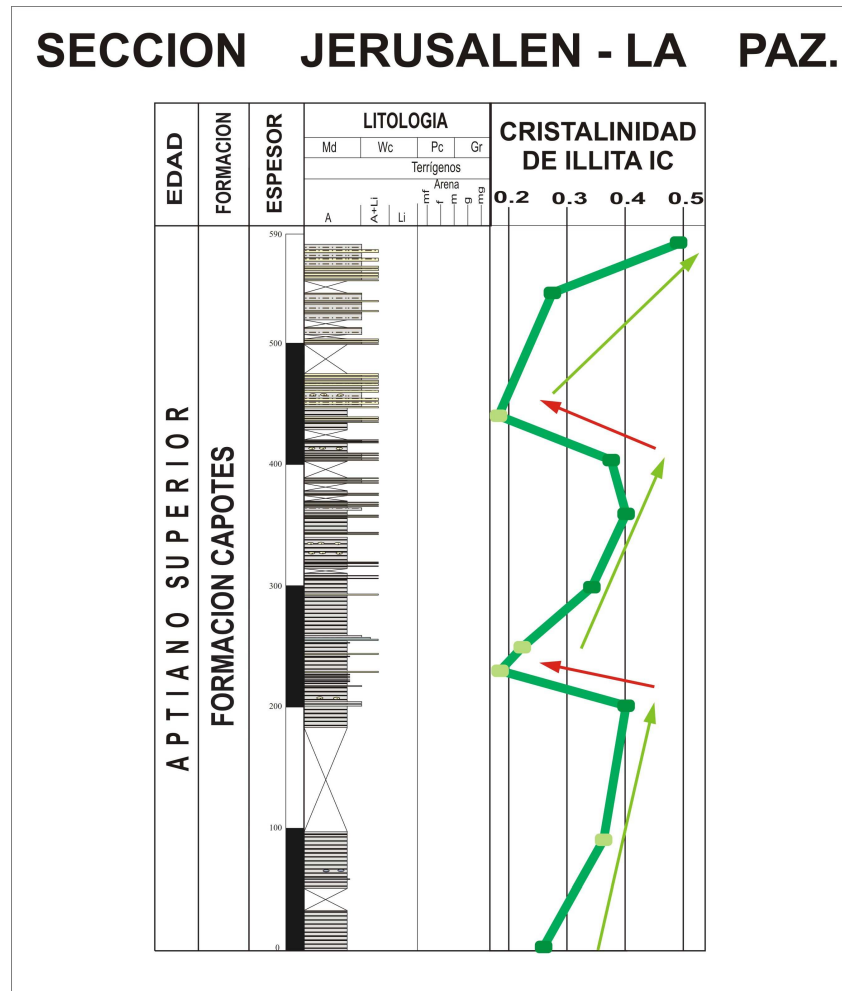


Figura 17. Sección Borbur-Q. Buriburi donde se observan las inversiones (flechas rojas) en el perfil de IC, en la parte media y superior de la Formación Capotes.

Al comparar los perfiles de IC obtenidos para las tres columnas que se estudiaron (Figura 18), se puede observar que la sección de Pauna-Borbur presenta valores extremos de IC menores a los que aparecen en la sección Borbur-Q. Buriburi para el mismo intervalo. La correlación entre los perfiles de IC de estas dos secciones (Pauna-Borbur y Borbur-Buriburi) es bastante buena hacia la parte baja, ya que los



y otras más gruesas (marcas naranjas en la Figura 18). Otras anomalías parecen estar relacionadas a la aparición de litologías calcáreas (marcas azules en la Figura 18), tales como calizas, limolitas y arcillolitas calcáreas.

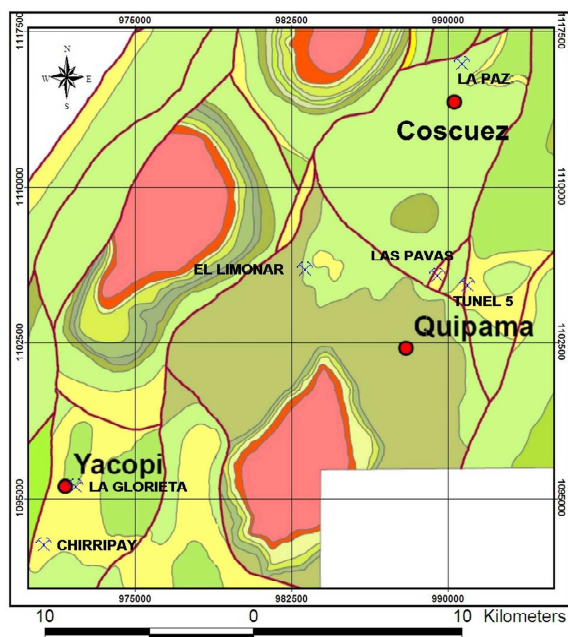


Figura 19. Mapa de ubicación de los túneles con análisis de cristalinidad de illitas.

Aunque los resultados obtenidos de IC para las muestras de túneles y de algunos afloramientos estudiados, serán tratados más detalladamente en otros trabajos de tesis de pregrado que se desarrollan igualmente en el marco del convenio INGEOMINAS-UIS, a continuación se hace una breve alusión a éstos. Por ejemplo, según los resultados de IC en las muestras tomadas a lo largo de los túneles La Glorieta y Chirripay en Yacopí; Túnel 5 (Puerto Arturo) y Las Pavas en Muzo; La Paz en Coscuez y El Limonar en Quípama (ver Figura 19 para ubicación de estos túneles); las mayores cristalinidades de las illitas se presentan en aquellas muestras cercanas a materiales de origen hidrotermal, tales como albitización, sectores con gran profusión de venas y venillas y zonas con deformaciones de tipo cizalla y brechificaciones también albitizadas. En los

sectores con éstas características, los valores de IC, varían en un rango de 0.10 a  $0.18^\circ\Delta 2\theta$ , contrastando de manera considerable con los valores de IC de sectores adyacentes donde no se presentan las alteraciones antes mencionadas. Estas últimas con valores en el rango de 0.21 a  $0.44^\circ\Delta 2\theta$ .

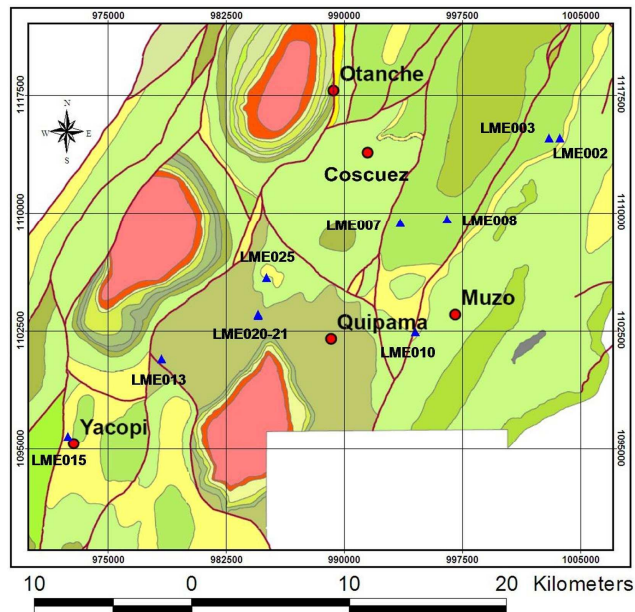


Figura 20. Mapa de ubicación de afloramientos de interés con análisis de cristalinidad de illitas.

Entre las muestras de afloramientos recolectadas, resaltan aquellos localizados alrededor del intrusivo de La Corona (punto LME020-021 en la Figura 20), las cuales presenta valores de IC bastante bajos ( $0.10-0.18^\circ\Delta 2\theta$ ), pero también otros muy altos ( $0.36^\circ\Delta 2\theta$ ), especialmente cuanto más distantes se localice la muestra con relación al cuerpo ígneo.

Por otro lado, analizando muestras de afloramientos recolectadas en la vía Quípama-Muzo (punto LME010 en la Figura 20), pertenecientes a la Formación

Muzo, se observa que los valores de IC varían ampliamente en el rango 0.16-0.33°Δ2θ.

En la vía Quípama-Vereda San Luis, al este de la mina El Limonar (punto LME025 en la Figura 20) los valores de IC para rocas de la Formación Capotes son de 0.10 y 0.14°Δ2θ, los cuales caen en el campo de la epizona y es de especial interés el hecho de que en esta zona se encontraron nódulos calcáreos con presencia de pirobitumen, el cual se forma a altas temperaturas durante un estado avanzado de madurez termal de la roca.

El conjunto de los datos de cristalinidad, indican la existencia de una anomalía termal dado que las rocas más jóvenes poseen una mayor madurez termal, pero en el caso de las muestras del Albiano Medio, esto no se puede asegurar como un efecto regional, ya que estas muestras se encuentran en los alrededores del intrusivo de La Corona, el cual pudo incrementar la madurez de las rocas próximas a este, aunque en realidad este efecto no está muy extendido, como se puede observar por la presencia de otras muestras muy cercanas y que se encuentran en el rango de la anquizona. Para el caso de las rocas del Hauteriviano-Barremiano y del Aptiano Superior, esta anomalía parece ser de carácter más regional; en las rocas del Aptiano Superior la anomalía está claramente identificada y respaldada además por la presencia de minerales de mayor temperatura como el cloritoide en muestras recolectadas dentro de éste proyecto y reportado anteriormente (Scheibe, 1916 en Maya *et al.*, 2004).

Estos contrastes litológicos y litologías específicas pueden haber servido como canales permeables que favorecen en mayor medida la circulación de fluidos en un evento hidrotermal.

### 6.3. GEOQUÍMICA ORGÁNICA

Los análisis geoquímicos de la materia orgánica en las rocas estudiadas, se realizaron con el propósito de establecer su grado de madurez termal, y por otro lado para tratar de identificar su tipología. La localización de las muestras seleccionadas para estos análisis (COT y pirólisis Rock Eval), tanto de afloramientos puntuales como de las columnas estratigráficas, se muestran en la Figuras 21 y 22. Las muestras seleccionadas se analizaron por los métodos LECO TOC y pirólisis Rock Eval, las cuales se tomaron de las columnas estratigráficas, túneles y afloramientos de interés, además se seleccionaron muestras de las columnas para análisis de Ro, las cuales fueron las que presentaron mayor contenido de COT.

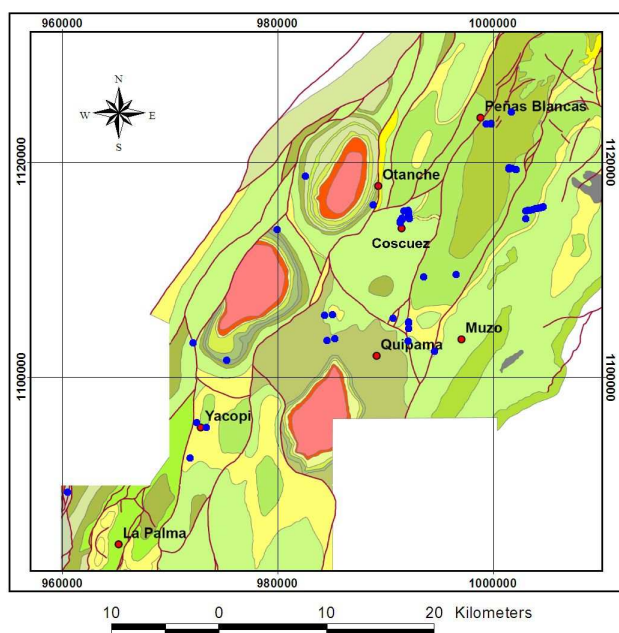


Figura 21. Mapa de ubicación de las muestras analizadas por pirólisis Rock Eval y LECO TOC

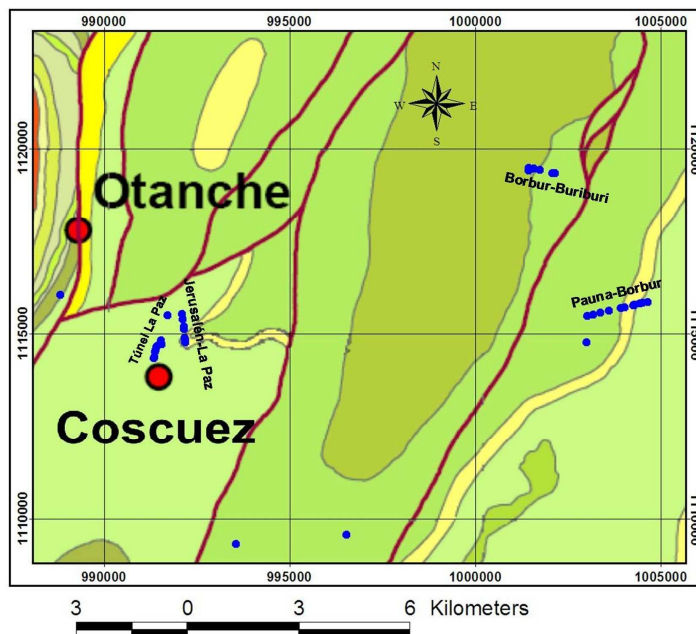


Figura 22. Detalle del mapa de ubicación, donde se muestran las columnas levantadas por el INGEOMINAS y el túnel La Paz.

Con el propósito de facilitar elementos de discusión que contribuyan a la tarea interpretativa de los datos de geoquímica orgánica, previa a la presentación de los resultados, se hace un breve resumen de los aspectos básicos relacionados con estos estudios.

### 6.3.1. Consideraciones Previas

- Carbono Orgánico Total (COT)

El análisis del COT es utilizado en la industria del petróleo como una medida de la cantidad de materia orgánica presente en la roca fuente, lo cual puede dar algunos indicios de la potencialidad de la roca para generar hidrocarburos. Pero ésta información no es suficiente por si sola, además de una buena cantidad de materia orgánica, ésta debe ser del tipo adecuado para la generación de hidrocarburos y

debe haber alcanzado la madurez suficiente para generarlos y expulsarlos. Para constatar estas condiciones básicas, es necesario realizar otro tipo de análisis como pirólisis Rock Eval y Ro.

El COT consiste de tres fracciones que lo componen (Espitalié *et al.*, 1984 en Merrill 1991): el carbono en la materia orgánica extraíble (carbono de MOE), el carbono convertible y una fracción de carbono residual (Figura 23). Los últimos dos son incorporados en el kerógeno del sedimento.

El carbono MOE esta compuesto del carbono contenido en el petróleo y el gas ya formado en la roca, este es derivado de los productos del craqueo térmico del kerógeno y los marcadores biológicos incorporados directamente. El carbono MOE generalmente es una pequeña fracción del COT, normalmente menos del 1% del mismo; sin embargo, en rocas reservorio, este porcentaje puede ser mucho mayor (Merrill, 1991).

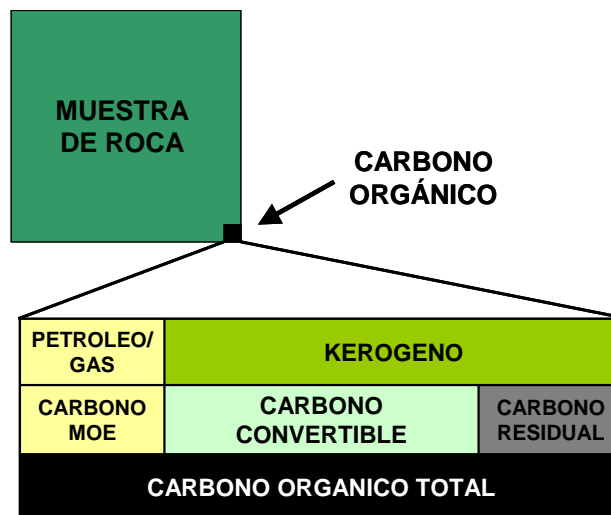


Figura 23. Modelo de distribución del carbono orgánico total en una muestra de roca. Tomado de Merrill (1991).

El segundo componente del COT es el carbono convertible contenido en el kerógeno. El kerógeno es la estructura compleja en la que se convierte la materia orgánica originalmente depositada a través de la diagénesis (Tissot y Welte, 1984; Hunt, 1979 en Merrill, 1991). El carbono convertible representa el potencial remanente de una roca para generar petróleo ó gas.

El componente de carbono residual también es parte del kerógeno y representa el carbono orgánico presente en una forma en la que no tiene potencial de generar petróleo ó gas debido a su estructura química y su composición. Esto es debido a que su estructura química altamente condensada tiene muy poco hidrógeno por unidad de carbono.

Las proporciones de los tres componentes del COT antes mencionados dependen también del tipo de kerógeno, ya que el kerógeno tipo I (generador de petróleo) tiene una mayor proporción de carbono MOE y convertible que el kerógeno tipo II, y este a su vez tiene una mayor proporción de estos componentes que el tipo III (generador de gas), siendo este último el que presenta el mayor contenido de carbono residual.

El valor medido de COT se ve afectado por el estado de madurez termal de la roca, por lo cual, como ya se mencionó, se hace indispensable el conocimiento de parámetros de este tipo. Con el aumento de la madurez termal de la roca, el contenido de carbono MOE aumenta mientras que el carbono convertible disminuye, a su vez el valor de COT se reduce al iniciar la expulsión de hidrocarburos de la roca, hasta el momento en que el carbono convertible y el MOE se agotan y solo queda el carbono residual (Figura 24), el cual es aproximadamente el valor que se obtiene en rocas con un avanzado estado de madurez termal.

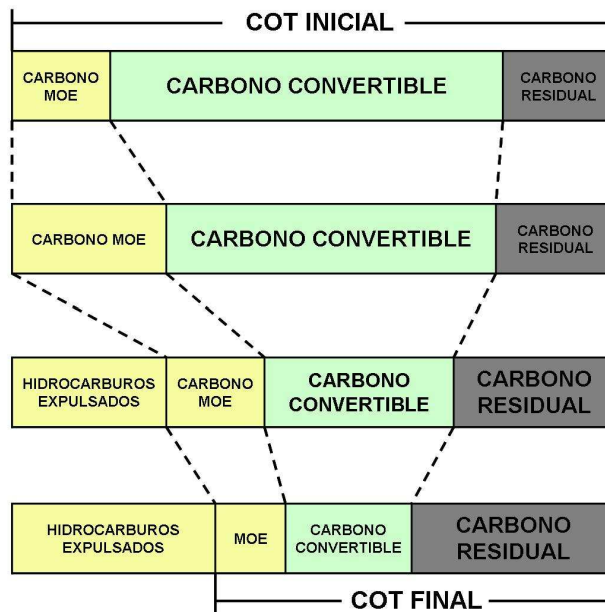


Figura 24. Efecto de la madurez termal en un volumen dado de carbono orgánico. Se observa la disminución del valor de COT y el aumento del carbono residual a medida que aumenta la madurez termal. Tomado y modificado de Merrill (1991).

- Pirolisis Rock Eval

El método de pirolisis Rock Eval se desarrolló con el fin de caracterizar el tipo de materia orgánica presente en una roca o sedimento, para calcular su potencial de generación de hidrocarburos remanente y para evaluar la evolución termal que ha experimentado la roca.

A través de este método se pueden diferenciar los diferentes componentes del COT que se mencionaron anteriormente, los cuales se ven reflejados en las mediciones obtenidas durante el proceso. Estos datos fueron mencionados brevemente en el capítulo de metodología, pero a continuación se dará una explicación más amplia:

- Pico S1: este pico corresponde a los hidrocarburos libres presentes en la roca, los cuales generalmente están en el rango de C<sub>1</sub> al C<sub>33</sub>. En rocas sedimentarias inmaduras, el pico S1 es menor que la fracción extraíble (carbono MOE), mientras que en rocas con avanzado estado de madurez, este pico se compara con la fracción extraíble del COT, la cual es comparable con el pico S2 (Bordenave, 1993).
- Pico S2: los hidrocarburos generados durante el craqueo térmico del kerógeno son los que forman el pico S2, a medida que la roca ha alcanzado un mayor estado de madurez, este pico se va disminuyendo, debido a que el kerógeno se empobrece en hidrógeno, por lo tanto, el pico S2 nos da una estimación razonable del potencial de generación de hidrocarburos remanente en la roca, desde su estado actual de madurez termal hasta alcanzar un estado subgrafítico, en el cual no hay más hidrógeno disponible. El valor del pico S2 depende del tipo de materia orgánica, el COT de la roca y la evolución termal que ha sufrido la roca (Bordenave, 1993).
- Pico S3: el pico S3 registra los productos de descomposición de los compuestos que contienen oxígeno, tales como hidrocarburos, agua y una mezcla de CO y CO<sub>2</sub>, este pico es registrado por debajo de 400 °C debido al error que puede introducir la descomposición temprana de algunos carbonatos como la siderita y otras especies pobremente cristalizadas. La calcita y la dolomita se descomponen alrededor de los 600 °C. El pico S3 depende del tipo de materia orgánica y de su madurez termal, este disminuye a medida que aumenta su madurez (Bordenave, 1993).
- T<sub>max</sub>: esta temperatura es la registrada en el momento en que el pico S2 alcanza su máximo, la cual varía dependiendo de la madurez termal de la materia orgánica (Tissot y Espitalié, 1976 en Bordenave, 1993), aumentando a medida que la madurez de la roca aumenta. La clasificación del grado de madurez de la roca,

con respecto a la ventana de generación del petróleo, varía dependiendo del tipo de kerógeno presente en la roca, dado que cada uno reacciona con diferente velocidad y a una temperatura diferente, siendo el  $T_{max}$  menor para el tipo IIs, seguido del tipo II y el III; el tipo I tiene un rango más estrecho y un  $T_{max}$  de inicio de ventana mayor a los anteriores, debido a esto, este parámetro no es un buen indicador de madurez para el tipo I, pero si es bueno para los tipos II y III. El valor de  $T_{max}$  se ve disminuido cuando la muestra presenta impregnación de hidrocarburos migrados de otras rocas; también se reduce cuando se presenta pirobitumen en la materia orgánica, ya que este es un residuo empobrecido en hidrógeno por generación de gas.

Otros parámetros útiles obtenidos de los datos de pirolisis y COT combinados (Bordenave, 1993) son los siguientes:

- Índice de hidrógeno (IH): este es definido como la relación entre el pico S2 expresado en mg de HC/g de roca y el COT expresado por peso de roca.
- Índice de oxígeno (IO): este es definido como la relación entre el pico S3 expresado en mg de  $CO_2$ /g de roca y el COT expresado por peso de roca.
- Índice de producción o de generación (IP o IG): este índice se expresa como  $S1 / (S1+S2)$ . Este índice se aumenta debido principalmente al incremento del craqueo del kerógeno y en menor proporción debido a la vaporización termal y al craqueo de los asfaltenos que causa que el pico S2 se transforme progresivamente en el S1.
  
- Reflectancia de la Vitrinita ( $R_o$ )

La vitrinita es un maceral compuesto principalmente de materiales gelificados (o coloides sólidos) derivados principalmente de tejidos botánicos. La vitrinita se encuentra en gran abundancia en sedimentos de origen terrestre, tales como

carbones y shales deltaicos (Bordenave, 1993). Los petrógrafos de carbón han usado la reflectancia de la vitrinita por muchos años para estudiar la carbonización en detalle. El tipo de carbón es determinado por la reflectancia máxima media de la vitrinita. Se ha demostrado que la reflectancia de la vitrinita ( $R_o$ ) es un buen indicador de la madurez termal de la roca y es ampliamente usado en la industria del petróleo para la evaluación de los kerógenos (Merrill, 1991). Su mayor inconveniente es la no presencia de este maceral en la roca que se estudia o la confusión con otros macerales como inertinita o vitrinitas retrabajadas y oxidadas, que pueden elevar los valores obtenidos, de allí la importancia de la habilidad del petrógrafo en la correcta identificación de los macerales.

Los valores de  $R_o$  se deben graficar contra la profundidad para obtener los perfiles de  $R_o$ , estos perfiles son de gran utilidad en el estudio de problemas geológicos tales como la historia termal de una cuenca. Perfiles comunes de  $R_o$  en secciones de gran espesor pueden reflejar diferentes procesos geológicos a escala de la cuenca (Figura 25), los cuales incluyen:

- Sedimentación continua (gradientes geotermales constantes).
- Actividad tectónica, sedimentación interrumpida y eventos erosionales (perfiles desviados).
- Eventos termales localizados (fuertes anomalías positivas).
- Fallas de cabalgamiento (repetición de secuencias).

Estos perfiles también pueden ser construidos utilizando como referencia otros parámetros de madurez tales como  $T_{max}$ , o cristalinidades de illita como se realizó en este trabajo.

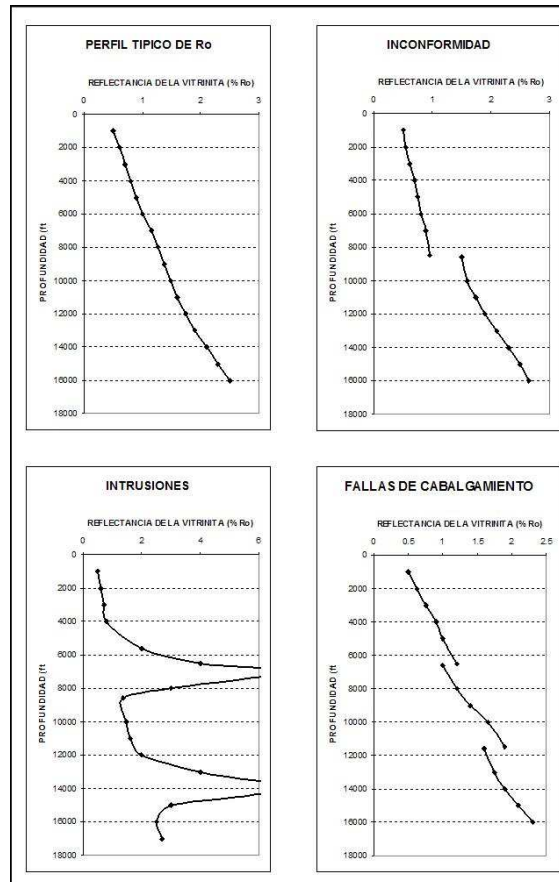


Figura 25. Perfiles de  $R_o$  representativos de diferentes procesos geológicos encontrados en secuencias sedimentarias. Tomado y modificado de Merrill (1991).

### 6.3.2. Resultados obtenidos

#### 6.3.2.1. Carbono Orgánico Total (COT)

Se seleccionaron 95 muestras distribuidas en el área de estudio (Ver Tabla 5, Figuras 21 y 22 para ubicación; y Anexos 2 y 3), escogidas de las columnas y de los túneles muestreados

En términos generales, los datos obtenidos muestran valores entre 0.44 y 10.91 % con una media de 2.54 % y una mediana o segundo cuartil de 2.44 %.

En la Figura 26 se muestra la cantidad de muestras con valores de COT en los rangos escogidos, la distribución se muestra claramente unimodal asimétrica con la moda entre 2 y 5 % y una segunda población también abundante entre 1 y 2 %.

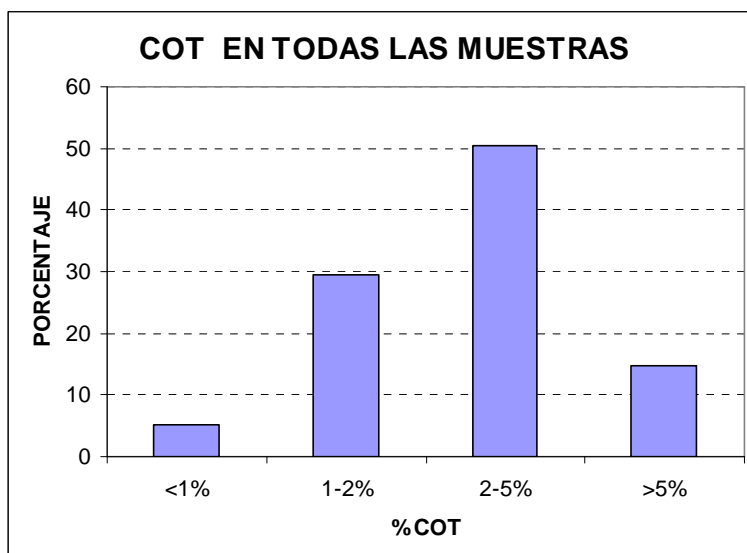


Figura 26 Histograma de distribución de COT en las muestras analizadas.

#### 6.3.2.2. Parámetros Obtenidos por Pirólisis Rock Eval

Como se dijo anteriormente, las muestras seleccionadas para análisis de LECO TOC también fueron analizadas con pirólisis Rock Eval (Ver Figuras 21 y 22 para ubicación; y Anexos 2 y 3) con el fin de caracterizar de manera más precisa el tipo de materia orgánica y su estado de madurez, debido a su relativamente bajo costo y fácil realización (Ver resultados analíticos en Anexo 3).

Los parámetros geoquímicos obtenidos fueron los siguientes: Tmax, IH, IO, IP, S1, S2, S3. En términos generales, estos valores muestran tendencias de rangos unimodales con tendencias asimétricas hacia valores bajos, con excepción del IP, que presenta una tendencia hacia valores altos (Figuras 27, 28, 29 y 30).

Tabla 5. Relación estratigráfica de las muestras analizadas mediante COT (ver información de detalle en Anexo 3).

FORMACION	EDAD	LOCALIZACIÓN	NUMERO DE MUESTRAS	LITOLOGIA
CORDOBA	CAMPANIANO	Sección Otanche-El Encanto	1	CALIZAS
GRUPO OLINI	SANTONIANO-CAMPANIANO		2	ARCILLOLITAS Y LODOLITAS CALCAREAS
UNIDAD INDENOMINADA	Coniaciano		1	ARCILLOLITAS
LA FRONTERA	TURONIANO-CONIACIANO	Vereda yasol (La Victoria)	1	ARCILLOLITAS Y LODOLITAS CALCAREAS
LA FRONTERA- ND		Mina 'la Páta'	1	ARCILLOLITAS Y ARCILLOLITAS CALCAREAS
OTANCHE	ALBIANO MEDIO	Tunel 'El Encanto' (Otanche)	2	LODOLITAS CALCAREAS Y LIMOLITAS
PACHO		Q. El Cedro (La Corona, La Victoria)	1	
		Vía Quípama-La Victoria	1	
CAPOTES	APTIANO SUPERIOR	Sección Jerusalén-LaPaz	7	ARCILLOLITAS, LIMOLITAS, Y LODOLITAS CALCAREAS
		Vía Yacopi-'La Glorieta'.	1	
		Vía Quípama-Yacopí	1	
		Vía Quípama-Vereda San Luis	1	
		Q, Tambriás, Vereda Centro, Otanche	1	
		Seccion Pauna-Borbur	2	
MUZO	HAUTERIVIANO-BARREMIANO	Túnel 'Las Águilas'	5	LODOLITAS Y LIMOLITAS CALCAREAS, ARCILLOLITAS Y MICRITAS; ALGUNAS PRESENTAN ALBITIZACION Y ALTERACIONES HIDROTERMALES
		Vía Quípama-Muzo	1	
		Tunel 'La Glorieta' (Yacopí)	4	
		Tunel 'Chirripay' (Yacopí)	6	
		Puerto Arturo, 'Túnel 5' (Muzo)	5	
		Cerca a 'Túnel 5' (Muzo)	1	
		Túnel El Limonar (Quípama)	7	
		Túnel Las Pavas (Muzo)	4	
		Vía Puerto Arturo-Repollal	1	
		Tunel 'la Paz' (Coscuez)	8	
		Nivel 3' (Peña Coscuez)	3	
		Vereda 'Sabripa Viejo' (Muzo)	1	
		Seccion Pauna-Borbur	4	
FURATENA	VALANGINIANO (K4)	Sección Borbur-Q. Buriburi	4	LODOLITAS CALCAREAS Y LODOLITAS
		Vía Pauna-Borbur	1	
		Vía Borbur-Q. Buriburi	1	
		Cerro 'El Tigre' (vía Quípama-Otanche)	1	
		Vía Quípama-Otanche	1	
		Sección Pauna-Borbur	5	
ROSABLANCA	VALANGINIANO (K3)	Sección Borbur-Q. Buriburi	2	WACKSTONE Y PACKSTONE CALCAREO
		Tunel 'Pedro Nel' (Peñas Blancas)	2	
		Túnel '00'(Peñas Blancas)	1	
		Tunel 'La Polonia' (Peñas Blancas)	1	
		Tunel 'El Trapiche' (Peñas Blancas)	2	
		Seccion Pauna-Borbur	1	

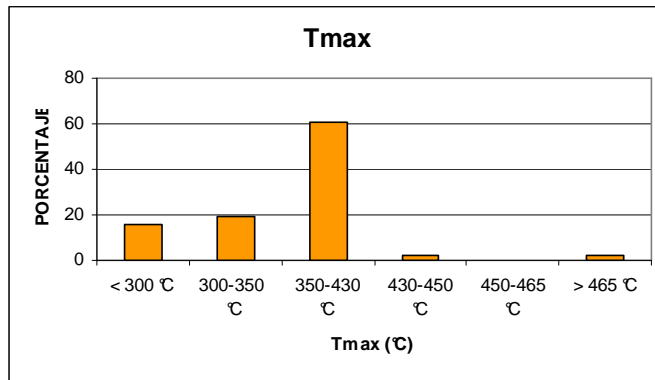


Figura 27. Histograma de distribución de los valores de Tmax de todas las muestras analizadas.

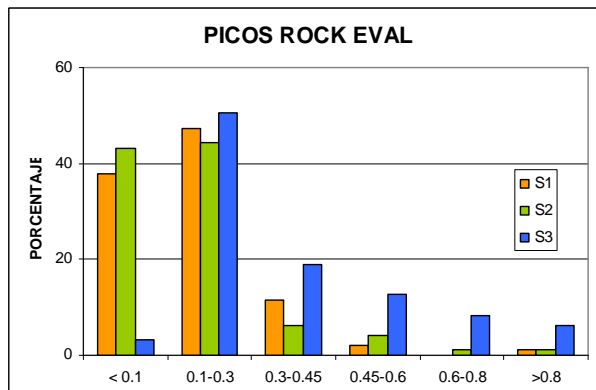


Figura 28. Histograma de distribución de los valores de los picos S1, S2 y S3 de todas las muestras analizadas.

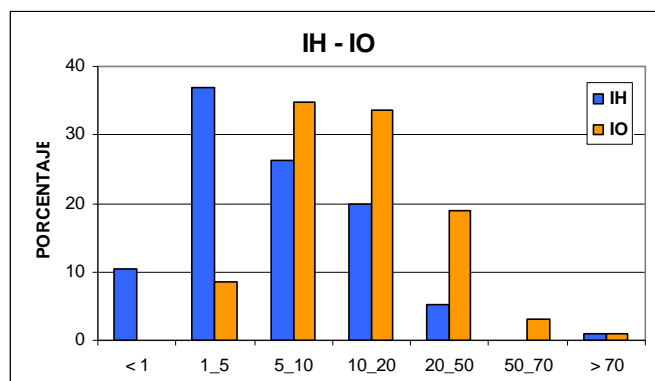


Figura 29. Histograma de distribución de los valores de IH e IO de todas las muestras analizadas.

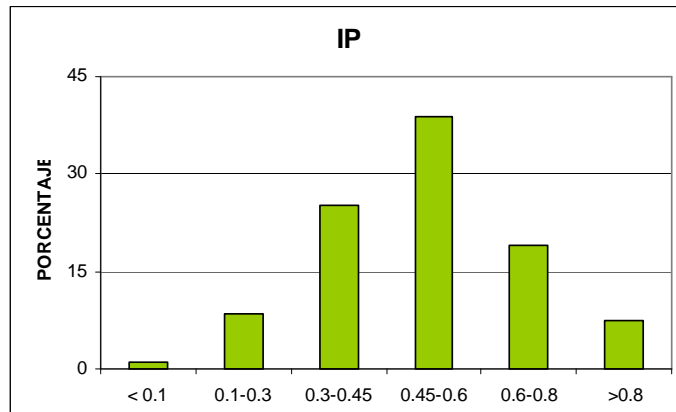


Figura 30. Histograma de distribución de los valores de IP de todas las muestras analizadas.

En la tabla 6 se presenta un resumen estadístico de los anteriores datos, con el fin de apreciar mejor la distribución de los mismos.

Tabla 6. Resumen estadístico de algunos parámetros obtenidos para los resultados de pirolisis Rock Eval.

Parámetro	Tmax	IH	IO	IP	S1	S2	S3
<b>Máximo</b>	473.00	86.57	72.32	0.92	1.36	3.48	1.14
<b>Media</b>	363.04	4.42	12.26	0.49	0.12	0.11	0.31
<b>Mínimo</b>	259.00	0.28	3.32	0.09	0.01	0.01	0.07
<b>Moda</b>	285.00	2.06	-	0.67	0.15	0.08	0.31

### 6.3.2.3. Valores de Reflectancia de Vitrinita (Ro)

Las muestras seleccionadas presentaron dificultades debido al tamaño tan fino de las partículas de materia orgánica obtenidas después de la concentración. Las 20 muestras propuestas se analizaron, pero solo en dos de ellas se logró identificar

la presencia de vitrinita y así medir su reflectancia promedio. Las muestras y los valores que se obtuvieron se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7. Tabla de valores obtenidos de Ro.

<b>MUESTRA</b>	<b>BCMM134g</b>	<b>TGN19-02-06/5</b>
<b>FORMACIÓN</b>	<b>FURATENA</b>	<b>GR. OLINI</b>
<b>EDAD</b>	<b>VALANGINIANO</b>	<b>SANTONIANO</b>
<b>MÁXIMO</b>	2.020	0.963
<b>MÍNIMO</b>	1.921	0.917
<b>DESVIACION ESTANDAR</b>	0.029	0.019
<b>PROMEDIO</b>	1.975	0.943

### 6.3.3. Interpretación de los Resultados

#### 6.3.3.1. Materia Orgánica

Las rocas sedimentarias ricas en materia orgánica han sido estudiadas por la industria del petróleo con el fin de determinar su potencial de generación y expulsión de hidrocarburos con el fin de encontrar acumulaciones económicamente importantes. Como ya se mencionó anteriormente, las rocas huésped de la mineralización de esmeraldas en la zona de estudio, presentan altos contenidos de materia orgánica, por lo cual se realizó este trabajo detallado de su estudio, ya que esta puede darnos luces acerca del proceso de mineralización, y conociendo las alteraciones de esta en las zonas mineralizadas, contribuiría a indicarnos nuevas zonas potenciales para la exploración y explotación de esmeraldas.

Las rocas generadoras de hidrocarburos contienen materia orgánica en forma de bitumen y kerógeno; el bitumen está formado por los compuestos solubles de la materia orgánica en solventes orgánicos y su residuo es el kerógeno, el cual se clasifica dependiendo de su origen y cada uno de estos tiene un potencial para generar diferentes tipos de hidrocarburos (Tabla 8).

Tabla 8. Clasificación de los tipos de kerógeno, sus macerales, ambiente y potencial. Tomado y modificado de Merrill (1991).

Ambiente	Tipo de Kerógeno	Maceral	Potencial de Hidrocarburos
Acuático	I	Alginita	Petróleo
		Kerógeno	
	II	Amorfo	
Terrestre	II	Exinita	Gas y algo de Petróleo
		III	
	IV	Inertinita	Principalmente Gas

El estudio de las rocas sedimentarias ricas en materia orgánica desde el punto de vista de la industria petrolera busca evaluar los siguientes parámetros indispensables:

- Cantidad de materia orgánica en la roca.
- Calidad de la materia orgánica en la roca.
- Madurez de la materia orgánica de la roca.
- Cantidad y Calidad de la Materia Orgánica

El estudio del primer parámetro es el más sencillo de realizar, este se evalúa generalmente con análisis de contenido de carbono orgánico total (COT) en la roca. A partir de estos resultados se puede determinar de manera preliminar el potencial de una roca para ser roca fuente, la cual se clasifica de manera general y preliminar según la Tabla 9. Esta clasificación es independiente de la matriz mineral, aunque existen otros factores como el espesor de la roca fuente y su

proximidad a una roca reservorio, pero estos factores no son relevantes en nuestro caso.

Tabla 9. Clasificación general del potencial de una roca fuente dependiendo de su contenido de COT. Tomado de Merrill (1991).

Potencial de Generación	COT (% peso)
Regular	<1%
Buena	1 – 2 %
Excelente	>2 %

La calidad de la materia orgánica está directamente relacionada con el tipo de kerógeno. Una forma de evaluar la calidad de la materia orgánica es por medio de los parámetros obtenidos en la pirolisis Rock Eval, de los cuales se pueden obtener algunos indicadores secundarios por relaciones entre los parámetros iniciales, como se muestra en la tabla 10.

Los resultados obtenidos de los valores de COT por el método LECO indican que las muestras seleccionadas son muy ricas en materia orgánica, como se puede observar en la Figura 26, en los cuales se observa que la mayoría de las muestras tiene un contenido de COT entre el 2 y 5 %, lo cual, según la tabla 9, permite clasificar preliminarmente éstas rocas como excelentes rocas generadoras desde el punto de vista petrolero.

La Figura 31 muestra la distribución del COT, discriminándolo según las formaciones analizadas, en el caso de las formaciones del Cretácico Superior, las muestras se agruparon debido a que eran muy pocas. En esta figura se puede observar que la Formación Rosablanca es la que presenta la moda más baja en su contenido de COT, siendo esta de 1-2%; las demás formaciones presentan su

moda en el rango de 2-5%, siendo la Formación Muzo la que se presenta mejor distribuida en todos los rangos; las Formaciones del Cretácico Superior y del Albiano Medio (Formaciones Otanche y Pacho) presentan un sesgo abrupto en el rango de 2-5%, ya que no presentan valores en rangos mayores al de su moda.

Tabla 10. Indicadores de la calidad de la materia orgánica en una roca fuente. Tomado de Merrill (1991).

Definición	Ecuación	Rangos		
Índice de Hidrógeno	$\frac{(S_2 \times 100) \text{mg/g}}{\% \text{COT}}$	<150= gas	150-300= mixto	>300= petróleo
		<b>(Ro = 0.6%)</b>		
Índice de Oxígeno	$\frac{(S_3 \times 100) \text{mg/g}}{\% \text{COT}}$	<b>&lt;40 mg/g</b>		<b>&gt;40 mg/g</b>
		Bajo IH= MO continental y/o madura Alto IH= roca fuente buena a excelente		Bajo IH= MO generadora de gas, inmadura Alto IH=buena fuente de petróleo, inmadura
Producción Potencial	$(S_1 + S_2) \text{mg/g}$	<2= pobre	2-6= bueno	>6= excelente
Tipo de Kerógeno	$\frac{S_2}{S_3}$	<3= productor de gas	3-5= mixto	>5= productor de petróleo

Las muestras analizadas de las columnas se discriminaron en cada una ellas (Figura 32), las cuales son Pauna-Borbur, Borbur-Buriburi, Jerusalén-La Paz y Otanche-El Encanto. Al realizar ésta discriminación se puede observar que solo las muestras de la columna de Borbur-Buriburi presentan una moda entre 1 y 2 % de COT, siendo ésta variación atribuible al cambio en las condiciones de depositación locales, ya que la madurez termal es similar a la de la sección equivalente en edad (Pauna-Borbur) como se verá más adelante. Las muestras de las demás columnas presentan un contenido modal de COT entre 2 y 5 %, pero las secciones de Pauna-Borbur y Jerusalén –La Paz presentan tendencias a

valores mayores al 5%; mientras que la sección Otanche-El Encanto tiende a valores más bajos.

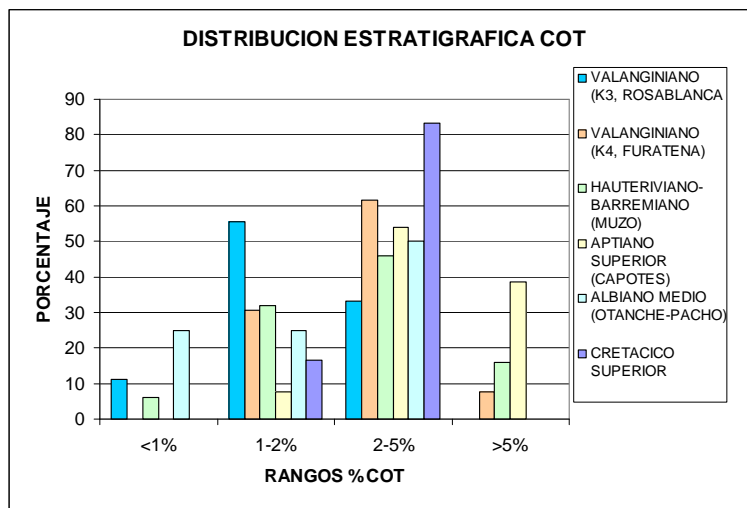


Figura 31. Distribución de COT en las muestras recolectadas discriminadas según las formaciones. Las muestras de Formaciones del Cretácico Superior se agruparon debido a que eran muy pocas

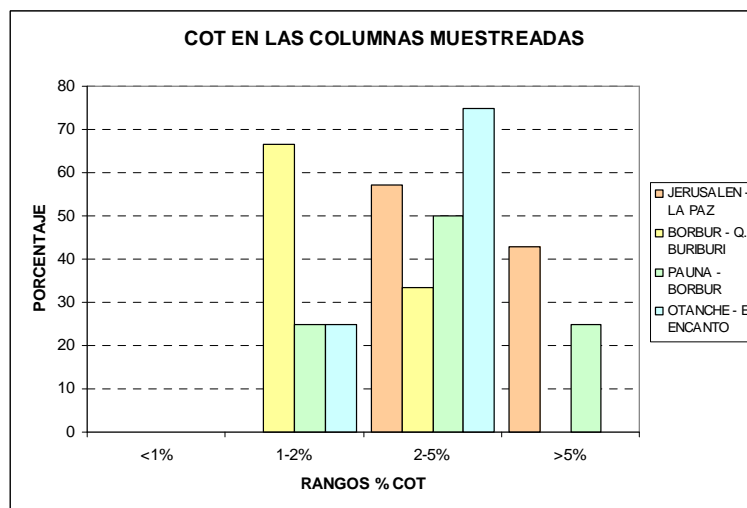


Figura 32. Histograma de distribución de COT en las muestras de las columnas, por cada sección y el total de las columnas.

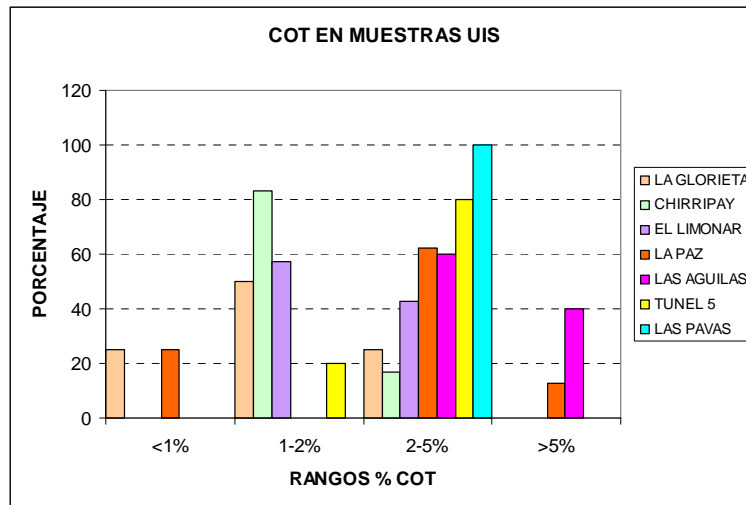


Figura 33. Histograma de distribución de COT en las muestras recolectadas en las campañas de la UIS-INGEOMINAS. Se muestra también la distribución en los principales túneles.

Las muestras recolectadas en las campañas INGEOMINAS-UIS se discriminaron en los diferentes túneles muestreados (Figura 33), en los cuales se observa una tendencia modal entre 2 y 5 % de COT para los túneles productores de esmeraldas (Las Aguilas, La Paz, Las Pavas y Túnel 5); en cambio, en los túneles no productores de esmeraldas (La Glorieta, Chirripay y El Limonar), los valores de COT presentan una moda entre 1 y 2 %, lo cual puede indicar una relación directa de las zonas mineralizadas con un contenido elevado de COT, quedando como inquietud el papel de la materia orgánica y su importancia en la formación de las esmeraldas, elemento solo tratado hasta el momento en Giuliani *et al.* (2000) como importante en la producción de H<sub>2</sub>S por medio de la reducción termoquímica de sulfatos.

La caracterización de la calidad de la materia orgánica realizada por medio de los resultados de pirólisis Rock Eval indicaría que la materia orgánica es de muy baja calidad (kerógeno tipo III o inertinita) o que ésta se encuentra en un estado avanzado de madurez, dado que los valores de los picos S1, S2 y S3 y los índices

de oxígeno (IO) e hidrógeno (IH) son bastante bajos (Figuras 28 y 29). Tomando en cuenta el ambiente de depositación de las rocas estudiadas y los estudios de formaciones equivalentes en otras regiones del país, la materia orgánica depositada allí debió ser originalmente de una excelente calidad (kerógeno tipo I-II); por lo cual, según el contexto geológico de la zona de estudio, estos resultados apuntan más en la dirección de un estado avanzado de madurez, lo cual está de acuerdo con los resultados obtenidos anteriormente por Giuliani *et al.* (2000).

#### 6.3.3.2. Madurez Termal de la Materia Orgánica

La madurez de la materia orgánica, puede ser evaluada por medio de análisis óptico (Ro y TAI), análisis cromatográficos y pirolisis Rock Eval. La materia orgánica de una roca alcanza su madurez termal por un efecto combinado de la temperatura y el tiempo. Se han definido tres etapas principales de madurez de la materia orgánica (Tissot y Welte, 1984), que son:

- **Diagénesis:** esta se ha dividido en las dos etapas siguientes:
  - **Diagénesis Temprana:** en esta etapa el kerógeno pierde la mayoría del nitrógeno e incorpora el azufre, esto ocurre en los primeros metros del sedimento.
  - **Diagénesis:** se caracteriza por la pérdida de oxígeno en la forma de H<sub>2</sub>O, CO, CO<sub>2</sub> y pequeñas cantidades de otros compuestos oxigenados, por lo general ocurre a temperaturas inferiores a 70-80°C.
  
- **Catagénesis:** en ésta etapa de la maduración del kerógeno, se forman los hidrocarburos líquidos en la primera zona conocida como la ventana del petróleo. En una etapa posterior, el craqueo del petróleo y el kerógeno produce gas húmedo. Finalmente, en una zona conocida como la ventana del gas, las reacciones de craqueo son tan intensas que se genera el gas seco, mayoritariamente metano puro.

- **Metagénesis:** ocurre en sedimentos profundos a temperaturas superiores a 150°C, ésta etapa corresponde a la reorganización de la estructura del carbono en el kerógeno residual hacia una estructura grafitica. Solo se genera metano, sulfuro de hidrógeno y nitrógeno molecular.

La madurez y el tipo de kerógeno de una roca también pueden ser evaluados por medio de un diagrama de Van Krevelen, en el cual el eje X corresponde a la relación atómica O/C y el eje Y es la relación atómica H/C (Figura 34 A.). Estos diagramas también pueden ser obtenidos de los valores del IO y el IH de la pirolisis en posiciones análogas al O/C y al H/C respectivamente (Figura 34 B.).

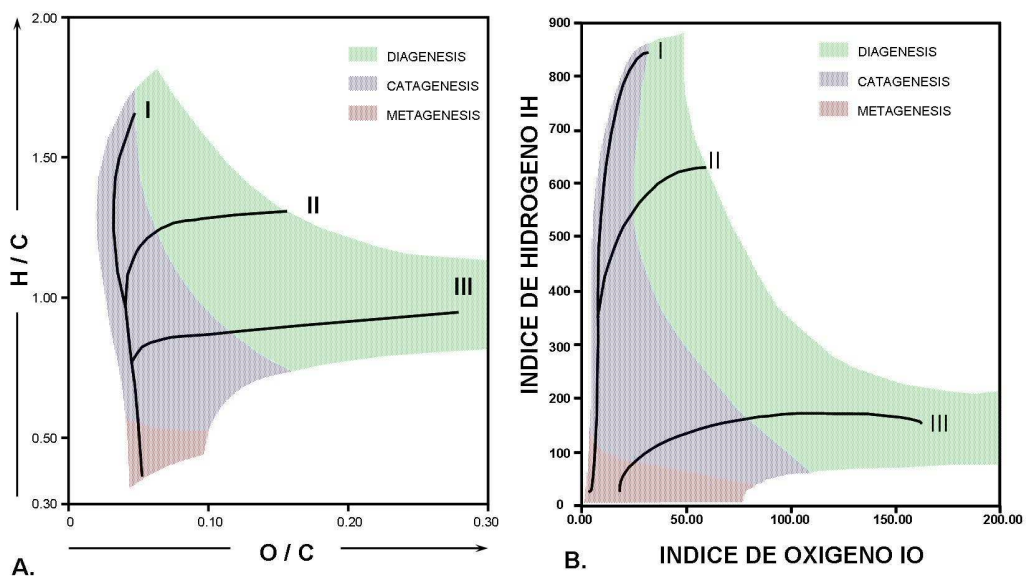


Figura 34. Diagrama de Van Krevelen donde se observan las etapas de madurez termal de la materia orgánica basados en las relaciones atómicas O/C vs. H/C (A.) y en el IO vs. IH (B.) obtenidos por pirolisis. Modificado de Bordenave (1993).

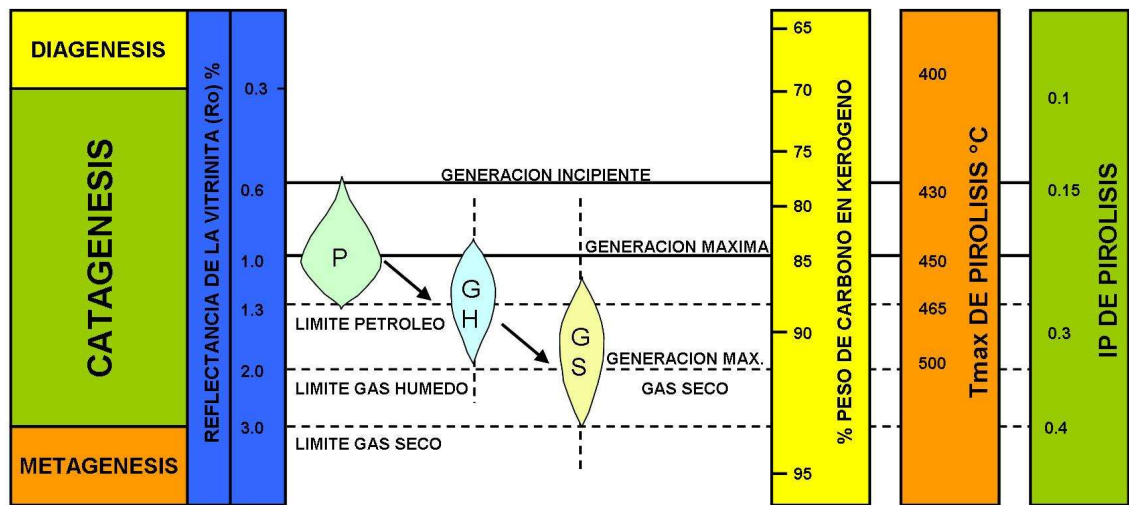


Figura 35. Comparación de varios parámetros indicadores de la madurez y su correlación con las etapas de madurez de la materia orgánica y los límites de generación de petróleo y gas. P= Petróleo, GH= Gas Húmedo, GS= Gas Seco, IP=Índice de Productividad. Tomado y modificado de Merrill (1991).

En la Figura 35 se presenta una relación de estas etapas de la madurez de la materia orgánica con diferentes parámetros indicadores de la misma, tales como el  $T_{max}$ , IP, Ro y COT en kerógeno.

Los datos indicadores de madurez termal de la materia orgánica obtenidos en el presente trabajo, corresponden a los parámetros obtenidos por pirólisis Rock Eval ( $T_{max}$  e IP) y reflectancia de vitrinita (Ro).

El análisis inicial de los datos obtenidos de pirólisis, como ya se mencionó, muestra que los valores de los picos S1, S2 y S3, y los índices de hidrógeno (IH) y oxígeno (IO), son muy bajos (Figuras 28 y 29). Debido a esto los datos de  $T_{max}$  obtenidos deben ser descartados ya que son poco confiables (Walter, P., comunicación verbal, 2006 y Johnson *et al.*, 1994). Además, al comparar los datos de  $T_{max}$  e IP muestran incongruencias aún en las muestras que cumplen con el

requisito mínimo de tener el pico S2 mayor a 0,2 ó 0,3 (Ver Anexo 3) ya que los valores del IP son bastante altos, en su mayoría superiores a 0.4 (Figura 30 y Tabla 6), indicando que la madurez termal alcanzada por las rocas de ésta zona sobrepasa la ventana del petróleo; por el contrario, los valores de  $T_{max}$  son bastante bajos, por debajo de 430°C, lo que indicaría que las rocas no han entrado aún en la ventana de generación, como lo indica la Figura 27. En general éstos datos son poco confiables dado su comportamiento dual entre el IP y el  $T_{max}$ . Exceptuando una muestra de edad Turoniano-Coniaciano con un valor de  $T_{max}$  de 473°C y un IP de 0.28, lo que indicaría que estas rocas pertenecientes a la Formación La Frontera-Unidad Indenominada se encontrarían por debajo de la ventana del petróleo según la Figura 35, de lo cual se puede inferir que las unidades inferiores y de mayor interés como la Formación Muzo son aún más maduras, estando en una etapa avanzada de metagénesis.

Los bajos valores obtenidos para el IO e IH, no son útiles para la caracterización de la materia orgánica y además nos indican lo poco confiables de los valores de  $T_{max}$ , pero son útiles para visualizar la madurez termal de la materia orgánica por medio de un diagrama de Van Krevelen, como se observa en la Figura 34 donde se propone una zonación de las etapas de madurez termal. Al graficar los datos obtenidos para la zona de estudio en un diagrama de este tipo (Figura 36) se nota que estos valores corresponden al área de la metagénesis, lo cual está más acorde con los valores del IP obtenidos. La incoherencia en los datos de  $T_{max}$  de algunas muestras con el pico S2 >0.2-0.3 podría explicarse si la materia orgánica de la muestra es mayoritariamente pirobitumen (Bordenave, 1993), lo cual es más coherente con la sobremadurez esperada para ésta zona y con lo dicho en Giuliani *et al.* (2000), quienes dicen que la materia orgánica presente en las zonas mineralizadas y en las rocas está en la forma de bitumen.

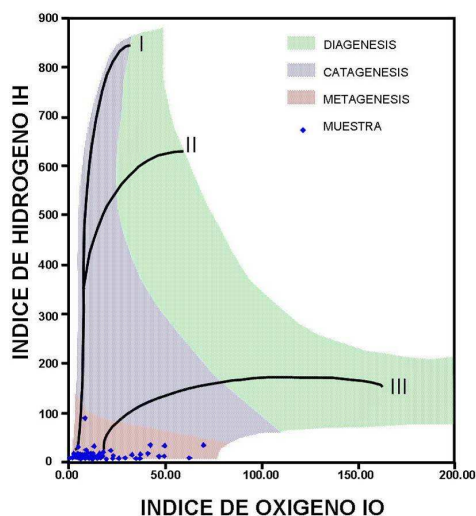


Figura 36. Diagrama de Van Krevelen con los puntos de las muestras analizadas. Todas las muestras caen en el área de la Metagénesis.

Los datos obtenidos de las dos muestras que presentaron vitrinita indican que las rocas se encuentran en etapas de madurez posteriores al máximo de generación de petróleo.

La muestra TGN 19.02.06/5 recolectada en la columna Otanche-El Encanto, pertenece al Grupo Olini de edad Santoniano, ubicada más exactamente en el Nivel de Lutitas y Arenitas; ésta muestra presenta un valor de  $R_o$  de 0.9%, el cual lo ubica en el pico máximo de generación de hidrocarburos según la Figura 35. La otra muestra que presentó vitrinita fue la BCMM134g recolectada en la columna Borbur-Buriburi, pertenece a la Formación Furatena de edad Valanginiano; ésta muestra presenta un valor de  $R_o$  de 2%, el cual corresponde a la etapa de generación máxima de gas seco, correspondiente a la parte final de la catagénesis; aunque éste valor indica un avanzado estado de madurez, éste no es tan alto como se esperaba para ésta formación. Con el fin de visualizar mejor un perfil de evolución termal, se hizo una extrapolación a partir del valor de  $T_{max}$  de 473°C de la muestra LME017005 hacia su equivalente aproximado de  $R_o$ , el cual es aproximadamente de 1.3%, ubicando ésta muestra por encima de la ventana del petróleo. Estos tres puntos se graficaron en un perfil contra la profundidad,

sumando los espesores reportados de las Formaciones, para así poder ubicar los datos de manera más precisa (Figura 37).

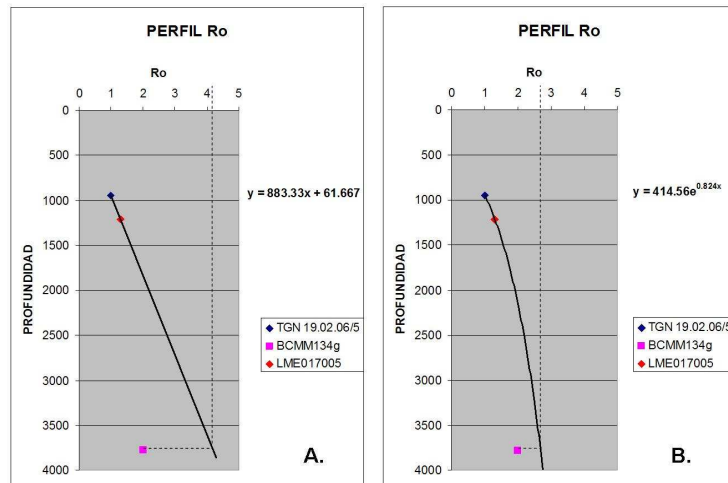


Figura 37. Perfil de Ro aproximado para la zona de estudio donde se muéstrale valor medido y los valores extrapolados que se esperarían para la muestra BCMM134g, en A con una extrapolación lineal y en B con una extrapolación exponencial.

Aunque éste perfil no es muy significativo debido a la escasez de datos, la extrapolación lineal para la muestra BCMM134g resultante en un valor de aproximadamente 4.2%, es más coherente con lo esperado para ésta zona (según los datos de IC), aún con una extrapolación exponencial se obtiene un resultado de 2.7% de Ro que es mayor que el valor medido. Éste fenómeno de reflectancias más bajas de lo normal se conoce como supresión de reflectancia y es un fenómeno bien conocido en muchas localidades del mundo donde se ha reportado hasta un 70% de supresión (Lo 1993, Stasiuk et al 1999, Dalla *et al.* 1997 y Othman y Ward 2002); la posible explicación de este fenómeno para ésta zona sería el hecho de la depositación en un ambiente marino o la presencia de pirobitumen; este último, como ya se mencionó, puede explicar también los valores bajos de  $T_{max}$  (Bordenave, 1993), además de que ya se ha reportado su presencia en éstas rocas (Giuliani *et al.*, 2000). Otra posible explicación sería la

inhibición de la madurez por efecto de la sobrepresión, que se ha reportado en estudios de este tipo (Osborne y Swarbrick, 1997, Zou y Peng, 2001). El valor de 4.2% de Ro está más acorde con el valor de cristalinidad de illita predicho para la misma muestra, que según Francu *et al.* (1999), correspondería a una paleotemperatura máxima de 240-300°C. Siguiendo otras curvas propuestas en la literatura para la relación Temperatura Máxima-Ro en Maynard *et al.* (2001), la temperatura máxima para un Ro de 4.2% sería de 320-340°C, o según Barker y Pawlewicz (1994) en Curtis y Faure (1997) ésta sería de 250 °C, la primera se acerca a la temperatura predicha a partir de los datos de IC= 0.22, que según la Figura 9, debería estar por arriba de los 300°C; la segunda, aunque más baja, está también próxima a las temperaturas obtenidas por otros métodos de 280-290 °C (Mantilla *et al.*, 2006).

#### 6.4. TEMPERATURAS MÁXIMAS PARA LAS FORMACIONES

Como labor final de este trabajo está la de determinar la temperatura máxima a la que las rocas del sector fueron sometidas, utilizando los datos obtenidos por los diferentes métodos trabajados y otros datos obtenidos. Para la obtención de los datos de temperatura máxima se utilizaron los datos de reflectancia de la vitrinita,  $T_{max}$  confiables y cristalinidad de illita como principal indicador, además de los datos de aparición de minerales indicadores de temperatura como el cloritoide y la paragonita.

Los datos obtenidos de temperaturas máximas para algunas de las formaciones indican que las Formaciones Muzo y Capotes estuvieron sometidas a mayores temperaturas que la Formación Capotes que las infrayace, como se puede observar en la Figura 38, aquí se muestran las temperaturas máximas alcanzadas para cada Formación. Para el caso de las Formaciones Otanche-Pacho e infrayacentes, la temperatura máxima se estimó (Figura 9) tomando en cuenta los valores de IC promedio obtenidos para las formaciones estudiadas (Tabla 11),

eliminando los datos que presentasen ciertas incoherencias como IC demasiado altos (valor numérico) debidos a errores en la medición o anomalías poco extendidas como la encontrada en los alrededores del intrusivo de La Corona. Para la Formación La Frontera-Unidad Indenominada la temperatura se obtuvo de la extrapolación del dato de  $T_{max}$  obtenido a su equivalente en  $R_o$  (Figura 35), del valor de  $R_o$  se obtuvo la temperatura según las correlaciones planteadas en Maynard *et al.* (2001) y Barker y Pawlewicz (1994) en Curtis y Faure (1997). El dato obtenido para el Grupo Olini se extrapoló de un valor de  $R_o$  medido utilizando las ecuaciones antes mencionadas.

Tabla 11. Tabla de parámetros utilizados para la obtención de temperaturas máximas y sus resultados mostrados en la Figura 38 a manera de perfil de temperatura.

FORMACIÓN	ESPESOR (m)	IC PROMEDIO ( $\Delta z/\theta$ )	$R_o$ (%)	T DE $R_o$ (°C) *	T DE $R_o$ (°C)**	TEMPERATURA MÁXIMA (°C)	TEMPERATURA MÁXIMA PROMEDIO (°C)
<b>CORDOBA</b>	500	-	-	-	-	-	-
<b>GRUPO OLINI</b>	160	-	0,94	130,49	110+-20	100-140	120
<b>INDENOMINADA-LA FRONTERA</b>	350	-	1,3***	156,64	170+-20	150-180	160
<b>OTANCHE-PACHO</b>	140	0,36	-	-	-	230-250	240,0
<b>HILÓ</b>	250	-	-	-	-	-	-
<b>CAPOTES</b>	750	0,23	-	-	-	330-350	340,0
<b>MUZO</b>	300	0,22	-	-	-	300-330	315,0
<b>FURATENA</b>	1000	0,27	1,97	190,16	220+-20	260-280	270,0
<b>ROSABLANCA</b>	600	0,15	-	-	-	340-370	350,0

\* Temperatura obtenida según ecuación de Barker y Pawlewicz (1994) en Curtis y Faure (1997).

\*\* Temperatura obtenida según curvas de correlación Maynard *et al.* (2001).

\*\*\*  $R_o$  obtenido por extrapolación de  $T_{max}$  según Figura 35.

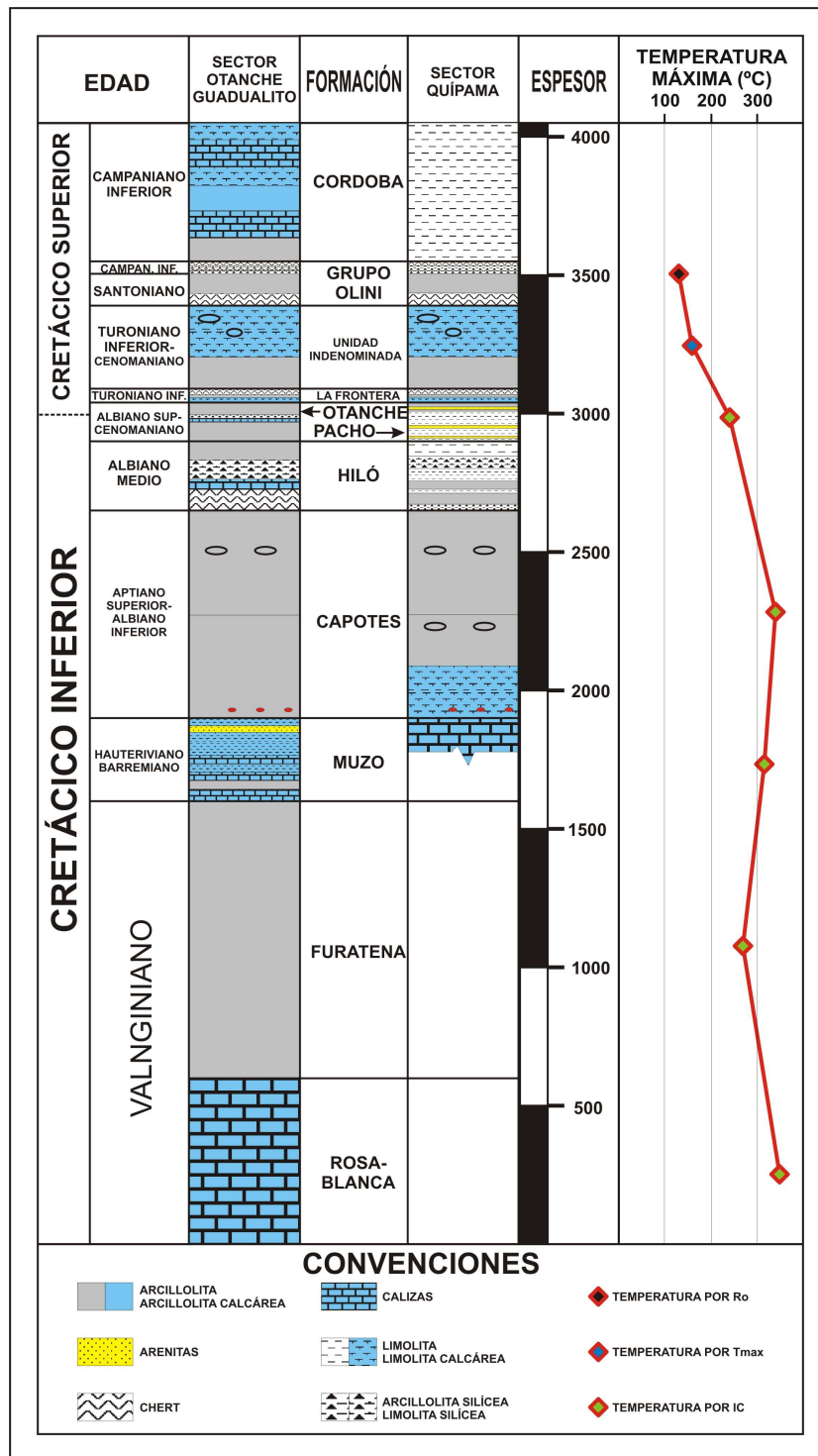


Figura 38. Columna estratigráfica generalizada con el perfil de temperatura obtenido a partir de los datos de la tabla 11. Modificado de Reyes (2006).

Observando los valores de la Tabla 11 y el perfil de la Figura 38 sobresale el cambio de valores de temperatura de 330-350°C en la Formación Capotes, hasta 230-250°C en la Formación Otanche-Pacho, además del posterior cambio a temperaturas de 150-180°C en la Formación Indenominada-La Frontera, lo que nos resultaría en un gradiente de cerca de 180°C/km (Figura 38), lo cual es exagerado en ésta zona. También cabe resaltar el hecho de que las rocas de la Formación Furatena presentan menores temperaturas a las de las Formaciones Muzo y Capotes, lo cual marca una clara anomalía termal. Ésta anomalía termal puede explicarse como el producto de la acción de fluidos hidrotermales alóctonos que pudieron migrar desde zonas más profundas y según lo visto en los perfiles de IC de las columnas, ésta interacción tuvo lugar principalmente con rocas que favorecieron la circulación de estos fluidos (Rocas calcáreas y sectores de intercalaciones frágiles y dúctiles). En el caso de la temperatura obtenida para la Formación Rosablanca de 340-370°C, éste valor indica también una anomalía termal ya que la diferencia de temperatura con respecto a la Formación Capotes es de 80°C en menos de 1 km lo cual también es exagerado; esto también puede explicarse por la acción de fluidos hidrotermales alóctonos como ya se explicó anteriormente.

Si tomamos la temperatura alcanzada por las rocas de las Formaciones Muzo, Capotes y Rosablanca como la temperatura de los fluidos, éstos fluidos deberían provenir desde rocas que se encontrasen a una profundidad cercana a los 10 km (suponiendo un gradiente normal de 30-35°C), lo que según la Figura 39 sería una mayor profundidad que la posiblemente alcanzada por las rocas más antiguas encontradas en esta zona. Otra posible explicación sería que los fluidos provienen de rocas sometidas a un alto paleoflujo de calor en un ambiente tectónico con una corteza continental adelgazada, posiblemente durante la depositación del Cretácico Inferior que en esta zona fue de gran espesor (Figuras 38 y 39) y estuvo influenciada por una tectónica fuertemente extensiva (Cooper *et al.*, 1995, Taboada *et al.*, 2000, y otros); además, por los datos de isótopos estables de

oxígeno y carbono en cuarzo y carbonatos de todos los depósitos, se puede decir que estos fluidos provienen de las reacciones de devolatilización de rocas sedimentarias de la misma cuenca (Giuliani *et al.* 1992 y Mantilla *et al.*, 2006) y que pueden estar relacionados con las mineralizaciones de esmeraldas presentes en la región.

La ubicación temporal de este evento hidrotermal causante de estas anomalías termales, queda aún en duda, ya que las edades  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  propuestas para las mineralizaciones de esmeraldas en la zona son de  $36\pm 3$  Ma para los depósitos de Coscuez y  $32\pm 3$  Ma para los depósitos de Muzo (Cheilletz *et al.* 1994) que coincidiría con una fase tectónica Preandina. Otra datación  $\text{Rb}^{87}/\text{Sr}^{86}$  argumenta una edad más antigua aún, de 61-67 Ma (Romero *et al.* 2000) que ubicaría este evento al inicio de una fuerte depositación en el Paleógeno; incierta en ésta zona ya que no existe registro estratigráfico de la misma; y coetánea también con una fase tectónica compresiva. Debido a estas dudas en el modelo de evolución se recomienda incorporar datos de termocronología (trazas de fisión en apatitos y circones), geotermómetros (relación I/S en illitas, IC en cloritas, COT en kerógeno y otros) y geobarómetros (análisis de illitas por microscopía electrónica de transmisión, TEM), además de complementar con las edades de las arcillas neoformadas de algunas muestras de este estudio.

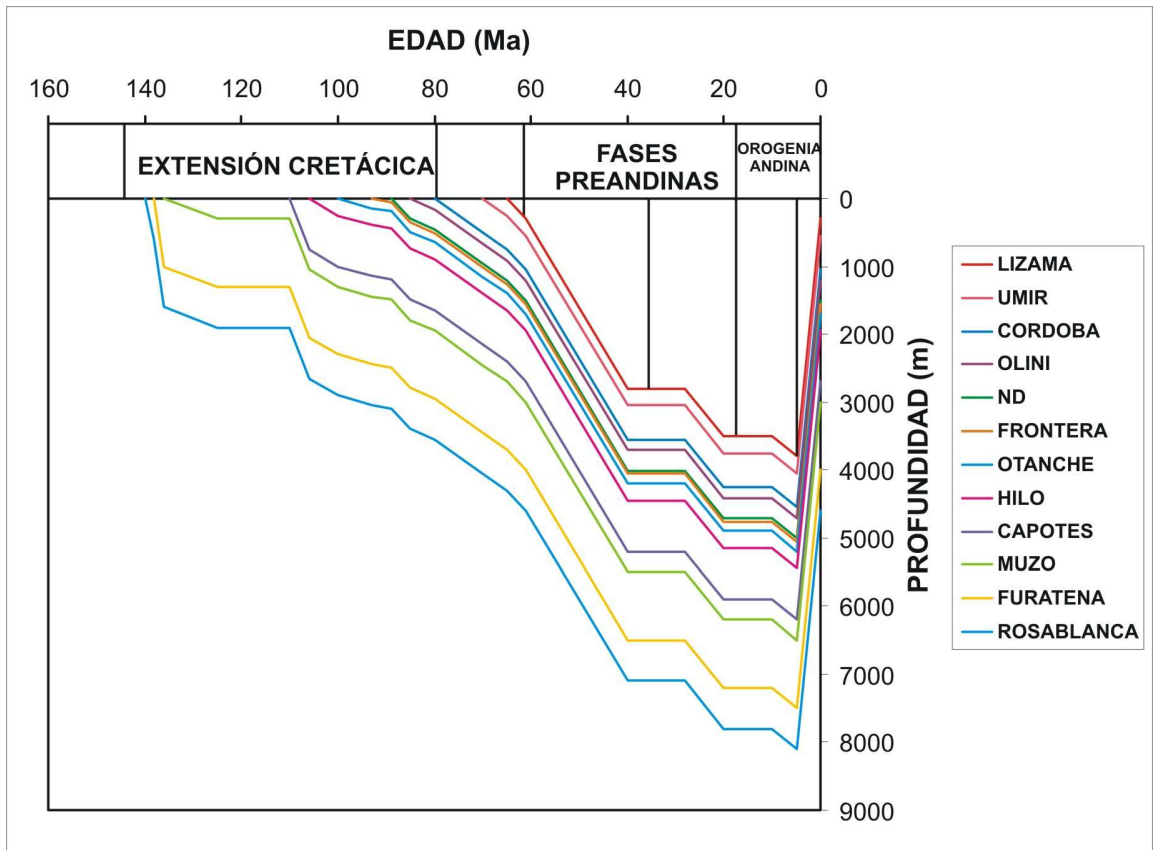


Figura 39. Diagrama de soterramiento aproximado para la zona de estudio. Apoyado en los datos tomados de Reyes *et al.* (2006) y Cortés *et al.* (2006).

## 7. CONCLUSIONES

- Las rocas sedimentarias del Cretácico Inferior aflorantes en el área del cinturón esmeraldífero occidental, presentan evidencias de una estructura termal invertida, tal como lo sugiere la presencia de minerales tales como cloritoide, pirofilita y paragonita (minerales de típicos de un metamorfismo de bajo y muy bajo grado), en las rocas de las formaciones Capote y Muzo (de edad Aptiano y Hauteriviano-Barreminao, respectivamente); y ausencia de éstos en la formación infrayacente de Furatena (de edad Valanginiano).
- Los valores de cristalinidad de las Illitas obtenidos mediante el método de Kubler (1967), en general apuntan a una mayor madurez termal de estos componentes inorgánicos en las rocas de las formaciones Capotes y Muzo (predominantemente ambientes de epizona-anquizona), en comparación con la Formación Furatena (ambientes de anquizona-diagénesis).
- El análisis del carbono orgánico total (COT) en muestras lodolíticas de la Formación Muzo; en donde existen túneles que han producido esmeraldas (Las Águilas, La Paz, Las Pavas y Túnel 5); presentan una moda en los valores igual a 2-5%. Por otro lado, estas mismas rocas, cortadas por túneles actualmente no productores (La Glorieta, Chirripay y El Limonar) presentan una moda en los valores igual a 1-2%.
- Los datos obtenidos de Rock Eval (IH e IO) ploteados en un diagrama del tipo Van Krevelen, muestran que la materia orgánica de la mayoría de rocas de este sector han alcanzado el campo de la metagénesis, lo cual indica que han alcanzado un avanzado estado de madurez termal.

- Las inversiones termales, se localizan fundamentalmente cuando existen contrastes de competencias litológicas, tales como rocas lodolíticas orgánicas calcáreas y rocas fundamentalmente de lodolitas silíceas.
- La madurez termal de las rocas Cretácicas (de edad Aptiano) próximas al intrusivo gabro-diorítico de la Corona, presenta valores típicos de la epizona ( $IC=0.10-0.18^{\circ}\Delta 2\theta$ ), en comparación con las mismas rocas distantes al menos unos 30 metros del contacto con éste cuerpo ígneo (valores  $IC=0.36^{\circ}\Delta 2\theta$ ).
- Las inversiones termales presentes en las rocas de la zona de estudio, parecen estar relacionadas con eventos hidrotermales, posiblemente contemporáneos con la edad de la mineralización esmeraldífera (Paléogeno), para la cual se ha documentado un importante flujo de fluidos calientes migratorios con temperaturas entorno a 350°C.
- Las inversiones termales identificadas en el área de estudio, así como también los rangos de valores de COT detectados en los túneles productores, pueden ser potenciales criterios en la exploración esmeraldífera.

## 8. RECOMENDACIONES

- Realizar un análisis más concienzudo a los minerales de arcilla presentes en el área con el fin de eliminar posibles incertidumbres a la hora de la medición del IC de illitas y además poder obtener otros parámetros como el IC en cloritas y la relación I/S en illitas, si se presenta.
- Los datos de obtenidos a partir de análisis de Rock Eval deben ser tratados analíticamente para eliminar datos incoherentes y poco confiables, dependiendo del rango de detección del equipo utilizado.
- Realizar un modelamiento concienzudo de la historia termal y de soterramiento de las rocas del área con el fin de definir de manera más precisa un modelo de evolución para la zona de estudio.
- Realizar un muestreo más disperso en zonas con menor deformación y alteración hidrotermal, con el fin de comprobar si existen tendencias regionales de madurez termal, relacionadas a estructuras regionales o locales.
- Realizar el estudio de madurez termal de esta zona por medio de otros métodos como la relación I/S en illitas, y otras técnicas de componentes orgánicos, y el estudio geobarométrico de illitas por microscopía electrónica de transmisión (TEM).
- Complementar el modelo termal y de soterramiento con datos de termocronología de trazas de fisión en apatitos o en circones y datos geocronológicos de las alteraciones hidrotermales presentes.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

- Bordenave, M. L. (1993). Applied Petroleum Geochemistry. Editions Technip, París, 524 p.
- Cheilletz, A., Féraud, G., Giuliani, G. y Rodríguez, C.T. (1994). Time-Pressure and Temperature Constraints on the Formation of Colombian Emeralds:  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  Laser Microprobe and Fluid Inclusion Study. Economic Geology, Vol. 89, pp. 361-380.
- Collo, G., Do Campo, M. y Astini, R. (2005). Caracterización Mineralógica, Microestructural e Historia Postdeposicional de la Formación La Aguadita, Sistema de Famatina, La Rioja, Argentina. Revista Mexicana de Ciencias, Vol. 22, No. 3, pp. 283-297.
- Cooper, M. B., Addison, F. T., Alvarez, R., Coral, M., Graham, R. H., Hayward, A. B., Howe, S., Martinez, J., Naar, J., Peñas, R., Pulham, A. J. y Taborda, A. (1995). Basin Development and Tectonic History of the Llanos Basin, Eastern Cordillera, and Middle Magdalena Valley, Colombia. A.A.P.G. Bulletin, Vol. 79, No. 10, pp. 1421-1443.
- Cortés, M., Colletta, B., Angelier, J. (2006). Structure and tectonics of the central segment of the Eastern Cordillera of Colombia. Journal of South American Earth Sciences. Vol. 21, pg. 437–465.
- Curtis, J. y Faure, G. (1997). Accumulation of Organic Matter in the Rome Trough of the Appalachian Basin and Its Subsequent Thermal History. A.A.P.G. Bulletin, Vol. 81, No. 3, pp. 424-437.
- Dalla, T. M., Ferreiro, R. M. y Ernst, W. G. (1997). Experimental Study on the Pressure Dependence of Vitrinite Maturation. Geochimica et Cosmochimica Acta, Vol. 61, No. 14, pp. 2921-2928.

- Definiciones Pertinentes a la Variable, Atlas Climatológico Nacional. IDEAM, Bogotá. ISBN 958-8067-14-6, Colombia 27/10/2006  
<http://duinimako.ideam.gov.co/files/atlas/contenido.htm>.
- Encarta (2005): Enciclopedia Encarta. Microsoft (ed. 2005).
- Etayo, F., Cediél, F. y Cáceres, C. (1997). Mapa de Distribución de Facies y Ambiente Tectónico Durante el Berriasiano-Valanginiano. INGEOMINAS.
- Francu, E., Francu, J. y Kalvoda, J. (1999). Illite Crystallinity and Vitrinite Reflectance in Paleozoic Siliciclastics in the Se Bohemian Massif as Evidence of Thermal History. *Geologica Carpathica*, Vol. 50, No. 5, pp. 365-372.
- Frey, M. (1987). *Low Temperature Metamorphism*. Blackie and Sons, Glasgow, 351 p.
- Giuliani, G., France-Lanord, Ch., Cheilletz, A., Coget, P., Branquet, Y. y Laumonnier, B., (2000) Sulfate Reduction by Organic Matter in Colombian Emerald Deposits: Chemical and Stable Isotope (C, O, H) Evidence. *Economic Geology*. Vol. 95. pp. 1129-1153.
- Giuliani, G., Sheppard, S.M.F. y Cheilletz, A. (1992). Fluid Inclusions and  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ,  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  Isotope Geochemistry Contribution to the Genesis of Emerald Deposits from the Oriental Cordillera of Colombia. *C.R. Acad. Sci. Paris*, 314, Série II, pp. 269-274.
- INGEOMINAS- GEOSEARCH LTDA. (2005). Levantamiento de Información Estratigráfica y Muestreo Paleontológico, Geoquímico e Isotópico en Secciones Estratigráficas en el Terreno del Cretaceo Inferior del Sector Central de la Cordillera Oriental". Sección: San Pablo de Borbur - Coscuez (Boyaca). Bogotá.
- INGEOMINAS-GEORESOURCES EXPLORATION LTDA. (2005). Levantamiento de Información Estratigráfica y Muestreo Paleontológico, Geoquímico e Isotópico en Secciones Estratigráficas en el Terreno del Cretáceo Inferior del Sector Central de la Cordillera Oriental. Sección: Pauna – San Pablo de Borbur – (Boyacá). Bogotá.

- Johnson, H., Hackman, B.D., Hawkins, M., Mortimer, C. y Stephen, M. (1994). Petroleum Source Rock Survey in the Solomon Islands and Vanuatu Southwest Pacific. British Geological Survey. SOPAC Technical Report 207, 91p.
- Kubler, B. (1967). Les Argilites, Indicateurs de Métamorphisme. Rev. Inst. Fr. Petrole, No. 19, pp. 1093-1112.
- Lo, H. B.(1993). Correction Criteria for the Suppression of Vitrinite Reflectance in Hydrogen-Rich Kerogens: Preliminary Guidelines. Organic Geochemistry, Vol. 20, No. 6, pp. 653-657.
- Mantilla Figueroa, L. C. (2003). Termocronología K-Ar en Illitas: Aspectos Metodológicos. Boletín de Geología, UIS, Vol. 25, No. 40, pp. 11-22.
- Mantilla Figueroa, L. C; *et al.* (2006). Investigación Petrográfica y Geoquímica de las Sedimentitas del Cretácico Inferior (K<sub>1</sub>) y sus Manifestaciones Hidrotermales Asociadas; Planchas 169, 170, 189, 190(Cordillera Oriental): Implicaciones en la Búsqueda de Esmeraldas. Informe Final (para Revisión). INGEOMINAS - UIS, 247 p.
- Maya, M., Buenaventura, J. y Salinas, R. (2004). Estado del Conocimiento de la Exploración de Esmeraldas en Colombia. INGEOMINAS, 89 p.
- Maynard, J. B., Elswick, E. B. y Hower, J. C. (2001) Reflectance of Dispersed Vitrinite in Shales Hosting Pb–Zn–Cu Ore Deposits in Western Cuba: Comparison with Clay Crystallinity. International Journal of Coal Geology, Vol. 47, pp. 161-170
- Merrill, R. K. (1991). Source and Migration Processes and Evaluation Techniques. Treatise of Petroleum Geology, Handbook of Petroleum Geology, The American Association of Petroleum Geologists, pp. 113-118.
- Moore, D. y Reynolds, R. (1997) X-Ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals. New York , Oxford University Press, 2 ed. 378 p.
- Nolasco García, T. J. (2004). Estudio de la Foliación Tectónica en el Sector Vélez-Bolívar-Guavatá (Departamento de Santander), Tesis de Grado Geología, UIS, 100 p.

- Osborne, M. J. y R. E. Swarbrick. (1997). Mechanisms for Generating Overpressure in Sedimentary Basins: A Reevaluation. AAPG Bulletin, Vol. 81, pp. 1023-1041.
- Othman, R. y Ward, C.R. (2002). Thermal Maturation Pattern in the Southern Bowen, Northern Gunnedah and Surat Basins, Northern New South Wales, Australia. International Journal of Coal Geology. No. 51, pp. 145–167.
- Reyes, G. (2006). Modelo Geológico y Zonas Potenciales en el Cinturón Esmeraldífero Occidental. Presentación INGEOMINAS.
- Reyes, G., Montoya, D., Terraza, R., Fuquen, R. y Mayorga, M., (2006). Memoria Geología Del Cinturón Esmeraldífero Occidental. INGEOMINAS, 42p.
- R-HydroNET v1.0, 27/10/2006, <http://www.r-hydronet.sr.unh.edu/>.
- Rodríguez, E. y Ulloa, C. E. (1984, Publicada en 1994). Mapa Geológico Plancha 189, La Palma. Escala 1: 100.000, INGEOMINAS. Bogotá.
- Romero, F.H., Schultz-Güttler, R.A. y Kawashita, K. (2000). Geoquímica del Rubidio-Estroncio y Edad de las Esmeraldas Colombianas. Geología Colombiana, Vol. 25, pp. 221 – 239.
- Segonzac, D. (1970). The Transformation of Clay Minerals During Diagenesis and Low Grade Metamorphism: A Review. Sedimentology, Amsterdam-Netherlands, Vol. 15, pp. 281-346,
- Stasiuk, L.D., Lockhart, G.D., Nassichuk, W.W. y Carlson, J.A. (1999). Thermal Maturity Evaluation of Dispersed Organic Matter Inclusions from Kimberlite Pipes Lac De Gras, Northwest Territories, Canada. International Journal of Coal Geology, No. 40, pp. 1–25.
- Taboada, A., Rivera, L. A., Fuenzalida, A., Cisternas, A., Philip, H., Bijwaard, H., Olaya, J. y Rivera, C. (2000). Geodynamics of the Northern Andes: Subductions and Intracontinental Deformation (Colombia). Tectonics, Vol. 19, No. 5, pp. 787-813.

- Tissot, B. P. y Welte, D. H. (1984). Petroleum Formation and Occurrence: A New Approach to Oil and Gas Exploration. Segunda Edición, Springer-Verlag, Berlin, 538 p.
- Zou, R. y Peng, P. (2001). Overpressure Retardation of Organic Matter Maturation: a Kinetic Model and its Application. Marine and Petroleum Geology. Vol. 18, pp. 707-713.

## **10. ANEXOS**

Anexo 1. Tabla de Semicuantificación Mineral por Difracción de Rayos

MUESTRA	MINERALES DE ARCILLA						SILICATOS						SULFUROS		CARBONATOS			SULFATOS			OXIDOS					AMORFO	OTROS	
	ESMECTITA	CAOLINITA	ILLITA	PARAGONITA	PIROFILITA	CLORITA	CLORITOIDE	CUARZO	ALBITA	FELDESPATOS	ANFIBOLES	GRANATE	EPIDOTA	MARCASITA	PIRITA	CALCITA	DOLOMITA	ANKERITA	JAROSITA(ND)	ANHIDRITA	YESO	MAGNETITA	HEMATITA	GOETHITA	ANATASA			RUTILO
CJE013001	0	0	0	0	0	*	0	++++	++++	0	0	0	0	0	*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
CJE019001	0	0	0	0	0	+++	0	*	++++	0	0	0	0	0	0	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		apatito +?
CJE019002	0	0	++	0	0	++	0	++	++++	0	0	0	0	0	0	++	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
CJE019003	0	0	0	0	0	0	0	*	0	0	0	0	0	0	0	++++	*	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
CJE019004	*	0	0	0	0	++	0	*	++++	+	0	0	0	0	*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
CJE019005	0	0	0	0	0	0	0	*	0	0	0	0	0	0	0	++++	*	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
CJE019006	0	0	0	0	0	0	0	++	++++	0	++	0	*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
LME001001	0	0	0	0	0	0	0	++++	0	0	0	0	0	0	0	+++	+++	*?	0	0	0	0	0	0	0	0		
LME002001	0	0	++	0	0	0	0	++++	+++	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
LME003001	0	0	+++	*	0	0	0	+++	0	0	0	0	0	0	0	++	0	0	0	0	+	0	0	0	0	0		
LME004001	0	0	+	0	0	+	0	++++	0	0	0	0	0	0	*	++++	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
LME006001	0	0	0	0	0	0	0	+++	*	0	0	0	0	0	*	+++	++	+	0	0	0	0	0	0	0	0		
LME007001	0	0	++	0	0	+	0	++++	+	0	0	0	0	0	*	*	0	0	0	0	+	0	0	0	0	*		
LME007002	0	0	++	0	0	+	0	++++	+?	0	0	0	0	0	*	0	0	0	0	0	+	0	0	0	0	0		
LME008001	0	0	++	0	0	+	0	++++	+?	0	0	0	0	0	*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
LME010001	0	0	++	0	0	0	0	++++	0	0	0	0	0	0	*	0	0	0	0	0	*?	0	0	0	0	0		
LME010002	0	0	+++	0	0	0	0	+++	0	0	0	0	0	0	+	+	0	0	0	0	0	0	+++	0	0	0	+	?
LME010003	0	0	+	0	0	0	0	+	0	0	0	0	0	0	*	++++	0	0	0	0	0	0	++	+	0	0		
LME010004	0	0	++	+	0	0	0	++++	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
LME013001	0	0	++	0	0	0	0	++++	0	0	0	0	0	0	*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
LME014001	0	0	+	0	0	0	0	*	++++	0	0	0	0	0	+	+	++++	++	0	0	0	0	0	0	0	*		
LME014002	0	0	*	0	0	0	0	0	++	0	0	0	0	0	++	++	++++	++	0	0	+	0	0	0	0	0		
LME014003	0	0	*	0	0	0	0	*	0	0	0	0	0	0	*	++	++++	+	0	0	0	0	0	0	0	0		
LME014004	0	0	+	0	0	0	0	+	++++	0	0	0	0	0	*	++	++	+?	0	0	0	0	0	0	0	0		
LME014005	0	0	+	0	0	0	0	+	++++	0	0	0	0	0	+	++	+	*	0	0	0	0	0	0	0	0		
LME014007	0	0	+	0	0	0	0	++	+++	0	0	0	0	0	++	+	++++	+	0	0	0	0	0	0	0	0		
LME014008	0	0	+	0	0	+	0	0	++	0	0	0	0	0	+++	++	++++	++	0	0	+	0	0	0	0	0		
LME014009	0	0	+	0	0	+	0	0	+	0	0	0	0	0	++	++++	+++	+	0	0	+	0	0	0	0	0		
LME014010	0	0	*	0	0	+	0	0	0	0	0	0	0	0	+++	++++	0	0	0	0	0	*	0	0	0	0		
LME014011A	0	0	0	0	0	+++	0	0	0	0	*	*	+	0	+	++++	0	0	0	0	0	+	0	0	0	0		
<b>++++ (&gt;40%)</b>	<b>+++ (20-40%)</b>						<b>++ (10-20%)</b>						<b>+ (3-10%)</b>			<b>* (&lt; 3%)</b>			<b>? :Dudoso</b>					<b>0 Nada</b>				

MUESTRA	MINERALES DE ARCILLA						SILICATOS					SULFUROS		CARBONATOS			SULFATOS			OXIDOS								
	ESMECTITA	CAOLINITA	ILLITA	PARAGONITA	PIROFILITA	CLORITA	CLORITOIDE	CUARZO	ALBITA	FELDESPATOS	ANFIBOLES	GRANATE	EPIDOTA	MARCASITA	PIRITA	CALCITA	DOLOMITA	ANKERITA	JAROSITA(ND)	ANHIDRITA	YESO	MAGNETITA	HEMATITA	GOETHITA	ANATASA	RUTILO	AMORFO	OTROS
LME014011B	0	0	*	0	0	++	0	+	0	+	+	++	0	+	++++	0	0	0	+	*	++	0	0	0	0		+	
LME014012	0	0	*	0	0	+	0	+	++	0	0	+	+	0	++	++++	+++	+	0	0	0	*	0	0	0	0		
LME014013	0	0	+++	0	0	0	0	++	+++	0	0	0	+	0	+	++	+++	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
LME014014	0	0	+++	0	0	0	0	++	++	0	0	*	0	0	++	+++	+++	+	0	0	0	0	0	0	0	0		
LME014015	0	0	++	0	0	0	0	++	++	0	0	*	0	0	*	++++	+++	+	0	0	0	0	0	0	0	0		
LME015001	0	0	++	0	0	0	0	++++	0	0	0	0	0	0	*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
LME016001	0	0	+	0	0	0	0	0	++++	0	0	0	0	0	+	0	++	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
LME016002	0	0	0	0	0	0	0	0	+	0	0	0	0	0	*	0	++++	+	0	0	0	0	0	0	0	0		
LME016003	0	0	++	0	0	0	0	*	++++	0	0	0	0	0	++	0	++	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
LME016004	0	0	0	0	0	0	0	0	+	0	0	0	0	0	0	0	++++	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
LME016005	0	0	0	0	0	0	0	0	*	0	0	0	0	0	0	0	++++	+	0	0	0	0	0	0	0	0		
LME016006	0	0	0	0	0	0	0	*	+	0	0	0	0	0	0	0	++++	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
LME016007	0	0	0	0	0	0	0	0	++	0	0	0	0	0	0	0	++++	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
LME016008	0	0	0	0	0	0	0	*	+	0	0	0	0	0	0	0	++++	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
LME016009	0	0	0	0	0	0	0	0	*	0	0	0	0	0	0	0	++++	+	0	0	0	0	0	0	0	0		
LME016010	0	0	+	0	0	0	0	*	+++	0	0	0	0	0	+	0	++++	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
LME016011	0	0	0	0	0	0	0	0	+	0	0	0	0	0	0	0	++++	*	0	0	0	0	0	0	0	0		
LME016012	0	0	0	0	0	0	0	0	++	0	0	0	0	0	+	0	++++	+	0	0	0	0	0	0	0	0		
LME016013	0	0	0	0	0	0	0	0	*	0	0	0	0	0	0	0	++++	*	0	0	0	0	0	0	0	0		
LME016014	0	0	*	0	0	*	0	*	++++	0	0	0	0	0	+	0	+++	+	0	0	*	0	0	0	0	0		
LME016015	0	0	+	0	0	0	0	*	++++	0	0	0	0	0	+	0	+++	0	0	0	+	0	0	0	0	0		
LME016016	0	0	+	0	0	0	0	*	++++	0	0	0	0	0	*	*	+++	*	0	0	+	0	0	0	0	0		
LME016017	0	0	0	0	0	0	0	0	*	0	0	0	0	0	0	0	++++	*	0	0	0	0	0	0	0	0		
LME016018	0	0	0	0	0	0	0	0	*	0	0	0	0	0	0	0	++++	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
LME016019	0	0	++	0	0	0	0	+	++++	0	0	0	0	0	*	0	+++	*	0	0	+	0	0	0	0	0		
LME016020	0	0	++	0	0	*	0	*	++++	0	0	0	0	0	+	0	++++	+	0	0	*	0	0	0	0	0		
LME016021	0	0	+	0	0	0	0	0	++++	0	0	0	0	0	++	0	++++	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
LME016022	0	0	++	0	0	0	0	*	++++	0	0	0	0	0	0	0	++++	+	0	0	0	0	0	0	0	0		
LME016023	0	0	0	0	0	0	0	+++	++++	0	0	0	0	0	*	0	++	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
LME016024	0	0	0	0	0	0	0	+++	++++	0	0	0	0	0	*	0	++	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
<b>++++ (&gt;40%)</b>	<b>+++ (20-40%)</b>						<b>++ (10-20%)</b>					<b>+ (3-10%)</b>			<b>* (&lt; 3%)</b>			<b>? :Dudoso</b>					<b>0 Nada</b>					



MUESTRA	MINERALES DE ARCILLA							SILICATOS					SULFUROS		CARBONATOS			SULFATOS			OXIDOS							
	ESMECTITA	CAOLINITA	ILLITA	PARAGONITA	PIROFILITA	CLORITA	CLORITOIDE	CUARZO	ALBITA	FELDESPATOS	ANFIBOLES	GRANATE	EPIDOTA	MARCASITA	PIRITA	CALCITA	DOLOMITA	ANKERITA	JAROSITA(ND)	ANHIDRITA	YESO	MAGNETITA	HEMATITA	GOETHITA	ANATASA	RUTILIO	AMORFO	OTROS
LME022001	0	0	++	0	0	0	0	++	++	0	0	0	0	0	*	+	++++	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
LME022002	0	0	*	0	0	*	0	+++	++++	0	0	0	0	0	+	++	0	0	0	0	*	0	0	0	0	0	0	0
LME022003	0	0	*	0	0	*	0	++	+++	0	0	0	0	0	*	+++	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
LME022004	0	0	*	0	0	*	0	+	+++	0	0	0	0	0	*	++++	+	0	0	0	*	0	0	0	0	0	0	0
LME022005	0	0	*	0	0	*	0	+	++	0	0	0	0	0	+	++++		0	0	0	*	0	0	0	0	0	0	0
LME022006	0	0	*	0	0	*	0		++	0	0	0	0	0	++	+++	+	0	0	0	*	0	0	0	0	0	0	0
LME022007	0	0	*	0	0	*	0	++++	+++	0	0	0	0	0	*	++++	*	0	0	0	+	0	0	0	0	0	0	0
LME022008	0	0	+	0	0	0	0	++	+	0	0	0	0	0	*	++	++++	0	0	0	*	0	0	0	0	0	0	0
LME022009	0	0	*	0	0	*	0	++	++	0	0	0	0	0	+	+++	+++	0	0	0	*	0	0	0	0	0	0	0
LME022010	0	0	*	0	0	0	0	*	*	0	0	0	0	0		++++	++	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
LME022011	0	0	*	0	0	*	0	++	0	0	0	0	0	0	*	*	++++	0	0	0	*	0	0	0	0	0	0	0
LME022012	0	0	*	0	0	0	0	+	++++	0	0	0	0	0	*	+	++	0	0	0	*	0	0	0	0	0	0	0
LME022013	0	0	0	0	0	0	0	*	*	0	0	0	0	0		++++	*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
LME022014	0	0	0	0	0	0	0	+++	+++	0	0	0	0	0	*	+++	*	0	0	0	*	0	0	0	0	0	0	0
LME022015	0	0	0	0	0	0	0	+	++++	0	0	0	0	0	*	++++	*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
LME022016	0	0	*	0	0	0	0	++	+++	0	0	0	0	0	*	++	+++	0	0	0	*	0	0	0	0	0	0	0
LME022018	0	0	*	0	0	0	0		+	0	0	0	0	0	*	++	++++	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
LME022019	0	0	*	0	0	0	0	+++	+++	0	0	0	0	0		+	+++	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
LME022020	0	*?	*	0	0	*	0	++	++++	0	0	0	0	0	+	++	+++	+	0	0	+	0	0	0	0	0	0	0
LME022021	0	0	++	0	0	*	0	++++	+++	0	0	0	0	0	+			0	0	0	+	0	0	0	0	0	0	0
LME023001	0	0	*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	++++	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
LME023002	0	0	+	0	0	*	0	+	+++	0	0	0	0	0	+	+++	++++	+	0	0	*	0	0	0	0	*		
LME023003	0	0	+	0	0	0	0	*	++++	0	0	0	0	0	+	++	++++	*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
LME023004	0	0	*	0	0	0	0	+	++++	0	0	0	0	0	+	++++	+++	*	0	0	+	0	0	0	0	*		
LME023005	0	0	*	0	0	*	0	+	++	0	0	0	0	0	*	++++	+++	*	0	0	*	0	0	0	0	0	0	0
LME024001	0	0	+	0	0	+	0	++	++++	0	0	0	0	0	+		+++	++	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
LME024002	0	0	++	0	0	+	0	+++	+++	0	0	0	0	0	+	*	+++	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
LME024003	0	0	+	0	0	*	0	++	++	0	0	0	0	0	+	+++	+++	+++	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
LME024004	0	0	+	0	0	0	0	*	++++	0	0	0	0	0		+	++++	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
LME024005	0	0	*	0	0	0	0	*	+	0	0	0	0	0	*	*	++++	++	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>++++ (&gt;40%)</b>	<b>+++ (20-40%)</b>							<b>++ (10-20%)</b>					<b>+ (3-10%)</b>			<b>* (&lt; 3%)</b>			<b>? : Dudoso</b>					<b>0 Nada</b>				



MUESTRA	MINERALES DE ARCILLA						SILICATOS						SULFUROS		CARBONATOS			SULFATOS			OXIDOS					AMORFO	OTROS
	ESMECTITA	CAOLINITA	ILLITA	PARAGONITA	PIROFILITA	CLORITA	CLORITOIDE	CUARZO	ALBITA	FELDESPATOS	ANFIBOLES	GRANATE	EPIDOTA	MARCASITA	PIRITA	CALCITA	DOLOMITA	ANKERITA	JAROSITA(ND)	ANHIDRITA	YESO	MAGNETITA	HEMATITA	GOETHITA	ANATASA		
LME027019	0	0	+	0	0	0	0	*	++++	0	0	0	0	0	*	*	++	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
LME027020	0	0	++	0	0	*	0	++	+	0	0	0	0	0	+	++++	+	0	0	0	*	0	0	0	0	0	0
LME027021	0	0	*	0	0	0	0	0	++++	0	0	0	0	0	+		*	0	0	0	*	0	0	0	0	0	0
LME027022	0	0	+	0	0	*	0	0	++	0	0	0	0	0	*	++++	++++	++	0	0	+	0	0	0	0	0	0
LME027023	0	0	*	0	0	*	0	0	++++	0	0	0	0	0		*	0	0	0	0	+	0	0	0	0	0	0
LME027024	0	0	++	0	0	*	0	++	+	0	0	0	0	0	*	++++	++++	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
LME027025	0	0	-	0	0	0	0	++	++++	0	0	0	0	0	++	++++	++	0	0	0	+	0	0	0	0	0	0
LME028001	+	0	+	0	0	*	0	+	++++	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Piroxeno?
LME029001	0	0	+	0	+	0	0	++++	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	*	Granate?
LME030001	0	0	0	0	0	0	0	+	++++	0	0	0	0	0	+	+++	0	0	0	0	*	0	0	0	0	0	0
LME030002	0	0	0	0	0	0	0	*	++++	0	0	0	0	0	+	++++	++	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
LME030003	0	0	0	0	0	0	0	0	*	0	0	0	0	0	0	++++	++	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Fluorita*?
LME030004	0	0	0	0	0	*	0	0	++++	0	0	0	0	0	+	+++	++	0	0	0	+	0	0	0	0	0	0
LME030005	0	0	*	0	0	*	0	+	+++	0	0	0	0	0	+	++++	++	0	0	0	+	0	0	0	0	0	0
LME030006	0	0	0	0	0	0	0	0	*	0	0	0	0	0	0	++++	*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
LME030007	0	0	+	0	0	0	0	+	++++	0	0	0	0	0	*	0	++	+	0	0	*	0	0	0	0	0	0
LME030008	0	0	+	0	0	*?	0	+++	++++	0	0	0	0	0	*	0	+++	*?	0	0	+	0	0	0	0	0	0
LME030009	0	0	+	0	0	0	0	*	++	0	0	0	0	0	+	+	++++	0	0	+	0	0	0	0	0	0	0
LME030010	0	0	++	0	0	0	0	++	++	0	0	0	0	0	*	+++	+	0	0	0	*	0	0	0	0	0	0
LME030011	*	0	*	0	0	0	0	+	++++	0	0	0	0	0	*	++	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
LME030012	0	0	0	0	0	0	0	*	*	0	0	0	0	0	0	++++	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
LME030013	0	0	0	0	0	0	0	0	+	0	0	0	0	0	*	++++	*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
LME030014	0	0	0	0	0	0	0	0	++++	0	0	0	0	0	*	+++	+++	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
LME030015	0	0	0	0	0	0	0	0	+++	0	0	0	0	0	*?	++	+++	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
LME030016	0	0	++	0	0	0	0	0	++++	0	0	0	0	0	++	++	0	0	0	0	+	0	0	0	0	0	0
LME030017	0	0	*	0	0	0	0	0	++	0	0	0	0	0	*	++++	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
LME030018	0	0	++	0	0	0	0	++	+++	0	0	0	0	0	+	++++	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
LME030019	0	0	0	0	0	0	0	*?	*	0	0	0	0	0	0	++++	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
LME030019A	0	0	*	0	0	0	0	*?	++	0	0	0	0	0	*	+++	+++	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0
LME030020	0	0	*	0	0	0	0	+	+	0	0	0	0	0	0	+++	+++	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>++++ (&gt;40%)</b>	<b>+++ (20-40%)</b>						<b>++ (10-20%)</b>						<b>+ (3-10%)</b>			<b>* (&lt; 3%)</b>			<b>? :Dudoso</b>					<b>0 Nada</b>			

MUESTRA	MINERALES DE ARCILLA						SILICATOS						SULFUROS		CARBONATOS			SULFATOS			OXIDOS							
	ESMECTITA	CAOLINITA	ILLITA	PARAGONITA	PIROFILITA	CLORITA	CLORITOIDE	CUARZO	ALBITA	FELDESPATOS	ANFIBOLES	GRANATE	EPIDOTA	MARCASITA	PIRITA	CALCITA	DOLOMITA	ANKERITA	JAROSITA(ND)	ANHIDRITA	YESO	MAGNETITA	HEMATITA	GOETHITA	ANATASA	RUTILIO	AMORFO	OTROS
LME030021	0	0	*	0	0	0	0	0	++	0	0	0	0	0	+	++++	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
LME030022	0	0	*	0	0	0	0	++	+	0	0	0	0	0	0	0	+	++++	0	0	0	0	0	0	0	0		
LME030023	0	0	*	0	0	0	0	+	+	0	0	0	0	0	*	++++	+	++?	0	0	0	0	0	0	0	0		
LME030024	0	0	++	0	0	*	0	++++	+	0	0	0	0	0	+	+	0	++	0	0	*	0	0	0	0	0		
LME030025T	0	0	+	+	0	0	0	++	0	0	0	0	0	0	*	+++	*	*	0	0	0	0	0	0	0	0		
LME030025V	0	0	++	++	0	0	0	*	0	0	0	0	0	0	0	++++	0	+	0	0	0	0	0	0	0	0		
LME030026	0	0	+++	++	0	0	0	0	+++	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
LME030027	0	0	0		0	0	0	0	++++	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
LME030028	0	0	++	+	0	+	0	++++	++	0	0	0	0	0	*	0	*	0	0	0	*	0	0	0	0	0		
LME030029	0	0	+	*	0	+	0	++++	0	0	0	0	0	0	0	++	*	++++	0	0	0	0	0	0	0	0		
LME030030	0	0	+++	++	0	++	0	++++	++	0	0	0	0	0	+	0	0	0	0	0	*	0	0	0	0	0		Siderita+?
LME030031	0	0	0		0	0	0	++++	0	0	0	0	0	0	0	*	0	++?	0	0	0	0	0	0	0	0		
LME030032	0	0	+++	+	0	++	0	++++	0	0	0	0	0	0	+	*	0	0	0	0	*	0	0	0	0	0		
LME030033	0	0	0		0	0	0	++++	0	0	0	0	0	0	0	*?	0	++	0	0	0	0	0	0	0	0		
LME030034	0	0	++++	++	0	+	0	+++	++	0	0	0	0	0	+	+	0	0	0	0	*	0	0	0	*	+		
LME030035	0	0	+++	++	0	++	0	++++	0	0	0	0	0	0	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
LME030036	0	0	++	+	0	++	0	++++	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	0	0	0	0	*		
LME030037	0	0	+++	+	0	++	0	++++	0	0	0	0	0	0	+	+++	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
LME030038	0	0	+	*	0	+	0	++++	0	0	0	0	0	0	*	0	0	+	0	0	0	0	0	0	0	0		
LME031001	0	0	-	0	0	0	0	*	*	0	0	0	0	0	0	++++	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
LME031002	0	0	*	0	0	0	0	++	+	0	0	0	0	0	0	++++	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		aragonito ++
LME032001	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	++++	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
LME032002	0	0	0	0	0	0	0	++++	++	0	0	0	0	0	0	++++	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
LME032003	0	0	0	0	0	0	0	+	++	0	0	0	0	0	0	++++	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
LME032004	*	0	*	0	0	0	0	+	++++	0	0	0	0	0	0	++++	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
LME032005	0	0	*	0	0	0	0	*	+	0	0	0	0	0	0	++++	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
LME032006	0	0	0	0	0	0	0	++++	+	0	0	0	0	0	*	++++	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
LME032007	*	0	*	0	0	0	0	++++	++++	0	0	0	0	0	*	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
LME032008	0	0	0	0	0	0	0	*	0	0	0	0	0	0	0	++++	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
LME032009	0	0	+	0	0	*	0	++	++++	0	0	0	0	0	+	+++	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
<b>++++ (&gt;40%)</b>	<b>+++ (20-40%)</b>						<b>++ (10-20%)</b>						<b>+ (3-10%)</b>			<b>* (&lt; 3%)</b>			<b>? :Dudoso</b>					<b>0 Nada</b>				

MUESTRA	MINERALES DE ARCILLA							SILICATOS						SULFUROS		CARBONATOS			SULFATOS			OXIDOS							
	ESMECTITA	CAOLINITA	ILLITA	PARAGONITA	PIROFILITA	CLORITA	CLORITOIDE	CUARZO	ALBITA	FELDESPATOS	ANFIBOLES	GRANATE	EPIDOTA	MARCASITA	PIRITA	CALCITA	DOLOMITA	ANKERITA	JAROSITA(ND)	ANHIDRITA	YESO	MAGNETITA	HEMATITA	GOETHITA	ANATASA	RUTILO	AMORFO	OTROS	
LME032010	*	0	*	0	0	0	0	++++	++	0	0	0	0	0	*	+++	*	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
LME032011	*	0	*	0	0	0	0	++++	++	0	0	0	0	0	0	+++	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
LME032012	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+++	*	0	0	0	0	0	0	0	0	0		Fluorita ?*	
LME032013	0	0	0	0	0	0	0	++++	+	0	0	0	0	0	0	++++	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
LME032014	0	0	0	0	0	0	0	++++	++	0	0	0	0	0	0	++++		0	0	0	0	0	0	0	0	0			
LME032015	0	0	*	0	0	0	0	++++	++	0	0	0	0	0	+	++++	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
LME032016	0	0	0	0	0	0	0	++++	++	0	0	0	0	0	0	++++	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
LME032017	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	++++	*	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
LME033001	0	0	*	0	0	0	0	++++	*	0	0	0	0	0	0	++++	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
LME034001	0	0	*	0	0	0	0	+	*	0	0	0	0	0	0	++++	++	*	0	0	0	0	0	0	0	0		Fluorita+	
LME034002	0	0	*	0	0	0	0	++++	+	0	0	0	0	0	*	++++	*	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
LME035001	0	0	*	0	0	0	0	++++	+	0	0	0	0	0	*	++++	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
LME035002	0	0	*	0	0	0	0	++++	+	0	0	0	0	0	0	++	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
LME035003	0	0	*	0	0	0	0	++++	+	0	0	0	0	0	0	+++	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	*		
LME035004	0	0	*	0	0	0	0	++++	+	0	0	0	0	0	0	++++	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
LME035005	0	0	0	0	0	0	0	++	+	0	0	0	0	0	0	++++	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
LME035006	*	0	*	0	0	0	0	++	++++	0	0	0	0	0	0	+++	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
PaJR001g	0	0	++	*	0	0	0	++++	0	0	0	0	0	0	*	++++	0	0	0	0	*	0	0	0	0	0			
PaJR005g	0	0	++	*	0	*	0	++++	0	0	0	0	0	0	*	*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	*		
PaJR010g	0	0	++	*	0	++	0	++++	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	*		
PaJR015g	0	0	++		0	++	0	++++	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	*		
PaJR017g	0	0	++		0	++	0	++++	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	*		
PaJR020g	0	0	++		0	++	0	++++	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	*		
PaJR025g	0	0	++		0	++	0	++++	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	*		
PaJR031g	0	0	++		0	++	0	++++	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	*		
PaJR037g	0	0	++		0	0	0	++++	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	*		
PaJR040g	0	0	++		0	+++	0	++++	0	0	0	0	0	0	0	++	0	0	0	0	*	0	0	0	0	*			
PaJR042g	0	0	++		0	++	0	++++	0	0	0	0	0	0	+	+	0	0	0	0	*	0	0	0	0	*			
PaJR048g	0	0	++		0	+	0	++++	0	0	0	0	0	0	*?	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	*			
PaJR052g	0	0	++	??	0	0	0	++++	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	*			
++++ (>40%)	+++ (20-40%)			++ (10-20%)						+ (3-10%)			* (< 3%)			?:Dudoso			0 Nada										

MUESTRA	MINERALES DE ARCILLA						SILICATOS						SULFUROS		CARBONATOS			SULFATOS			OXIDOS					AMORFO	OTROS		
	ESMECTITA	CAOLINITA	ILLITA	PARAGONITA	PIROFILITA	CLORITA	CLORITOIDE	CUARZO	ALBITA	FELDSPATO	ANFIBOLES	GRANATE	EPIDOTA	MARCASITA	PIRITA	CALCITA	DOLOMITA	ANKERITA	JAROSITA	ANHIDRITA	YESO	MAGNETITA	HEMATITA	GOETHITA	ANATASA			RUTILIO	
PaJR053g	0	0	++		0	0	0	+++	+++	0	0	0	0	0	0	+++	0	0	0	0	0	++	0	0	0	0	0		
PaJR056g	0	0	++		0	0	0	*	++++	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
PaJR057g	0	0	+		0	0	0	*	++++	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
PaJR058g	0	0	++		0	0	0	++++	*?	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
PaJR060g	0	0	+	+	0	0	0	++	0	0	0	0	0	0	*	++++	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
PaJR061g	0	0	++		0	0	0	*?	++++	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
PaJR065g	0	0	++		0	0	0	0	++++	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
BCMM001g	0	0	++	+	0	0	0	++++	+	0	0	0	0	0	+	0	0	0	*	0	0	0	0	0	0	0	0		
BCMM015g	0	0	+		0	+++	0	++++	0	0	0	0	0	0	*	0	0	0	0	0	+	0	0	0	0	0	*?		
BCMM022g	0	0	++	*?	0	+	0	++++	0	0	0	0	0	0	+	++	*	0	0	0	+	0	0	0	0	0	0		
BCMM027g	0	0	++	*	0	*	0	++++	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
BCMM034g	0	0	++		0	+++	0	++++	0	0	0	0	0	0	*	++	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	*?		
BCMM039g	0	0	++		0	+	0	++++	0	0	0	0	0	0	*	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	*		
BCMM048g	0	0	+++	+	0	0	0	++++	0	0	0	0	0	0	*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	*		
BCMM055g	0	0	+++	+	0	0	0	++++	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	*		
BCMM061g	0	0	+++	+	0	0	0	++++	*?	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	*		
BCMM068g	0	0	++	*	0	0	0	++++	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	*?		
BCMM076g	0	0	+++	+	0	0	0	++++	0	0	0	0	0	0	*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	*		
BCMM085g	0	0	++	+	0	*	0	++++	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	*		
BCMM086g	0	0	++	*?	0	+	0	+++	0	0	0	0	0	0	0	+++	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
BCMM090g	0	0	++	*	0	++	0	+++	0	0	0	0	0	0	*	++++	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
BCMM096g	0	0	+	0	0	+	0	++++	0	0	0	0	0	0	*	++++	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
BCMM099g	0	0	++	0	0	++	0	++++	0	0	0	0	0	0	0	+++	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
BCMM105g	0	0	++	*	0	++	0	++++	0	0	0	0	0	0	0	++++	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
BCMM111g	0	0	++	*	0	+	0	++++	0	0	0	0	0	0	*	++++	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	*		
BCMM125g	0	0	+++	0	0	0	0	++++	0	0	0	0	0	0	*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	*		
BCMM134g	0	0	+++	0	0	0	0	++++	0	0	0	0	0	0	*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	*		
BCMM138g	0	0	++	0	0	+	0	++++	0	0	0	0	0	0	*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	*		
BCMM151g	0	0	++	0	0	*	0	++++	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	*		
BCMM161g	0	0	++	0	0	+++	0	++++	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	*		
BCMM180g	0	0	++	0	0	++	0	++++	0	0	0	0	0	0	*	*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	*		
BCMM189g	0	0	++	0	0	+++	0	++++	0	0	0	0	0	0	*	*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	*		
BCMM203g	0	0	++	1	0	+	0	++++	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	*		
++++ (>40%)	+++ (20-40%)						++ (10-20%)						+ (3-10%)			* (< 3%)			?:Dudoso					0 Nada					

**Anexo 2. Resumen de las muestras analizadas, su ubicación y tipo de análisis realizado. COT: Carbono Orgánico Total, RE: Rock Eval, IC: Índice de Cristalinidad Medido, IC PRED: Índice de Cristalinidad Predicho.**

FORMACION	EDAD	LOCALIZACIÓN	MUESTRA	X	Y	ANALISIS REALIZADOS
CORDOBA	CAMPANIANO	Sección Otanche-EI Encanto	TGN22-02-06/9			COT, RE
GRUPO OLINI	CAMPANIANO		TGN21-02-06/5			COT, RE
	SANTONIANO		TGN19-02-06/5			COT, RE, Ro
UNIDAD INDENOMINADA	Coniaciano		TGN18-02-06/7			COT, RE
LA FRONTERA	TURONIANO-CONIACIANO	Vereda yasol (La Victoria)	LME019002	1101612	975209	COT, RE
LA FRONTERA- ND		Mina 'la Páta'	LME017005	1089339	960415	COT, RE
HILO	ALBIANO MEDIO	Vereda El Ramal (Yacopí)	LME013001	1100732	978402	IC
OTANCHE		Tunel 'El Encanto' (Otanche)	LME045002	1118749	982544	COT, RE
PACHO		Q. El Cedro (La Corona, La Victoria)	LME045005	1118749	982544	COT, RE
			CJE019002	1103494	984530	IC PRED
			LME020001	1103494	984530	COT, RE, IC PRED
			LME021002	1103494	984530	IC PRED
			LME021003	1103494	984530	IC PRED
			LME021004	1103494	984530	IC
		Vía Quípama-La Victoria	LME026002	1103650	985233	COT, RE
CAPOTES		APTIANO SUPERIOR	Sección Jerusalén-LaPaz	BCMM001g	1114795	992172
	BCMM015g			1114795	992172	COT, RE
	BCMM022g			1114795	992172	COT, RE, IC PRED
	BCMM027g			1114795	992172	IC
	BCMM034g			1114795	992172	IC PRED
	BCMM039g			1114795	992172	COT, RE, IC PRED
	BCMM048g			1114795	992172	COT, RE, IC
	BCMM055g			1114795	992172	IC
	BCMM061g			1114795	992172	IC
	BCMM068g			1114795	992172	COT, RE, IC PRED
	BCMM076g			1114795	992172	COT, RE, IC
	BCMM085g			1114795	992172	IC
	Vía Yacopí-'La Glorieta'.		LME015001	1095819	972433	COT, RE, IC
	Vía Quípama-Yacopí		LME018003	1103263	972113	COT, RE
	Vía Quípama-Vereda San Luis		LME025002	1105862	985037	IC PRED
			LME025003	1105862	985037	COT, RE, IC PRED
	Q, Tambriás, Vereda Centro, Otanche		LME047004	1116066	988810	COT, RE
	Seccion Pauna-Borbur		PaJR061g	1115509	1002982	COT, RE, IC
PaJR065g		1115509	1002982	COT, RE, IC		
MUZO	HAUTERIVIANO-BARREMIANO	Túnel 'Las Aguilas'	JRE022001	1103436	992050	COT, RE
			JRE022006	1103436	992050	COT, RE
			JRE022007	1103436	992050	COT, RE
			JRE022011	1103436	992050	COT, RE
			JRE022016	1103436	992050	COT, RE
		Vía Pauna-Borbur	LME002001	1114797	1003655	IC
		Vía Quípama-Muzo	LME010001	1102448	994504	IC
			LME010002	1102448	994504	IC PRED
			LME010004	1102448	994504	COT, RE, IC
		Tunel 'La Glorieta' (Yacopí)	LME014001	1095377	973320	COT, RE
			LME014002	1095377	973320	COT, RE
			LME014004	1095377	973320	COT, RE
			LME014007	1095377	973320	COT, RE
			LME014013	1095377	973320	IC PRED
			LME014014	1095377	973320	IC PRED
			LME014015	1095377	973320	IC PRED
		Tunel 'Chirripay' (Yacopí)	LME016001	1092540	971789	COT, RE

FORMACION	EDAD	LOCALIZACIÓN	MUESTRA	X	Y	ANALISIS REALIZADOS
MUZO	HAUTERIVIANO-BARREMIANO	Túnel 'Chirripay' (Yacopí)	LME016003	1092540	971789	IC PRED
			LME016010	1092540	971789	COT, RE
			LME016015	1092540	971789	COT, RE
			LME016020	1092540	971789	IC PRED
			LME016022	1092540	971789	IC PRED
			LME016027	1092540	971789	IC PRED
			LME016028	1092540	971789	COT, RE
			LME016029	1092540	971789	COT, RE
		LME016031	1092540	971789	COT, RE	
		Puerto Arturo, 'Túnel 5' (Muzo)	LME022001	1105066	992099	COT, RE, IC PRED
			LME022007	1105066	992099	COT, RE
			LME022009	1105066	992099	COT, RE
			LME022011	1105066	992099	COT, RE
		LME022021	1105066	992099	COT, RE, IC PRED	
		Cerca a 'Túnel 5' (Muzo)	LME023004	1104558	992123	COT, RE
		Túnel El Limonar (Quípama)	LME024001	1105825	984294	COT, RE
			LME024002	1105825	984294	COT, RE, IC PRED
			LME024004	1105825	984294	COT, RE
			LME024008	1105825	984294	COT, RE, IC PRED
			LME024009	1105825	984294	COT, RE
			LME024011	1105825	984294	COT, RE
			LME024012	1105825	984294	IC PRED
			LME024013	1105825	984294	COT, RE
		Túnel Las Pavas (Muzo)	LME027002	1105528	990647	COT, RE
			LME027006	1105528	990647	IC PRED
			LME027011	1105528	990647	IC PRED
			LME027012	1105528	990647	COT, RE
			LME027017	1105528	990647	IC PRED
			LME027018	1105528	990647	IC PRED
			LME027019	1105528	990647	COT, RE
			LME027020	1105528	990647	IC PRED
		LME027024	1105528	990647	IC PRED	
		LME027025	1105528	990647	COT, RE	
		Via Puerto Arturo-Repollal	LME028001	1105185	992140	COT, RE
		Túnel 'la Paz' (Coscuez)	LME030001	1115759	991822	COT, RE
			LME030002	1115759	991822	COT, RE
			LME030008	1115759	991822	COT, RE
			LME030009	1115759	991822	COT, RE
			LME030010	1115759	991822	IC PRED
			LME030011	1115759	991822	COT, RE
			LME030014	1115759	991822	COT, RE
			LME030016	1115759	991822	COT, RE, IC PRED
			LME030018	1115759	991822	IC PRED
LME030024	1115759		991822	IC PRED		
LME030025V	1115759		991822	IC PRED		
LME030026	1115759		991822	IC		
LME030028	1115759		991822	IC		
LME030030	1115759		991822	IC		
LME030032	1115759		991822	IC		
LME030034	1115759	991822	COT, RE, IC PRED			

FORMACION	EDAD	LOCALIZACIÓN	MUESTRA	X	Y	ANALISIS REALIZADOS	
MUZO	HAUTERIVIANO-BARREMIANO	Tunel 'la Paz' (Coscuez)	LME030035	1115759	991822	IC	
			LME030036	1115759	991822	IC	
			LME030037	1115759	991822	IC PRED	
		Nivel 3' (Peña Coscuez)	LME038001	1114737	991525	COT, RE	
			LME038002	1114737	991525	COT, RE	
			LME038003	1114737	991525	COT, RE	
		Vereda 'Sabripa Viejo' (Muzo)	LME044002	111376	979874	COT, RE	
			Seccion Pauna-Borbur	PaJR053g	1115509	1002982	COT, RE, IC PRED
				PaJR056g	1115509	1002982	COT, RE, IC
				PaJR057g	1115509	1002982	COT, RE
PaJR058g	1115509	1002982		COT, RE, IC			
FURATENA	VALANGINIANO (K4)	Sección Borbur-Q. Buriburi	BCMM086g	1119540	1001320	IC PRED	
			BCMM090g	1119540	1001320	IC PRED	
			BCMM099g	1119540	1001320	IC PRED	
			BCMM111g	1119540	1001320	COT, RE, IC PRED	
			BCMM125g	1119540	1001320	IC	
			BCMM134g	1119540	1001320	COT, RE, Ro, IC PRED	
			BCMM138g	1119540	1001320	IC	
			BCMM151g	1119540	1001320	IC	
			BCMM161g	1119540	1001320	IC	
			BCMM180g	1119540	1001320	COT, RE, IC PRED	
			BCMM189g	1119540	1001320	COT, RE, IC PRED	
			BCMM203g	1119540	1001320	IC	
		Vía Pauna-Borbur	LME003001	1114797	1002986	COT, RE, IC PRED	
		Vía Borbur-Q. Buriburi	LME004001	1119437	1001410	COT, RE	
		Cerro 'El Tigre' (vía Quípama-Otanche)	LME007001	1109365	993537	COT, RE, IC	
			LME007002	1109365	993537	IC	
		Vía Quípama-Otanche	LME008001	1109607	996511	COT, RE, IC	
		Seccion Pauna-Borbur	PaJR001g	1115509	1002982	IC PRED	
			PaJR005g	1115509	1002982	COT, RE, IC	
			PaJR010g	1115509	1002982	IC	
			PaJR015g	1115509	1002982	COT, RE, IC	
			PaJR017g	1115509	1002982	IC	
			PaJR020g	1115509	1002982	IC PRED	
			PaJR025g	1115509	1002982	COT, RE, IC	
			PaJR031g	1115509	1002982	IC	
			PaJR037g	1115509	1002982	IC	
PaJR040g	1115509		1002982	IC PRED			
PaJR042g	1115509		1002982	COT, RE, IC PRED			
PaJR048g	1115509		1002982	COT, RE, IC			
PaJR052g	1115509	1002982	IC				
ROSABLANCA	VALANGINIANO (K3)	Sección Borbur-Q. Buriburi	BCMM096g	1119540	1001320	COT, RE	
			BCMM105g	1119540	1001320	COT, RE, IC PRED	
		Tunel 'Pedro Nel' (Peñas Blancas)	LME032004	1123600	999738	COT, RE	
			LME032010	1123600	999738	COT, RE	
		Túnel '00'(Peñas Blancas)	LME035006	1123674	999747	COT, RE	
		Tunel 'La Polonia' (Peñas Blancas)	LME036015	1124734	1001646	COT, RE	
		Tunel 'El Trapiche' (Peñas Blancas)	LME040005	1123593	999326	COT, RE	
			LME040029	1123593	999326	COT, RE	
Seccion Pauna-Borbur	PaJR001g	1115509	1002982	COT, RE			

### Anexo 3. Tabla de Resultados de Pirolysis Rock Eval y COT

MUESTRA	COT Wt. %	S1 mg/g	S2 mg/g	S3 mg/g	Tmax	IH	IO	S1/COT	IP
LME003001	4.3300	0.3596	0.5700	0.2400	405.0000	13.1640	5.5427	8.3042	0.3868
LME004001	2.4000	0.3835	0.6300	0.1900	391.0000	26.2500	7.9167	15.9784	0.3784
LME007001	3.2200	0.2111	0.3100	0.3100	391.0000	9.6273	9.6273	6.5569	0.4051
LME008001	2.2500	0.1543	0.0400	0.5800	346.0000	1.7778	25.7778	6.8574	0.7941
LME010004	7.1800	0.0488	0.1200	0.3800	389.0000	1.6713	5.2925	0.6801	0.2892
LME014001	1.1200	0.2323	0.3400	0.8100	378.0000	30.3571	72.3214	20.7440	0.4059
LME014002	0.4400	0.0953	0.1300	0.2300	395.0000	29.5455	52.2727	21.6657	0.4231
LME014004	1.6700	0.2644	0.2100	0.2400	420.0000	12.5748	14.3713	15.8351	0.5574
LME014007	2.3600	0.2478	0.1700	0.2700	387.0000	7.2034	11.4407	10.4987	0.5931
LME015001	6.1200	0.1559	0.1300	0.6900	405.0000	2.1242	11.2745	2.5481	0.5454
LME016001	1.8700	0.2594	0.2300	0.1400	401.0000	12.2995	7.4866	13.8698	0.5300
LME016010	1.2000	0.3051	0.3200	0.1900	403.0000	26.6667	15.8333	25.4210	0.4880
LME016015	1.8400	0.3737	0.3400	0.2200	413.0000	18.4783	11.9565	20.3118	0.5236
LME016028	2.0000	0.1803	0.1800	0.1900	412.0000	9.0000	9.5000	9.0133	0.5004
LME016029	1.3450	0.0700	0.2150	0.2800	470.0000	15.9851	20.8178	5.2045	0.2456
LME016031	2.9200	0.0798	0.0800	0.3000	315.0000	2.7397	10.2740	2.7315	0.4993
LME017005	4.0200	1.3564	3.4800	0.4500	473.0000	86.5672	11.1940	33.7422	0.2805
LME018003	1.8500	0.0400	0.0300	0.7300	396.0000	1.6216	39.4595	2.1643	0.5717
LME019002	3.1100	0.1496	0.2800	1.1000	400.0000	9.0032	35.3698	4.8087	0.3482
LME020001	1.6300	0.0201	0.0101	0.2820	323.0000	0.6178	17.2990	1.2356	0.6667
LME022001	1.4700	0.2024	0.2000	0.1900	388.0000	13.6054	12.9252	13.7707	0.5030
LME022007	2.2000	0.5799	0.3100	0.1600	408.0000	14.0909	7.2727	26.3572	0.6516
LME022009	2.1100	0.3568	0.2600	0.2700	416.0000	12.3223	12.7962	16.9094	0.5785
LME022011	2.6900	0.3173	0.1900	0.1600	398.0000	7.0632	5.9480	11.7955	0.6255
LME022021	3.5650	0.1678	0.0500	0.3300	350.0000	1.4025	9.2567	4.7074	0.7705
LME023004	2.8400	0.2831	0.2200	0.2200	429.0000	7.7465	7.7465	9.9688	0.5627
LME024001	2.2300	0.2282	0.2700	0.3100	388.0000	12.1076	13.9013	10.2320	0.4580
LME024002	2.6300	0.2016	0.1900	0.1600	344.0000	7.2243	6.0837	7.6659	0.5148
LME024004	1.9600	0.2372	0.2400	0.2200	403.0000	12.2449	11.2245	12.0997	0.4970
LME024008	2.1400	0.2231	0.1500	0.2400	385.0000	7.0093	11.2150	10.4263	0.5980
LME024009	1.8500	0.2973	0.2400	0.2800	381.0000	12.9730	15.1351	16.0716	0.5533
LME024011	1.1700	0.2149	0.0900	0.6100	383.0000	7.6923	52.1368	18.3713	0.7049
LME024013	1.5800	0.1665	0.1000	0.3100	385.0000	6.3291	19.6203	10.5382	0.6248
LME025003	7.7600	0.1996	0.1600	0.6200	356.0000	2.0619	7.9897	2.5722	0.5551
LME026002	2.2200	0.0604	0.1400	1.1000	324.0000	6.3063	49.5496	2.7218	0.3015
LME027002	4.0500	0.2533	0.4700	0.7600	412.0000	11.6049	18.7654	6.2541	0.3502
LME027012	2.1900	0.1500	0.0700	0.3700	384.0000	3.1963	16.8950	6.8493	0.6818
LME027019	4.5000	0.1807	0.1800	0.5800	396.0000	4.0000	12.8889	4.0161	0.5010
LME027025	2.3600	0.1524	0.1900	0.3700	401.0000	8.0508	15.6780	6.4593	0.4452
LME028001	6.0500	0.1822	0.2000	0.5100	314.0000	3.3058	8.4298	3.0113	0.4767
LME030001	2.4400	0.2417	0.2500	0.2200	421.0000	10.2459	9.0164	9.9054	0.4916
LME030002	0.9800	0.1524	0.1800	0.2400	387.0000	18.3673	24.4898	15.5550	0.4585
LME030008	4.0800	0.1898	0.2400	0.3300	392.0000	5.8824	8.0882	4.6522	0.4416
LME030009	2.7800	0.3411	0.2000	0.3000	373.0000	7.1942	10.7914	12.2709	0.6304
LME030011	3.0400	0.2291	0.2200	0.6200	400.0000	7.2368	20.3947	7.5356	0.5101
LME030014	5.6700	0.2840	0.5700	0.4900	430.0000	10.0529	8.6420	5.0084	0.3325
LME030016	4.8300	0.3631	0.5000	0.4900	430.0000	10.3520	10.1449	7.5176	0.4207

MUESTRA	COT Wt. %	S1 mg/g	S2 mg/g	S3 mg/g	Tmax	IH	IO	S1/COT	IP
LME030034	0.9700	0.0404	0.0200	0.3600	373.0000	2.0619	37.1134	4.1612	0.6687
LME032004	1.6600	0.1575	0.1200	0.4200	370.0000	7.2289	25.3012	9.4868	0.5675
LME032010	0.7100	0.0490	0.0900	0.3100	259.0000	12.6761	43.6620	6.9042	0.3526
LME035006	1.4700	0.1636	0.0300	0.3700	293.0000	2.0408	25.1701	11.1292	0.8450
LME036015	4.0300	0.2376	0.2000	0.3200	403.0000	4.9628	7.9404	5.8964	0.5430
LME038001	1.1800	0.0199	0.1300	0.4700	265.0000	11.0169	39.8305	1.6848	0.1326
LME038002	1.7600	0.1416	0.0600	1.1400	430.0000	3.4091	64.7727	8.0430	0.7023
LME038003	1.0400	0.1112	0.0100	0.3000	352.0000	0.9615	28.8462	10.6946	0.9175
LME040005	1.4200	0.1615	0.0800	0.2800	286.0000	5.6338	19.7183	11.3699	0.6687
LME040029	3.6200	0.3438	0.2400	0.5100	403.0000	6.6298	14.0884	9.4976	0.5889
LME044002	6.5000	0.1984	0.1400	0.2800	320.0000	2.1538	4.3077	3.0525	0.5863
LME045002	2.3700	0.2073	0.1800	0.2300	390.0000	7.5949	9.7046	8.7470	0.5353
LME045005	0.6000	0.1072	0.1800	0.2700	341.0000	30.0000	45.0000	17.8687	0.3733
LME047004	4.1800	0.2121	0.1400	0.2100	393.0000	3.3493	5.0239	5.0747	0.6024
JRE022001	2.4600	0.2634	0.0300	0.1700	390.0000	1.2195	6.9106	10.7083	0.8978
JRE022006	2.4800	0.1316	0.0300	0.2700	284.0000	1.2097	10.8871	5.3056	0.8143
JRE022007	4.8100	0.5045	0.3900	0.2500	416.0000	8.1081	5.1975	10.4875	0.5640
JRE022011	7.3700	0.3912	0.1700	0.5400	380.0000	2.3066	7.3270	5.3076	0.6971
JRE022016	7.3000	0.3693	0.1300	0.6100	381.0000	1.7808	8.3562	5.0584	0.7396
PAJR001G	3.9500	0.1308	0.2000	0.2900	425.0000	5.0633	7.3418	3.3110	0.3954
PAJR005G	5.6700	0.0395	0.0900	0.5100	436.0000	1.5873	8.9947	0.6971	0.3052
PAJR015G	1.6800	0.0683	0.0900	0.1200	387.0000	5.3571	7.1429	4.0650	0.4314
PAJR025G	1.1300	0.1043	0.0500	0.1000	305.0000	4.4248	8.8496	9.2270	0.6759
PAJR042G	3.5600	0.0393	0.0700	0.1800	285.0000	1.9663	5.0562	1.1026	0.3593
PAJR048G	3.5100	0.0482	0.0100	0.1400	312.0000	0.2849	3.9886	1.3737	0.8282
PAJR053G	10.9100	0.0288	0.0400	0.4900	285.0000	0.3666	4.4913	0.2639	0.4185
PAJR056G	5.7100	0.0401	0.0600	0.2400	379.0000	1.0508	4.2032	0.7019	0.4005
PAJR057G	2.1100	0.0688	0.0700	0.0700	309.0000	3.3175	3.3175	3.2621	0.4958
PAJR058G	1.3800	0.0595	0.0900	0.2800	428.0000	6.5217	20.2899	4.3090	0.3979
PAJR061G	3.6800	0.0388	0.0400	0.4000	324.0000	1.0870	10.8696	1.0543	0.4924
PAJR065G	3.3800	0.0793	0.0800	0.1200	285.0000	2.3669	3.5503	2.3458	0.4978
BCMM001G	5.2500	0.0288	0.1000	0.2600	277.0000	1.9048	4.9524	0.5495	0.2239
BCMM015G	6.0200	0.0393	0.0600	0.9000	285.0000	0.9967	14.9502	0.6533	0.3960
BCMM022G	3.8900	0.0295	0.0300	0.3000	285.0000	0.7712	7.7121	0.7576	0.4955
BCMM039G	4.7200	0.0481	0.0400	0.5200	324.0000	0.8475	11.0169	1.0186	0.5459
BCMM048G	2.7500	0.0580	0.0800	0.3100	338.0000	2.9091	11.2727	2.1101	0.4204
BCMM068G	2.9800	0.0692	0.0800	0.3100	309.0000	2.6846	10.4027	2.3211	0.4637
BCMM076G	6.8700	0.0297	0.0700	0.4600	413.0000	1.0189	6.6958	0.4328	0.2981
BCMM096G	1.0400	0.0706	0.0500	0.2000	322.0000	4.8077	19.2308	6.7850	0.5853
BCMM105G	1.7500	0.0669	0.0100	0.2600	285.0000	0.5714	14.8571	3.8241	0.8700
BCMM111G	4.1100	0.0195	0.0200	0.1800	324.0000	0.4866	4.3796	0.4747	0.4938
BCMM134G	1.1700	0.0483	0.0200	0.2600	285.0000	1.7094	22.2222	4.1250	0.7070
BCMM180G	1.7800	0.0771	0.1300	0.1000	408.0000	7.3034	5.6180	4.3298	0.3722
BCMM189G	2.4900	0.0492	0.0100	0.2100	262.0000	0.4016	8.4337	1.9764	0.8311
TGN18-02-06/7	1.4000	0.2860	0.1600	0.1300	366.0000	11.4286	9.2857	20.4276	0.6412
TGN19-02-06/5	2.0600	0.0296	0.0800	0.6500	261.0000	3.8835	31.5534	1.4362	0.2700
TGN21-02-06/5	3.0100	0.0098	0.1000	0.8500	444.0000	3.3223	28.2392	0.3251	0.0891
TGN22-02-06/9	2.0800	0.0386	0.1100	0.3200	393.0000	5.2885	15.3846	1.8563	0.2598

## COLUMNA ESTRATIGRÁFICA GENERALIZADA SECCION: PAUNA - SAN PABLO DE BORBUR (BOYACÁ)

