

Estratigrafía y quimioestratigrafía generalizada de la Formación Cretácica Tablazo sección El  
Ramo en el municipio de Betulia (Santander), Cuenca del Valle Medio del Magdalena –  
Colombia

Fabiana Sofía Corredor Santos

Trabajos de grado para optar al título de Geólogo

Modalidad:

Práctica empresarial

Director

Giovanny Jiménez Díaz

PhD. en Geología

Universidad Industrial de Santander  
Facultad de Ingenierías Físicoquímicas  
Escuela de Geología  
Geología  
Bucaramanga  
2024

### **Dedicatoria**

Dedicado en primer lugar a Dios, quien ha sido siempre el centro de mis oraciones, guiándome y manteniéndome alerta en todo momento. Agradezco infinitamente a mis padres, Fabián y Patricia, cuyo amor y sacrificio incondicional han sido el sostén fundamental a lo largo de mi vida estudiantil. A mis hermanas y hermanos, quienes con sus consejos han iluminado cada decisión que he tomado durante mi carrera. A mi pareja, por su constante apoyo y ánimo en los momentos más difíciles. Y a toda mi familia, les expreso mi más profundo agradecimiento; sin su apoyo, este camino no habría sido el mismo.

### **Agradecimientos**

A la UIS y a la ESGEO por haberme permitido crecer profesional y personalmente. Estoy eternamente agradecida por ofrecerme sus espacios para forjar el inicio de mi futuro.

A ECOPETROL por darme la oportunidad de realizar una práctica empresarial para culminar mis estudios profesionales.

Al geólogo Andrés Reyes por confiar en mí y abrirme las puertas al Instituto Colombiano del Petróleo.

Al Ingeniero Hugo García quien fue el primero en recibirme y darme la bienvenida. Su apoyo fue fundamental para realizar todas las actividades durante mi estancia en la empresa.

Al geólogo Felipe de la Parra por acogerme para iniciar esta nueva etapa. Le debo parte de mi aprendizaje profesional y laboral gracias a su mentoría.

A mi director de proyecto Giovanni Jiménez, por su asesoría y orientación durante la realización de este proyecto.

A la Ingeniera Sandra Becerra, quien actuó como una amiga durante mis prácticas y me enseñó el valor de la humildad.

Por último, pero no menos importante, a DIOS, que sigue iluminando cada paso que doy.

**Tabla de Contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	13
1. Objetivos .....	17
1.1 Objetivo General .....	17
1.2 Objetivos Específicos.....	17
2. Justificación .....	18
3. Localización .....	19
4. Marco geológico .....	21
4.1 Estratigrafía.....	21
4.1.1 Formación Tablazo (Kit).....	21
5. Marco Teórico.....	33
5.1 Estratigrafía.....	33
5.1.1 Unidades estratigráficas .....	33
5.1.1.1 Unidades Litoestratigráficas. ....	33
5.1.1.2 Unidades Bioestratigráficas (Biozonas).....	34
5.1.1.3 Unidades Cronoestratigráficas.....	35
5.1.1.4 Unidades Quimioestratigráficas.....	35
5.1.2 Estratigrafía de secuencias .....	35
5.1.2.1 Transgresión, regresión y regresión forzada .....	35
5.1.3 Ciclos sedimentarios .....	36
5.1.4 Parasecuencias .....	37
5.2 Quimioestratigrafía .....	37

5.2.1 Proveniencia sedimentaria .....	38
5.2.2 Condiciones redox .....	39
5.2.3 Condiciones paleoambientales.....	40
6. Metodología .....	42
6.1 Fase de compilación bibliográfica .....	43
6.2 Fase de trabajo de campo.....	43
6.2.1 Gamma Ray Spectral (GRS).....	45
6.3 Fase de laboratorio y trabajo de oficina.....	46
6.3.1 Análisis químicos.....	47
6.3.1.1 Difracción de Rayos X (DRX).....	47
6.3.1.2 Fluorescencia de Rayos X (XRF). .....	47
6.4 Fase de análisis de resultados .....	49
7. Resultados .....	49
7.1 Caracterización estratigráfica Formación Tablazo sección El Ramo .....	49
7.1.1 Superficies de inundación .....	56
7.2 Mineralogía por Difracción de Rayos X.....	56
7.3 Química elemental por Fluorescencia de Rayos X.....	62
7.3.1 Elementos mayores .....	62
7.3.2 Elementos menores y traza .....	65
7.4 Gamma Ray Espectral.....	68
8. Análisis de resultados .....	70
8.1 Evaluación y clasificación mineralógica por DRX.....	70
8.2 Variación y correlación.....	72

8.3 Proveniencia sedimentaria .....	87
8.4 Condiciones paleoambientales.....	89
8.5 Análisis Gamma Ray Spectral .....	92
8.6 Zonas quimioestratigráficas .....	94
9. Conclusiones .....	101
Referencias Bibliográficas .....	105
Apéndices.....	114

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Características litoestratigráficas de la Fm. Tablazo (El Ramo) .....	49
Tabla 2. Ubicación estratigráfica superficies de inundación, Fm. Tablazo (El Ramo) .....	56
Tabla 3. Media de la proporción de las fases minerales (bulk) en la sección El Ramo.....	58
Tabla 4. Valores promedio para las fases minerales a nivel de arcilla de la Fm. Tablazo .....	60
Tabla 5. Concentración de elementos mayores (%w) en la Formación Tablazo - El Ramo .....	63
Tabla 6. Concentraciones de elementos menores (ppm) presentes en el Tablazo – El Ramo .....	65
Tabla 7. Concentraciones promedio de los isótopos (K, U, Th) y del GR .....	68
Tabla 8. Concentraciones elementales medias para cada zona quimioestratigráfica definida en la columna Tablazo - El Ramo .....	99

### Lista de Figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Reconstrucción paleotectónica del Cretácico, incluyendo las paleo-posiciones relativas de América del Norte y del Sur.....	15
Figura 2. Esquema reconstrucción paleotectónica del occidente de Colombia (115-105 Ma).....	16
Figura 3. Localización regional y local del área de estudio.....	19
Figura 4. Columna estratigráfica generalizada de la Formación Tablazo en la sección tipo.....	28
Figura 5. Ubicación de los segmentos de la sección tipo (cerro El Tablazo) de la Formación Tablazo.....	30
Figura 6. Ubicación de la Formación Tablazo sección El Ramo.....	31
Figura 7. Localización de la sección tipo y la sección Tablazo-El Ramo .....	32
Figura 8. Diagrama metodológico para realizar el respectivo estudio.....	42
Figura 9. Comparación del espectro representativo para EDXRF y WDXRF .....	48
Figura 10. Segmento uno (I) del afloramiento Tablazo – El Ramo.....	52
Figura 11. Segmento dos (II) de la Formación Tablazo - El Ramo.....	54
Figura 12. Segmento tres (III) del afloramiento Tablazo - El Ramo .....	55
Figura 13. Distribución de fases minerales encontradas en el afloramiento Tablazo – El Ramo.	58
Figura 14. Distribución de la mineralogía en la fracción <2 µm del afloramiento Tablazo – El Ramo.....	61
Figura 15. Distribución de elementos mayores del afloramiento Tablazo – El Ramo .....	63
Figura 16. Distribución de elementos menores en la Formación Tablazo (El Ramo).....	67
Figura 17. Perfiles espectrales de radiación gamma (GR) de U, Th, K y total.....	69

Figura 18. Clasificación mineralógica roca total afloramiento Tablazo - El Ramo .....	71
Figura 19. Variación de elementos mayores de la Formación Tablazo – El Ramo.....	73
Figura 20. Correlación de las tendencias en las concentraciones relativas del aporte SiO <sub>2</sub> y CaO por XRF vs DRX en el afloramiento Tablazo – El Ramo .....	76
Figura 21. Correlaciones químicas para el segmento I de la Fm. Tablazo - El Ramo.....	79
Figura 22. Correlaciones químicas para el segmento II de la Fm. Tablazo - El Ramo .....	80
Figura 23. Correlaciones químicas para el segmento III de la Fm. Tablazo - El Ramo.....	82
Figura 24. Relación Si/Al del afloramiento Tablazo – El Ramo .....	84
Figura 25. Correlación SiO <sub>2</sub> vs Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> del afloramiento Tablazo – El Ramo .....	86
Figura 26. Relación Cr/Th para discriminar la proveniencia de las rocas de la Fm. Tablazo .....	87
Figura 27. Relación Al/(Al+Fe+Mn) en el afloramiento Tablazo – El Ramo.....	89
Figura 28. Variaciones de Sr, CaO y relación Sr/Ca en la Fm. Tablazo .....	91
Figura 29. Análisis relación Th/U de la Fm. Tablazo - El Ramo .....	92
Figura 30. Perfiles geoquímicos de elementos mayores, traza y sus relaciones para el afloramiento Tablazo – El Ramo.....	95

**Lista de Apéndices**

	<b>pág.</b>
Apéndice A. Posición estratigráfica de las muestras de roca Formación Tablazo – El Ramo ...	114
Apéndice B. Columna estratigráfica de la Formación Tablazo sección El Ramo .....	115

## Resumen

**Título:** Estratigrafía y quimioestratigrafía generalizada de la Formación Cretácica Tablazo sección El Ramo en el municipio de Betulia (Santander), Cuenca del Valle Medio del Magdalena – Colombia\*

**Autor:** Fabiana Sofía Corredor Santos\*\*

**Palabras Clave:** Cretácico, Formación Tablazo, Quimioestratigrafía, Estratigrafía.

**Descripción:** Se realizó un estudio quimioestratigráfico (con atributos químicos elementales) con el fin de generar una herramienta que sea útil para establecer correlaciones estratigráficas y determinar la proveniencia sedimentaria en secuencias donde el control bioestratigráfico sea mínimo. Para ello, se levantó una columna estratigráfica de la Formación Tablazo en la sección El Ramo a escala 1:100 y se tomaron datos de Gamma Ray Spectral. Las muestras se analizaron mediante la técnica de difracción de rayos x y fluorescencia de rayos x. A partir de la abundancia de elementos mayores, menores y fases mineralógicas se lograron identificar 3 segmentos litoestratigráficos informales y se establecieron tres zonas y cinco subzonas quimioestratigráficas claramente diferenciables. En el segmento I se encuentran las subzonas quimioestratigráficas A1 y A2, asociadas a una mineralogía mixta; el intervalo II compuesto por la quimiozona B, refleja mineralogía cuarzo arcillosa y el segmento III incluye las subzonas C1, C2 y C3, con mineralogía cuarzosa rica en carbonatos. Las bajas relaciones Cr/Th ( $< 15$ ) permitieron establecer que los sedimentos tuvieron un aporte de roca félsica a intermedia. Por otro lado, la relación  $Al/(Al+Fe+Mn) > 0.2$  indica que los sedimentos se depositaron bajo aportes detríticos. Finalmente, la relación Th/U ofrece información acerca de las condiciones paleoambientales. En este sentido, los valores en la quimiozona A indican un ambiente inter y supramareal, la quimiozona B sugiere un ambiente intermareal y la quimiozona C se asocia con ambiente submareal a intermareal. Se espera que estas quimiozonas sirvan como herramienta para futuras correlaciones.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología. Programa de Geología. Director: Giovanni Jiménez Díaz. PhD. en Geología.

### Abstract

**Title:** Stratigraphy and generalized chemostratigraphy of the Cretaceous Tablazo Formation, El Ramo section, in the municipality of Betulia (Santander), Middle Magdalena Valley Basin - Colombia\*

**Author(s):** Fabiana Sofía Corredor Santos\*\*

**Key Words:** Cretaceous, Tablazo Formation, Chemostratigraphy, Stratigraphy.

**Description:** A chemostratigraphic study (utilizing elemental chemical attributes) was conducted to generate a tool useful for establishing stratigraphic correlations and determining sedimentary provenance in sequences where biostratigraphic control is minimal. To achieve this, a stratigraphic column of the Tablazo Formation in the El Ramo section was surveyed at a 1:100 scale, and data from Gamma Ray Spectral were collected. Samples were analyzed using X-ray diffraction and X-ray fluorescence techniques. Based on the abundance of major and minor elements, as well as mineralogical phases, three informal lithostratigraphic segments were identified, and three zones with five clearly distinguishable chemostratigraphic subzones were established. In segment I, the chemostratigraphic subzones A1 and A2 were identified, associated with mixed mineralogy; interval II, composed of the B chemozone, reflects quartz clayey mineralogy, and segment III includes the subzones C1, C2, and C3, with quartz-rich mineralogy rich in carbonates. Low Cr/Th ratios ( $< 15$ ) indicated that the sediments had a contribution from felsic to intermediate rock. On the other hand, the  $Al/(Al+Fe+Mn)$  ratio  $> 0.2$  indicates that the sediments were deposited under detrital inputs. Finally, the Th/U ratio provides information about paleoenvironmental conditions. In this regard, values in chemozone A indicate an inter- and supratidal environment, chemozone B suggests an intertidal environment, and chemozone C is associated with a subtidal to intertidal environment. It is expected that these chemozones will serve as a tool for future correlations.

---

\* Degree Work

\*\* Faculty of Physics Chemical Engineering. Geology's School. Geology Program. Director: Giovanni Jiménez Díaz. PhD. in Geology

## Introducción

El periodo Cretácico, comprendido entre los 145 y 66 Ma se caracterizó por la ocurrencia de cambios climáticos globales debidos principalmente a la fragmentación de Pangea, que resultó en la formación de cuencas tipo rift, una intensa expansión oceánica, formación de corteza y una actividad volcánica significativa (Föllmi, 2011). El clima variaba entre condiciones áridas y húmedas. Las condiciones áridas se relacionaban con la evaporación, una baja tasa de meteorización biogeoquímica y un flujo de nutrientes reducido, lo que llevaba al agotamiento del oxígeno y la formación de black shales laminados ricos en materia orgánica (LOM) (Föllmi, 2011). Por otro lado, las condiciones húmedas del efecto invernadero intenso, propiciaban una alta tasa de meteorización biogeoquímica, un mayor flujo de nutrientes, esorrentía, productividad primaria importante y preservación mejorada de LOM en zonas expandidas de mínimo oxígeno (Föllmi, 2011).

Los océanos globales del Cretácico Temprano experimentaron diversos periodos de baja oxigenación conocidos como Oceanic Anoxic Events (OAE), asociados con rápidos cambios en la vida marina, alteraciones climáticas, modificaciones en la ecología de las plataformas carbonatadas y variaciones en las tasas de meteorización (Föllmi, 2011). Durante el Albiano, se estableció un período específico para describir el cambio ambiental en el Cretácico conocido como "Episodio de Paquier", que tuvo una duración aproximada de 3 millones de años (Föllmi, 2011). Este episodio se caracterizó por condiciones anaeróbicas que dieron lugar a la formación de capas ricas en materia orgánica, la expansión de las Archaea marinas y cambios morfológicos en las conchas de los foraminíferos planctónicos. En el Albiano temprano, se observaron bajos niveles

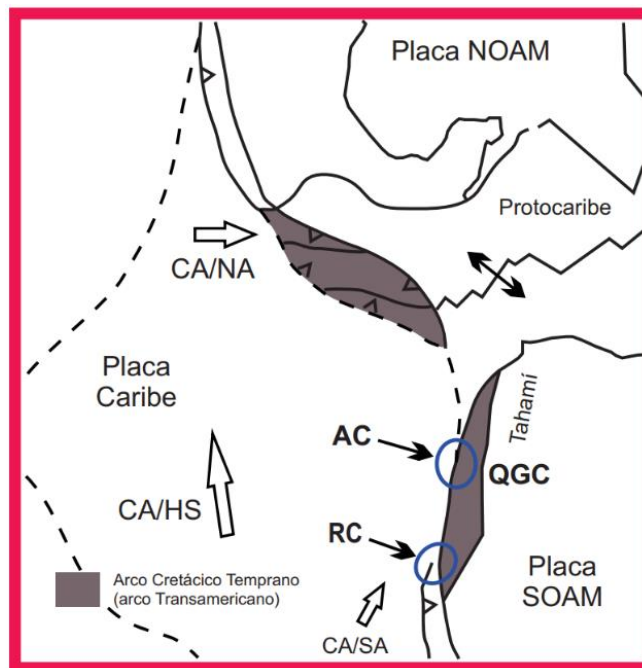
de caolinita, un aumento en los registros de estroncio y fósforo asociados a depósitos de fosforita, y una disminución en el nivel del mar (Föllmi, 2011).

En Colombia durante el Albiano se cerró la cuenca back-arc intraoceánica conocida como la cuenca marginal Quebradagrande (Nivia, 2001 y Nivia et al., 1996 citado en Sarmiento, 2019). Los restos de esta cuenca y el arco asociado formaron el Complejo Quebradagrande en la zona de sutura Romeral-Peltetec. Durante el Aptiano Tardío, el Complejo Quebradagrande se incorporó al basamento metamórfico del Terreno Tahamí o el Terreno Cajamarca-Valdivia en la Cordillera Central de Colombia. Este evento estuvo acompañado por la obducción de rocas metamórficas del Complejo Arquía sobre el fore-arc cretácico hacia el occidente (Figura 1 y Figura 2). Mientras tanto, hacia el escudo al oriente colombiano ocurría la extensión de una cuenca compleja en forma de diamante (Cáceres et al., 2003). A pesar de las condiciones anóxicas que caracterizan al Albiano Medio, no se encuentran rocas generadoras de petróleo correspondientes a esta edad en el Valle Medio del Magdalena (VMM). Una posible explicación de esta anomalía es que en esa área la superficie de máxima inundación del Albiano Medio se encuentra en una sección condensada con una tasa de sedimentación muy baja, lo cual no favorece la acumulación de materia orgánica (Sarmiento, 2019).

En el Albiano temprano-alto, se depositó en el VMM la Formación Tablazo (Etayo-Serna et al., 2019). La sección tipo de esta formación fue descrita por Etayo et al. (2019), y se encuentra ubicada en la carretera Bucaramanga-San Vicente cruzando el río Sogamoso en el primer cerro al oriente del sector Tablazo (Figura 5). Estos autores la dividieron en siete segmentos estratigráficos compuestos por calizas de textura lodo, lodos calcáreos con materia orgánica, areniscas de grano muy fino, paleosuelos y mudstones arcillosos.

**Figura 1**

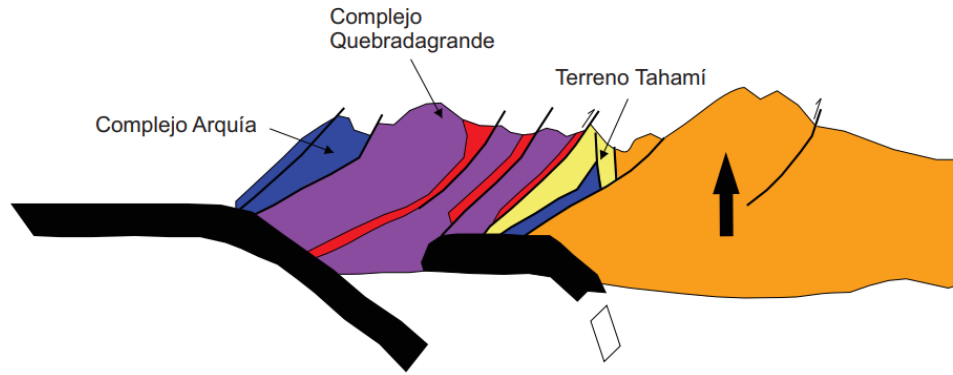
*Reconstrucción paleotectónica del Cretácico, incluyendo las paleo-posiciones relativas de América del Norte y del Sur*



*Nota.* Marco de referencia: Indo-Atlántico usando el marco de referencia de *hotspots* (puntos calientes) de Müller et al., en Villagómez et al. (2011). Dirección relativa de convergencia: CA/HS (Placa Caribe/*Hotspot*), CA/NA (Placa Caribe/Norteamérica), CA/SA (Placa Caribe/Suramérica). Abreviaciones: AC (Complejo Arquía), RC (Complejo Raspas en Ecuador), SOAM (Placa de América del Sur), QGC (Complejo Quebradagrande), NOAM (Placa de América del Norte). Adaptado de “*Cretaceous Stratigraphy and Paleo-Facies Maps of Northwestern South America*”, por L.F. Sarmiento, 2019, *Frontiers in Earth Sciences*, (Cap.10).

**Figura 2**

*Esquema reconstrucción paleotectónica del occidente de Colombia (115-105 Ma)*



*Nota.* Ocurre el cierre de la cuenca *back-arc* intraoceánica (arco Quebradagrande), este se acreciona formando el Complejo Quebradagrande. El QGC se incorpora al Terreno Tahamí y se obducen las rocas del Complejo Arquía. La flecha negra indica levantamiento rocoso y exhumación del continente. Adaptado de “*Cretaceous Stratigraphy and Paleo-Facies Maps of Northwestern South America*”, por L.F. Sarmiento, 2019, *Frontiers in Earth Sciences*, (Cap.10).

En este trabajo se realiza una caracterización estratigráfica y quimioestratigráfica de un segmento de la Formación Tablazo. Para tal fin, se hizo un reconocimiento previo de la zona de estudio, recolección de muestras a lo largo de la sección estratigráfica y análisis geoquímicos a las muestras de interés. En el laboratorio del Instituto Colombiano del Petróleo (ICP) Piedecuesta, se implementaron las técnicas analíticas de XRF y DRX para establecer la composición mineralógica y química de las muestras. Usando los resultados de los análisis de laboratorio, la información identificada en campo y la compilación bibliográfica, se realiza una subdivisión informal de este segmento de la Formación Tablazo y se interpretaron unas zonas quimioestratigráficas que pueden ser utilizadas como herramientas de correlación regional.

## **1. Objetivos**

### **1.1 Objetivo General**

Realizar el análisis y caracterización estratigráfica y quimioestratigráfica de una sección de la Formación Tablazo aflorante en la sección El Ramo localizada en el municipio de Betulia (Santander), Valle Medio del Magdalena-Colombia.

### **1.2 Objetivos Específicos**

Revisar y compilar la información bibliográfica para entender la evolución geológica del área de estudio.

Apoyar el levantamiento estratigráfico y el muestreo detallado de una sección de la Formación Tablazo.

Apoyar el análisis de geoquímica inorgánica (Difractometría de Rayos X (DRX) y Fluorescencia de Rayos X (XRF)).

Reconocer e identificar cambios litoestratigráficos y geoquímicos para subdividir la sección analizada de la Formación Tablazo.

Interpretar las posibles zonas y subzonas quimioestratigráficas existentes en la sección, basadas en las variaciones de composición mineralógica y elemental obtenidas mediante los análisis DRX y XRF.

## 2. Justificación

En Colombia el Cretácico se caracteriza por presenciar grandes cambios geológicos, desde la acumulación de sedimentos marinos epicontinentales hasta la formación de los Andes. Durante el Albiano medio ocurrió una rápida transgresión del nivel del mar con episodios de anoxia que llegaron a regiones de plataforma media y externa (Gaona, 2015). Debido a la formación de amplias plataformas en ambientes marinos someros, la cuenca del Valle Medio del Magdalena preservó varias unidades estratigráficas presentando un registro amplio de este periodo geológico (Pérez, 2019). La Formación Tablazo en el Valle Medio es considerada de interés desde el punto de exploración de hidrocarburos. Sin embargo, debido a sus características litológicas el recobro de microfósiles es escaso, y en casos de recobro palinológico, la alteración termal a menudo dificulta la identificación de los palinomorfos recuperados. En el ámbito geológico, la correlación y el modelamiento geológico son aspectos importantes para comprender la historia geológica de una región específica. Por lo tanto, realizar una correlación efectiva requiere herramientas y métodos que proporcionen datos precisos y confiables.

En este contexto, el presente estudio se llevó a cabo utilizando la quimioestratigrafía, la cual es una herramienta valiosa que permite identificar patrones geoquímicos y mineralógicos que pueden ser fundamentales para caracterizar y correlacionar las secuencias sedimentarias, especialmente en aquellas donde el control bioestratigráfico es limitado (Pearce et al., 2010). En los últimos 20 años este elemento se ha vuelto muy popular como herramienta de correlación de yacimientos de hidrocarburos, interpretaciones paleogeográficas, y análisis de proveniencia, entre otras aplicaciones (Craigie, 2018). En este proyecto se realizó un estudio estratigráfico y quimioestratigráfico de un intervalo de la Formación Tablazo con el objetivo de subdividir esta

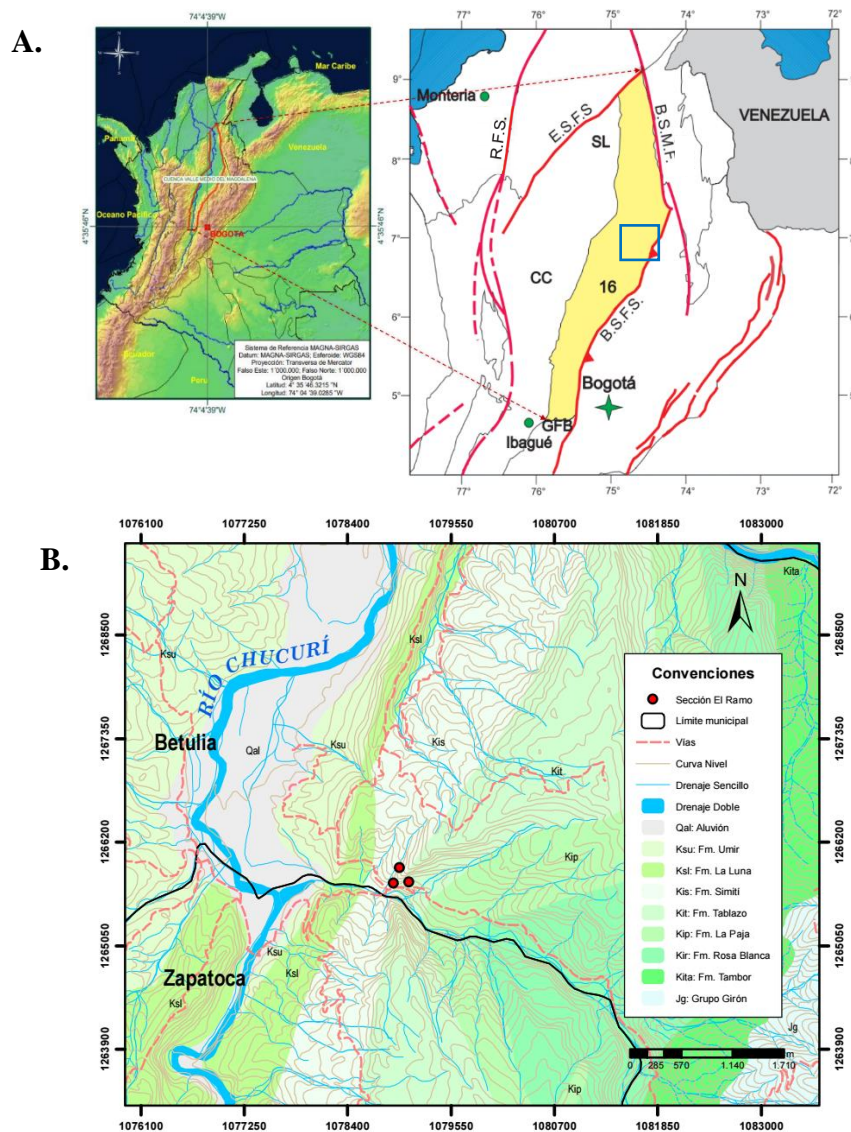
secuencia en unidades litológicas informales y establecer una zonación quimioestratigráfica. La interpretación de la variación elemental a lo largo del intervalo estudiado permitió identificar cambios en concentraciones elementales que pueden ser usados como herramienta de correlación regional.

### **3. Localización**

En el presente estudio, se examina la sección estratigráfica de la Formación Tablazo, la cual aflora en un camino veredal que se desprende de la vía que va de Bucaramanga a San Vicente de Chucurí, ubicado en el municipio de Betulia, Santander (ver Figura 3B). Esta área limita con los municipios de San Vicente de Chucurí (SW), Zapatoca (SE) y Girón (NE). Además, se sitúa en la cuenca del Valle Medio del Magdalena y en la plancha cartográfica del IGAC 120 I-D, correspondiente a la plancha geológica 120 – Bucaramanga del Servicio Geológico Colombiano. Las coordenadas geográficas de inicio y finalización de la sección son: 1079097 Norte, 1265752 Este y 1078982 Norte, 1265927 Este (Origen Magna Colombia Bogotá).

#### **Figura 3**

*Localización regional y local del área de estudio*



*Nota.* A. Principales estructuras de la cuenca del Valle Medio del Magdalena (VMM), el recuadro azul indica el área de interés. B.S.F.S: Sistema de fallas Bituima y La Salina; E.S.F.S: Sistema de fallas Espíritu Santo; B.S.M.F: Sistema de fallas Bucaramanga-Santa Marta; GFB: Cinturón plegado Girardot; CC: Cordillera Central; SL: Serranía de San Lucas. El recuadro azul indica el área de interés. Adaptado de “*Estudio de la porosidad orgánica con la evolución térmica en rocas generadoras cretácicas de la cuenca Valle Medio del Magdalena, Colombia*” por Juliao, T. 2021.

B. Localización local de la zona de estudio. Los puntos rojos indican un número de bastón en la columna estratigráfica levantada. Cartografía base tomada del Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2014. Geología base tomada del Servicio Geológico Colombiano, 2014. Fuente: Autor.

## 4. Marco geológico

### 4.1 Estratigrafía

La unidad litoestratigráfica de interés en este trabajo corresponde a la Formación Tablazo, la cual se encuentra en posición concordante sobre la Formación La Paja y sobre ella descansa la Formación Simití (Etayo et al., 2019).

#### 4.1.1 Formación Tablazo (Kit)

Evolución de la nomenclatura: Según el trabajo de Morales et al. (1958), Wheeler en 1929 denominó "Calizas del Tablazo" a las rocas expuestas al norte del Valle Medio del Magdalena en la primera montaña al este del pueblo del Tablazo, en el departamento de Santander. En diversos estudios realizados designan a esta unidad desde San Gil (Santander) hasta Sutamarchán (Boyacá) como "*The Tablazo Limestone*" (Anderson, 1945 en Gómez e Infante, 2019), "*Conjunto San Gil*" (Hubach, 1953 en Moreno y Sarmiento, 2002), "*Formación San Gil*" (Hubach, 1957 en Moreno y Sarmiento, 2002), "*Caliza del Tablazo*" (Hubach, 1957 en Julivert, 1968; Julivert, 1958 en Moreno y Sarmiento, 2002), "*Tablazo ridge limestone*" (Socony, según Morales et al., 1958 en Julivert, 1968), "*Formación Tablazo*" (Hubach, 1957; Julivert, 1960 en Julivert, 1968); "*Formación Calizas del Tablazo*" (Etayo, 1964 en Moreno y Sarmiento, 2002); "*Formación Tablazo*" (Téllez, 1964 en Moreno y Sarmiento, 2002) y "*Formación San Gil Inferior*" en el VMM, Subregión de Villa de Leiva (SVL) (Etayo, 1964 en Moreno y Sarmiento, 2002)

Localidad tipo: La localidad tipo de la Formación Tablazo se ubica en el sitio El Tablazo, donde la carretera Bucaramanga – San Vicente de Chucurí atraviesa el Río Sogamoso (Morales et al., 1958 citado en Moreno y Sarmiento, 2002).

Descripción geológica: Para el área de San Gil, Hubach (1953) denominó al *Conjunto San Gil* como un nivel de caliza, arenisca calcárea y esquistos; para el año 1955, Hubach lo describe como bancos de arenisca, arenisca calcárea y caliza de 2 hasta 8 m de espesor que alternan con estratos de esquistos arcillosos oscuros (Gómez e Infante, 2019). Según Morales et al. (1958), esta unidad en la localidad tipo está constituida por capas macizas de calizas azuladas extremadamente fosilíferas y margas, las primeras predominando en su parte superior y las últimas en la inferior. Además, las margas son muy calcáreas y las calizas son macizas, de textura gruesa, extremadamente fosilíferas, opacas y de color gris azulado (Moreno y Sarmiento, 2002). En el área de Villanueva se describen calizas fosilíferas, micáceas, claras a grises, gruesas con concreciones, intercaladas con niveles menores de arcillas pizarrosas y areniscas calcáreas (Jimeno & Yepes, 1963 en Gómez e Infante, 2019). Téllez (1964) citado en Gómez e Infante (2019) separa a la Formación Tablazo por la vía entre San Gil y Barichara en un nivel basal de margas y caliza sin areniscas, seguido de un nivel compuesto por calizas masivas y areniscas muy calcáreas intercaladas con niveles de arcillolitas, margas y areniscas, por último, un nivel principalmente arcillo-arenoso. Según Moreno y Sarmiento (2002) en el área de Sáchica (Boyacá), esta sección estratigráfica está compuesta por limolitas de cuarzo grises y negras, lodolitas, limolitas fosilíferas, bioesparitas, arenitas de cuarzo y arenitas fosilíferas. Asimismo, en el área de Barichara – San Gil se divide en cinco segmentos compuestos generalmente por arenitas y limolitas de cuarzo fosilíferas compactas de color violeta, gris y negro, con bivalvos, bioesparitas, arenitas de cuarzo, lodolitas y limolitas de cuarzo.

Según Etayo et al. (2019) la Formación Tablazo está conformada por siete segmentos estratigráficos (Figura 4), los cuales fueron levantados en la sección tipo, por la ribera norte y sur del río Sogamoso cuando corta el cerro El Tablazo (Figura 5). Sin embargo, debido a que los segmentos inferiores de esta sección se encuentran parcialmente cubiertos, se describieron adicionalmente en la quebrada La Paja (al oriente de la sección tipo; segmento I) y en los afloramientos por la vía principal a San Vicente de Chucurí – Lebrija, cerca del cruce con la quebrada La Molinilla (segmento II y los metros basales del III) (Figura 5). En términos generales, en la sección tipo la Formación Tablazo se caracteriza por la presencia de calizas de tonalidad gris a negra, fosilíferas y localmente glauconíticas, junto con capas arcillosas de color negro. También se intercalan niveles de lodolitas grises a gris azulado, calcáreas y fosilíferas, con capas de areniscas grises de grano fino a medio, ligeramente arcillosas y con una presencia esporádica de calcita en capas delgadas (Figura 4).

Espesor: De acuerdo con Moreno y Sarmiento (2002) se han reportado diferentes espesores para esta unidad. En la localidad tipo se registra un espesor de 150 m (Morales et al., 1958), al norte de Bucaramanga es de 277 m (Ward et al., 1973), en Barichara 350 m (Julivert, 1958 en Gómez e Infante, 2019) y 330 m (Téllez, 1964), en la vía Guane – Barichara presenta un espesor de 360 m (Moreno y Sarmiento, 2002), en los alrededores de Simacota, occidente de Guadalupe y Suaita, 239 m, 272 m y 354 m de espesor respectivamente (Pulido, 1979a), y para la región de Villa de Leiva, presenta un espesor de 480 m (Etayo, 1968a). Para el sector de Villanueva tiene un espesor de 300 m (Jimeno & Yepes, 1963 en Gómez e Infante, 2019) y para el sector de Sáchica (Boyacá) presenta un espesor de 490 m (Moreno y Sarmiento, 2002).

Límites: El límite inferior de la Formación Tablazo corresponde al contacto con la Formación Paja, el cual se presenta de manera concordante y gradacional en la localidad tipo según

Julivert (1968) y en la zona de la mesa de Barichara según Morales et al. (1958); Jimeno & Yepes (1963); Pinto et al. (2007) citados en Gómez e Infante (2019). En la Mesa de Barichara, este límite es neto y concordante según Téllez (1964) y Pulido (1980) citados en Gómez e Infante (2019). En Barichara, se ha determinado que es concordante según Hoedemaeker (2004). Por último, en el área de Sáchica, específicamente en la sección Quebrada Arriba, se considera que el límite es neto de acuerdo con Moreno y Sarmiento (2002). Para Etayo et al. (2019) el contacto de la Formación Tablazo con la infrayacente Formación Paja es transicional.

El límite superior en la sección tipo se define como un contacto concordante y relativamente neto con la Formación Simití, según lo establecido por Julivert (1968). Además, en la región de Mesas y Cuestas, se observa un contacto marcadamente oblicuo entre estas formaciones, también reportado por Julivert (1968). En Santander, se ha encontrado que el contacto es concordante, según Royero y Clavijo (2001) (citados en Gómez e Infante, 2019). En el área de Sáchica sección Quebrada Arriba, se ha observado que el contacto es neto, de acuerdo con Moreno y Sarmiento (2002).

Paleontología y edad: En el área de la sección tipo, a pesar de ser rica en lamelibranquios como *Trigonia hondaana* Lea (Morales et al., 1958), la caliza del Tablazo no ha proporcionado faunas significativas. Sin embargo, su posición estratigráfica entre la Formación Paja, que pertenece al Aptiano superior, y la Formación Simití con *Lyelliceras*, permite asignar al Tablazo una edad desde el Aptiano superior hasta el Albiano inferior (Julivert, 1968).

Según Morales et al. (1958), la Formación Tablazo en el área de Ciénaga Simití se asigna una edad de Aptiano superior - Albiano inferior, basada en la presencia de los géneros *Uhligella*, *Cheloniceras*, *Parahoplites* y, más arriba, *Douvilleiceras*. Además, se menciona que en el área del río Sogamoso no se encontraron amonitas, por lo que la edad fue inferida a partir de la posición

estratigráfica. Las Calizas del Tablazo se encuentran sobre las rocas de la Formación La Paja, que tienen una edad de Aptiano superior, e infrayacen a los shales del Albiano. Por lo tanto, se asume una edad de Aptiano - Albiano inferior para la Formación Tablazo (Gómez e Infante, 2019).

Para Téllez (1964) citado en Gómez e Infante (2019), en el área de la Mesa de los Santos y al oeste de la Mesa de Barichara, el contacto claro entre las Formaciones La Paja y Tablazo está marcado por un nivel fosilífero de *exogyras*.

Etayo (1968a) indica una edad de Aptiano superior - Albiano inferior y reporta la presencia de *Colombiceras alexandrium* (D'ORBIGNY) y *Colombiceras riedelli* CANTU - CHAPA en la parte inferior de la Formación Tablazo ("Formación San Gil Inferior") en el área de Villa de Leyva. Además, se registran *Colombiceras obliquum* (RIEDEL) y *Rhytidohoplites* (?) sp. en la parte media de la formación (Morales y Sarmiento, 2002).

Según el informe de Patarroyo (2009) citado en Medina (s.f.), se ha registrado únicamente la presencia de amonitas del género *Neodeshayesites* en la Formación Tablazo en el sector de Vélez (Santander). Esto confirma la existencia de depósitos del Albiano en esa área.

Según Etayo et al. (2019), en la Formación Tablazo a lo largo de la sección tipo se encontraron varias especies de amonitas. En el segmento V y VII se encontraron representantes como *Paregonoceras pernodosum* y posiblemente *Beudanticeras* sp. En el segmento VII se identificaron *Paregonoceras diana n. sp.*, *Prolyelliceras lobatum*, *Douvilleiceras tarapacaense*, *Tegoceras benavidescaceresi* (posiblemente) y *Prolyelliceras lobutum*. En el segmento I se encontraron *Douvilleiceras* sp. y *Neodeshayesites stutzeri*. Por último, en el segmento II se encontró *Pseudhelicoceras catenatum*. La presencia de estas amonitas indica que la Formación Tablazo en su localidad tipo se puede asignar al intervalo cronológico del Albiano temprano alto.

Ambientes de depósito: Según Wheeler (1929) citado en Morales et al. (1958) en el área del río Sogamoso la Formación Tablazo se depositó en un ambiente nerítico superior, con base a su contenido fósil. Por otro lado, Royero & Clavijo (2001) interpretan que esta unidad se formó en condiciones neríticas poco profundas. Moreno y Sarmiento (2002) indican que la Formación Tablazo se compone de sucesiones normales de frente costero progradacionales y retrogradacionales. En el área de Barichara - San Gil, los sedimentos de esta formación fueron depositados en ambientes más someros, lo cual indica condiciones ambientales más energéticas y una menor profundidad del agua. En cuanto a los contactos de la Formación Tablazo, en la zona de Sáchica y Barichara - San Gil, el contacto inferior se caracteriza por una superficie de somerización, mientras que el contacto superior indica una profundización de la cuenca o un aumento en el nivel del mar (Moreno y Sarmiento, 2002).

De acuerdo con Moreno y Sarmiento (2002), la Formación Tablazo se depositó en una plataforma marina caracterizada por la presencia predominante de fondos de depósito energéticos y bien oxigenados, con una notable ocurrencia de carbonato de calcio. Estos ambientes corresponden a frentes de playa que siguen un patrón cíclico o de parasecuencias, donde las superficies de mayor profundidad se localizaban en el área cercana al mar abierto.

En base a los estudios realizados por Etayo et al. (2019), se ha llegado a la interpretación de que los sedimentos que conforman la Formación Tablazo se depositaron en una rampa de carbonatos, ubicada entre la región supramareal y la rampa media. Durante este proceso de deposición, se formó una albufera (*lagoon*) que estaba conectada con el mar y rodeada temporalmente por una barra de arena (*shoal sand*). La presencia de características como *Microcodium*, calizas nodulares, *nodular rubble* y paleosuelos sugiere exposición subaérea

causada por oscilaciones en la posición relativa del lecho del depósito con relación a la línea costera.

Según lo mencionado por Medina (s.f.), los depósitos de esta formación en el sector de Barichara (Santander) se formaron en ambientes que van desde *upper shoreface* a *lower offshore*, a profundidades que oscilan entre 60 y 200 metros. Esta estimación de la profundidad se basa en la presencia de glauconita y en la zona de acción de las olas de tormenta.

Correlaciones: Según Morales et al. (1958), las Calizas del Tablazo pueden correlacionarse con el "Tablazo ridge limestone" de Socony, La Caliza del Alto Bolívar de Shell, El Villeta de Texas y con el miembro calcáreo utilizado por Intercol en el área de Totumal (Gómez e Infante, 2019). Además, Hubach (1957) citado en Moreno y Sarmiento (2002) indica que El Tablazo de la cuenca del Carare es el equivalente de la Formación San Gil del Valle del Suárez, que forma los escarpes en la zona de San Gil - Socorro y las mesetas en el fondo del Valle del Suárez.

De acuerdo con Julivert (1968), se ha observado que la Caliza del Tablazo (o Formación Tablazo) se correlaciona de manera exacta con la Caliza de San Gil (o Formación San Gil), la cual fue descrita por Hubach (1955) como bancos de arenisca, arenisca calcárea y caliza con un espesor que varía entre 2 y 8 metros, alternando con estratos de esquistos arcillosos y con un espesor total de más de 300 metros. En la Cuenca Catatumbo, la correlación cronoestratigráfica de la Caliza del Tablazo se ha establecido con las formaciones Tibú-Mercedes y Aguardiente, según lo mencionado por Royer & Clavijo (2001) en Gómez e Infante (2019).

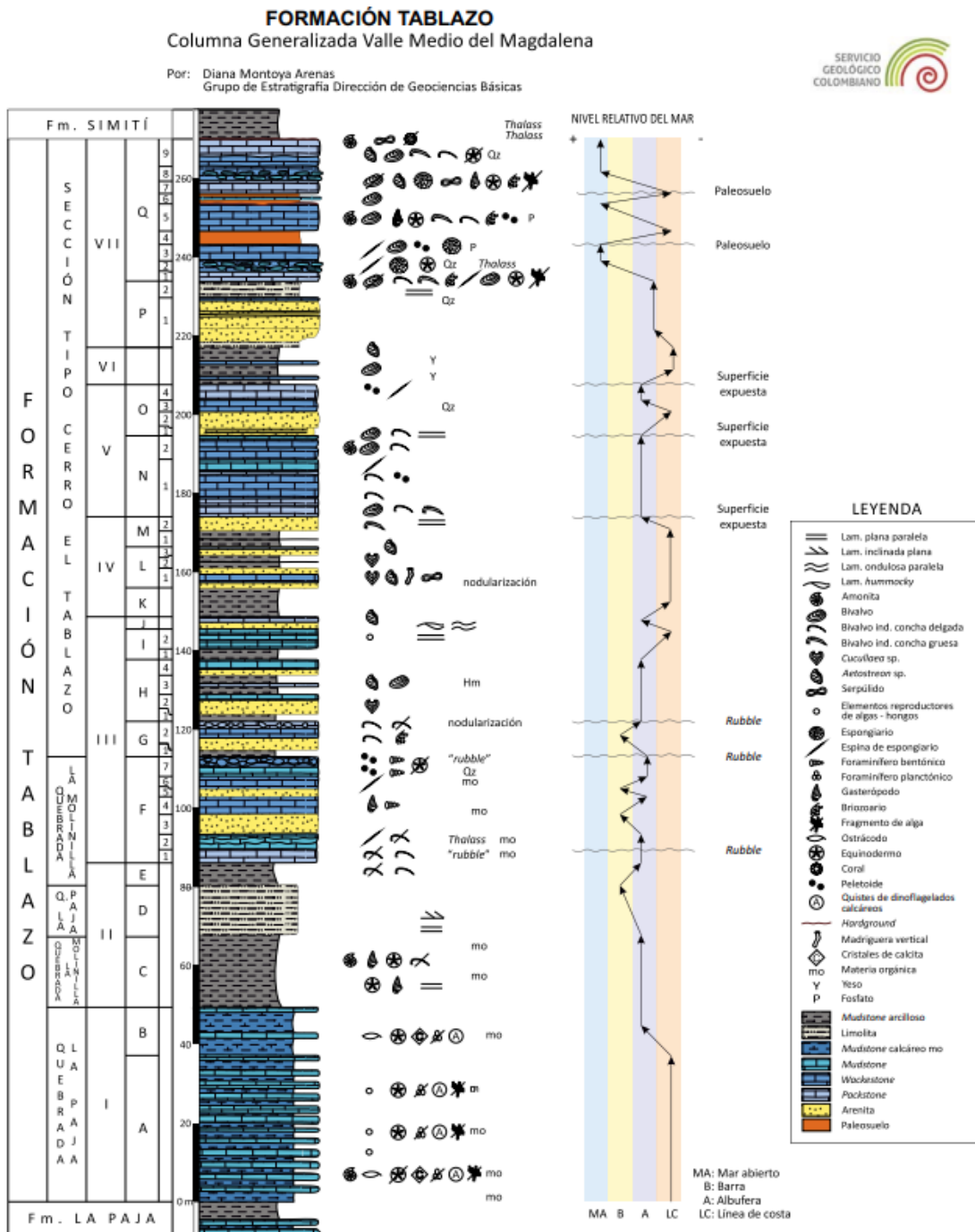
Extensión geográfica: Según la cartografía de INGEOMINAS, se reporta la presencia de la Formación Tablazo desde la zona más septentrional (Tamalameque, Cesar) hasta la parte meridional (Chiquinquirá, Boyacá) donde en las planchas de Duitama y Tunja cambia a la Formación San Gil Inferior. En las planchas 172 de Paz de Río y la Plancha 189 de La Palma, la

Formación Tablazo cambia de facies y se identifica como Conjunto Arenoso Lutítico, que es equivalente a la Formación San Gil Inferior (Rodríguez & Ulloa, 1994) según Gómez e Infante (2019). La Caliza del Tablazo se extiende por la parte norte del Valle Medio del Magdalena y por toda la Región de Mesas y Cuestas, aunque sus facies varían en esta región. Hacia el Macizo de Santander, se vuelve particularmente más arenosa (Julivert, 1968). Además, el nombre Formación Tablazo se utiliza hacia el norte, en los cuadrángulos 135 de San Gil y 151 de Charalá, así como al occidente, en los cuadrángulos 170 de Vélez y 190 de Chiquinquirá (Moreno y Sarmiento, 2002).

En la presente investigación se realiza un análisis estratigráfico y quimioestratigráfico de un intervalo de la Formación Tablazo que aflora en el paradero-tienda conocido como “El Ramo” ubicado en el último puente de la represa de Topocoro (Figura 6). Con el apoyo del Instituto Colombiano del Petróleo – Ecopetrol S.A, se levantaron 119 metros de columna estratigráfica perteneciente a esta formación. El análisis estratigráfico y resultados quimioestratigráficos de 95 muestras, permitió dividir este intervalo de la Formación Tablazo en 3 segmentos estratigráficos informales y establecer una zonación quimioestratigráfica.

#### **Figura 4**

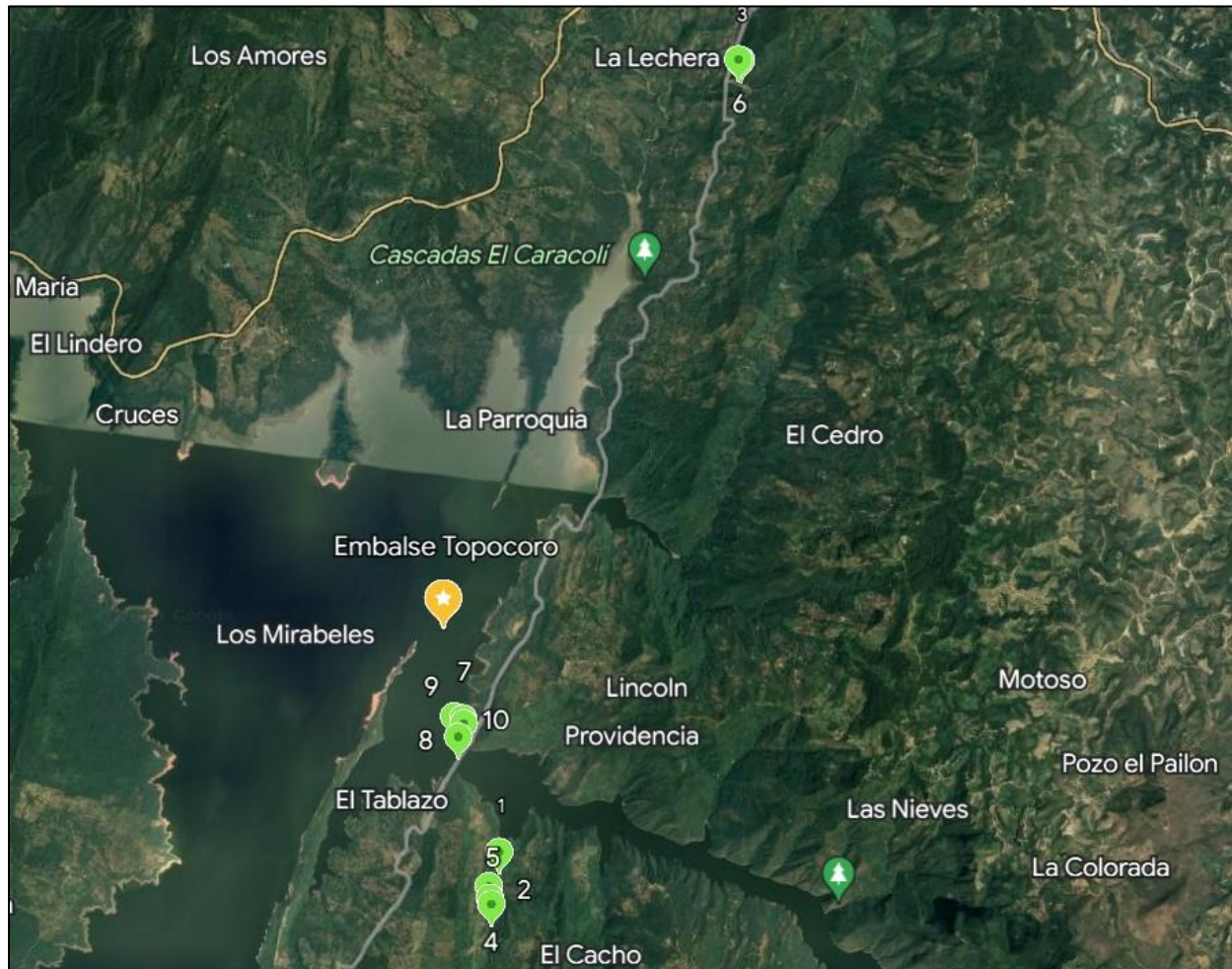
*Columna estratigráfica generalizada de la Formación Tablazo en la sección tipo*



Nota. Tomado de *Estudios geológicos y paleontológicos sobre el Cretácico en la región del embalse del Río Sogamoso, Valle Medio del Magdalena* (p. 191), por F. Etayo et al., 2019, Servicio Geológico Colombiano, XIII.

**Figura 5**

*Ubicación de los segmentos de la sección tipo (cerro El Tablazo) de la Formación Tablazo*

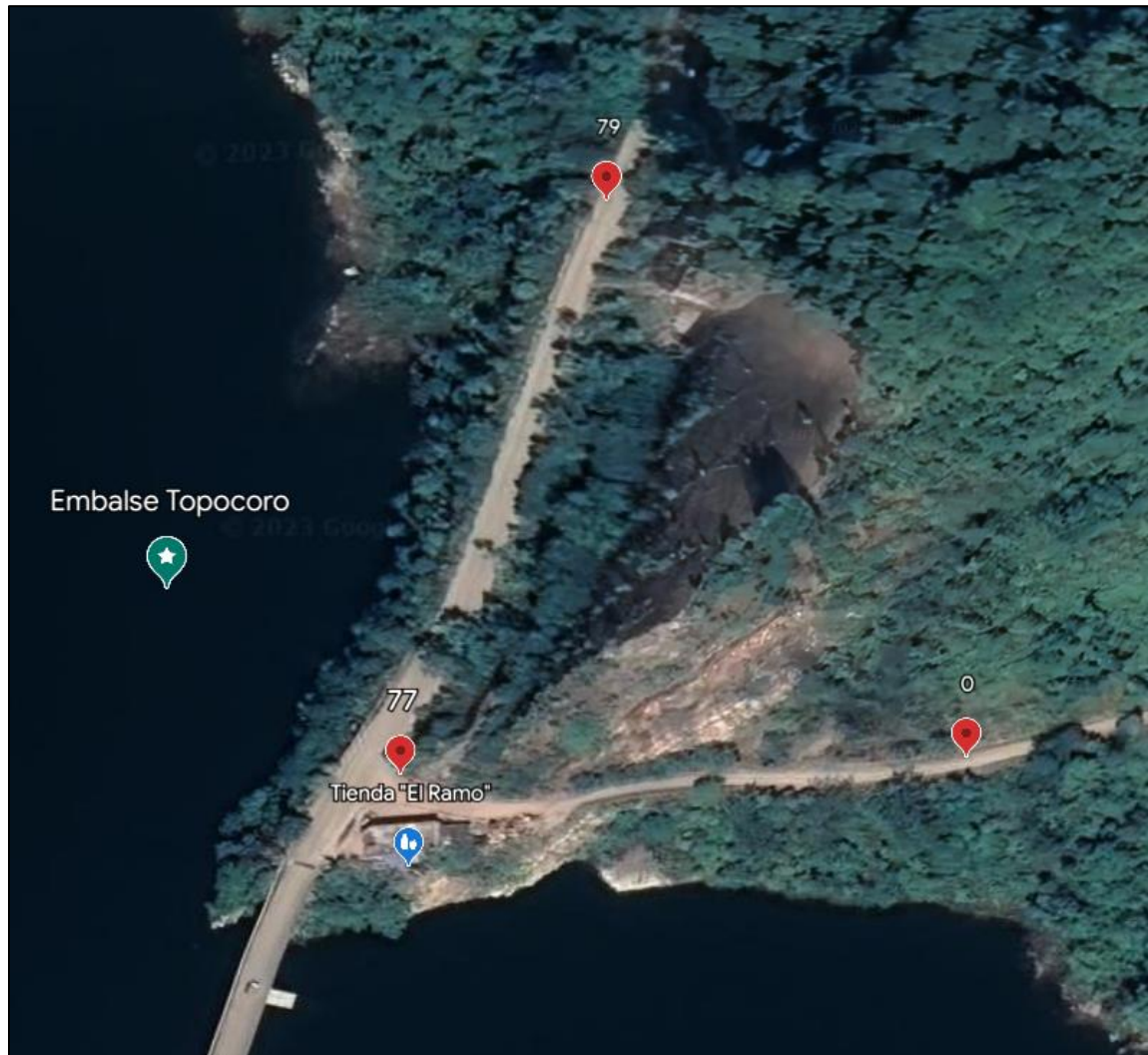


*Nota.* Vista aérea de la sección tipo de la Fm. Tablazo. Los marcadores verdes indican la localización de los segmentos estratigráficos levantados por el Servicio Geológico Colombiano.

Adaptado de Google Earth.

**Figura 6**

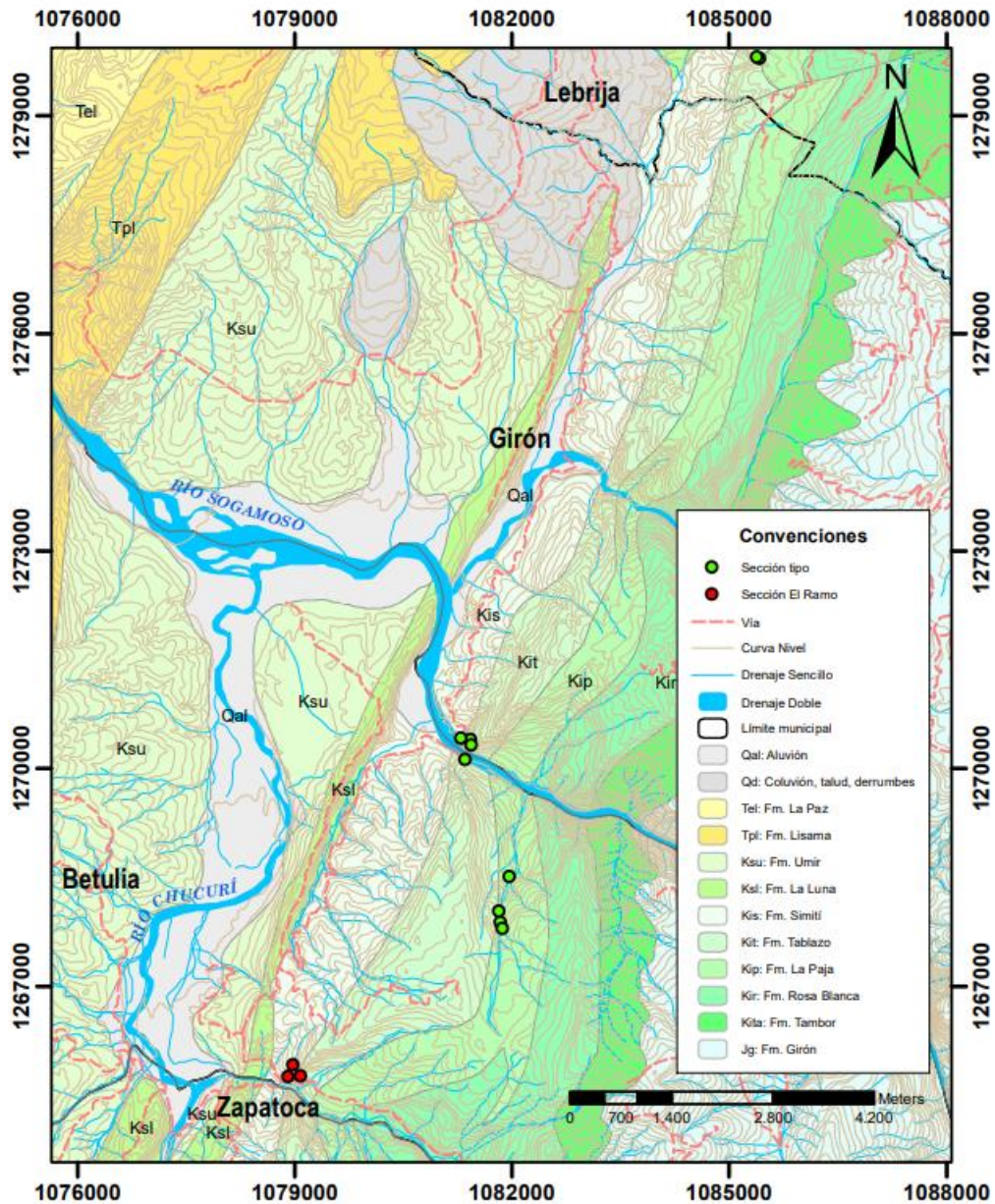
*Ubicación de la Formación Tablazo sección El Ramo*



*Nota.* Vista aérea de la sección Tablazo-El Ramo. Los marcadores rojos indican el número de bastón en la columna estratigráfica levantada. Adaptado de Google Earth. Fuente: Autor

**Figura 7**

*Localización de la sección tipo y la sección Tablazo-El Ramo*



*Nota.* Mapa de localización de la sección tipo (puntos verdes) y de la sección levantada en el sector Tablazo-El Ramo (puntos rojos). Cartografía base tomada del Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2014. Geología base tomada del Servicio Geológico Colombiano, 2014. Fuente: Autor

## 5. Marco Teórico

### 5.1 Estratigrafía

La estratigrafía es la disciplina encargada de estudiar y describir los cuerpos rocosos que constituyen la corteza terrestre, así como su organización en unidades distintivas (Murphy & Salvador, 1999). Su objetivo principal es establecer la distribución y la relación espacio temporal de estas unidades para poder interpretar la historia geológica (Murphy & Salvador, 1999). La estratificación es el modo como se depositan las rocas sedimentarias acorde al ambiente y agente; y está caracterizada por series de capas denominadas estratos (Polare & Fraga, 2021). Un estrato es un nivel simple de litología homogénea o gradacional depositado de forma paralela a la inclinación original de la formación. Está separado de los estratos adyacentes por superficies de erosión, no sedimentación o cambio abrupto de carácter (McKee & Weir, 1953 citado en Cuesta).

#### 5.1.1 Unidades estratigráficas

“Es un cuerpo de roca establecido como una entidad distinta en la clasificación de las rocas de la Tierra, basado en cualquiera de las propiedades o atributos o combinaciones de estas que poseen las rocas” (Murphy & Salvador, 1999). Las rocas poseen múltiples propiedades tangibles y medibles, lo que permite clasificarlas según diferentes criterios. Además, también pueden ser clasificadas en base a su edad de formación, atributos relacionados con el ambiente o la génesis de estas. (Murphy & Salvador, 1999). Existen varios tipos de unidades formales, entre ellos se encuentran: las unidades litoestratigráficas, bioestratigráficas, cronoestratigráficas y quimioestratigráficas.

**5.1.1.1 Unidades Litoestratigráficas.** Murphy & Salvador (1999) afirman que las unidades litoestratigráficas son cuerpos de roca, ya sea estratificados o no, que se definen y

caracterizan en función de sus propiedades litológicas y sus relaciones estratigráficas. Estas unidades se establecen y reconocen a través de características físicas, y su extensión geográfica está determinada por la continuidad y extensión de sus características litológicas. Para establecer estas unidades se debe seguir el siguiente procedimiento:

1) Definir los estratotipos y localidades tipo: cada unidad litoestratigráfica requiere una definición objetiva y clara, eliminando los criterios subjetivos implícitos de cada autor. Con este fin, se establecen patrones de referencia (estratotipo o una sección tipo) para definir una unidad en función de las características observables en un corte específico, en lugar de basarse únicamente en la descripción proporcionada por un autor. (Vera, 1994).

2) Límites: estos se establecen en lugares donde ocurren cambios litológicos o de manera arbitraria en zonas de transición litológica vertical o lateral. Los límites de las unidades litoestratigráficas frecuentemente atraviesan superficies de tiempo, límites de rangos de fósiles y los límites de cualquier otro tipo de unidades estratigráficas (Murphy & Salvador, 1999).

3) Inconformidades e hiatos: las secuencias estratigráficas con composición litológica similar pero separadas por discordancias regionales o hiatos deben cartografiarse como unidades litoestratigráficas separadas. Sin embargo, estas condiciones no deben considerarse como razón suficiente para distinguir más de una unidad litoestratigráfica (Murphy & Salvador, 1999).

**5.1.1.2 Unidades Bioestratigráficas (Biozonas).** “Son cuerpos de estratos que se definen o caracterizan sobre la base de su contenido fósil” (Murphy & Salvador, 1999). Una unidad bioestratigráfica puede ser establecida mediante un solo taxón, combinación de taxones, abundancias relativas, características morfológicas específicas o variaciones en otras características relacionadas con el contenido y la distribución de fósiles en los estratos; por lo que existen varios tipos de unidades bioestratigráficas en el mismo intervalo de estratos. Estas unidades

se diferencian de otros tipos de unidades estratigráficas por los cambios evolutivos a través del tiempo geológico que muestran los restos fósiles que las establecen (Murphy & Salvador, 1999).

**5.1.1.3 Unidades Cronoestratigráficas.** Se trata de cuerpos de roca, tanto estratificados como no estratificados, que se formaron durante un intervalo de tiempo geológico específico. Estas unidades están delimitadas por horizontes sincrónicos, es decir, por superficies estratigráficas que tienen la misma edad en todos los lugares (Murphy & Salvador, 1999).

**5.1.1.4 Unidades Quimioestratigráficas.** Aunque no se reconocen explícitamente como unidades formales en los códigos y guías, se consideran de forma indirecta las unidades basadas en criterios geoquímicos. La unidad fundamental sería la zona quimioestratigráfica que son el conjunto de estratos caracterizado por sus propiedades geoquímicas (Vera, 1994).

### ***5.1.2 Estratigrafía de secuencias***

El principio fundamental de la estratigrafía secuencial es que un cambio en el nivel relativo del mar provoca modificaciones en los patrones de sedimentación en la mayoría de los ambientes de depósito (Nichols, 2009). El enfoque de la estratigrafía de secuencias ha llevado a comprender mejor la relación entre las unidades estratigráficas, las sucesiones de facies y los elementos de depósito en tiempo y espacio dentro de las cuencas sedimentarias (Catuneanu, 2006).

**5.1.2.1 Transgresión, regresión y regresión forzada.** Según Nichols (2009), en caso de que ocurra un aumento relativo del nivel del mar, la línea costera se desplazará hacia el interior de la tierra, lo cual se conoce como transgresión. Por otro lado, cuando la línea costera se desplaza hacia el mar debido a la sedimentación en la costa, se le llama regresión. Sin embargo, si dicho movimiento se debe a una disminución relativa del nivel del mar, se denomina regresión forzada.

Durante períodos de transgresión, se produce un desplazamiento de la línea costera hacia áreas que solían ser tierra. Los sedimentos de la planicie costera quedan cubiertos por los

sedimentos de la playa, y a su vez, estos son cubiertos por los sedimentos de la zona costera. Por otro lado, durante períodos de regresión o regresión forzada, se observa un patrón opuesto: los sedimentos de la superficie costera quedan cubiertos por los sedimentos de la zona de playa, mientras que los sedimentos de la zona *offshore* se ven cubiertos por los sedimentos de la costa (Nichols, 2009).

### **5.1.3 Ciclos sedimentarios**

Los ciclos sedimentarios se han considerado formados por sedimentos marinos limitados por regresiones, sin embargo, Mutti (1981) indica que esta definición no es aplicable y propone redefinirlos como “el producto de una sedimentación transgresiva – regresiva sea cual sea su escala” (Arche, 2010). Se han propuesto varias clasificaciones de ciclos de acuerdo con el rango temporal, en este caso se seguirá la clasificación de Einsele (1992) en la cual se diferencian seis ordenes de ciclos (Vera, 1994).

Los ciclos de primer orden tienen una duración de al menos 50 millones de años y generalmente tienen espesores de varios cientos de metros (Vera, 1994). Estos ciclos son el resultado de procesos de agregación y/o disgregación de los continentes, así como de variaciones correlativas en el volumen de los océanos (Arche, 2010). Los ciclos de segundo orden abarcan un periodo de tiempo de 3 a 50 millones de años y son el resultado de variaciones de la tasa absoluta de subsidencia (cuencas) o de elevación de áreas continentales (Arche, 2010). Un ciclo de tercer orden o secuencia deposicional tiene una duración de 0,5 a 3 millones de años y se debe a variaciones eustáticas del nivel del mar (Vail et al., 1991 citado en Arche, 2010) y/o deformaciones del basamento de la cuenca sedimentaria debido a esfuerzos intraplaca (Cloetingh, 1986, 1988 citado en Arche, 2010). Un ciclo de cuarto orden o parasecuencia (Vail et al., 1991 citado en Vera, 1994) abarca un periodo de tiempo de 0,1 a 0,5 Ma y su espesor va de 1 a 10 metros. Consisten en

secuencias de facies que indican periodos relativamente cortos de profundización o somerización (Vera, 1994). La duración de los ciclos de quinto orden varía entre 20 y 100 mil años; estos ciclos son observables a escala de estratos y se caracterizan por la alternancia de diferentes tipos litológicos a una escala decimétrica o métrica (Vera, 1994). Por último, los ciclos de sexto orden (laminaciones y varvas) son visibles a escala de laminación, con dimensiones en el rango de milímetros o centímetros; su duración siempre es inferior a los 20.000 años (Vera, 1994).

#### **5.1.4 Parasecuencias**

Según Van Wagoner (1995) citado en Catuneanu (2006), una parasecuencia es “una sucesión de estratos o grupos de estratos relativamente concordantes, genéticamente relacionadas y limitadas por superficies de inundación”.

En la jerarquía del proceso del ciclo transgresión – regresión, la superficie de inundación es de rango muy inferior al de MFS (Maximum Flooding Surface), además, se constituye durante los leves pulsos de elevación del nivel de base, de orden inferior, que ocurren durante una regresión. Por tal motivo, se habla de parasecuencia para describir secuencias.

#### **5.2 Quimioestratigrafía**

La “quimioestratigrafía” es una disciplina de la Estratigrafía que se enfoca en el estudio e interpretación de la composición geoquímica de las rocas sedimentarias presentes en las secciones estratigráficas (Vera, 1994). La quimioestratigrafía o estratigrafía química consiste en caracterizar y correlacionar los estratos mediante el análisis geoquímico de elementos mayores, menores y traza, y resulta especialmente útil en secuencias con un control bioestratigráfico limitado (Pearce et al., 1999). La composición química de las rocas sedimentarias y su evolución a lo largo del tiempo son relevantes en diversas áreas de estudio, como la correlación estratigráfica, la evolución geoquímica del agua de mar, el análisis de paleoambientes, el origen de los materiales en cuencas

y la geocronología. La quimioestratigrafía, junto con otros métodos, contribuye a entender los cambios en los procesos fisicoquímicos de la Tierra y su influencia en la geodinámica externa, así como los procesos de alteración y diagénesis en las rocas sedimentarias.

### ***5.2.1 Proveniencia sedimentaria***

Tradicionalmente, la proveniencia de las areniscas se ha determinado mediante técnicas petrográficas convencionales. Sin embargo, en ciertos casos, las areniscas de grano fino pueden estar asociadas a elementos traza que proporcionan información adicional sobre su origen (Romero, 2007). La composición de las rocas sedimentarias está influenciada por el tipo de roca fuente, las condiciones fisicoquímicas del ambiente de deposición y los procesos diagenéticos que han ocurrido a lo largo del tiempo. Para identificar la proveniencia de las rocas sedimentarias y evaluar la intensidad de los procesos de meteorización, se utilizan indicadores geoquímicos. Estos indicadores permiten determinar la fuente de los sedimentos y el grado de alteración que han experimentado (Romero, 2007).

Las rocas arcillosas o de grano muy fino suelen presentar las concentraciones más altas de elementos traza, como tierras raras, Th, Sc, Cr y Co. Algunos elementos, como Fe, Mn, Pb y Cr, pueden ser móviles durante la diagénesis, mientras que Cs, Rb y Ba son elementos poco móviles. El Sr puede ser lixiviado, mientras que elementos inmóviles como Zr, Hf y Sn están distribuidos mecánicamente y controlados por la concentración de minerales pesados (Vera, 1994).

Las rocas silíceas félsicas suelen contener mayor concentración de los elementos La y Th, mientras que las rocas máficas presentan concentraciones más altas de Co, Sc y Cr. Estos elementos son poco afectados por los procesos de meteorización, por lo tanto, las relaciones de La o Th con Co, Sc o Cr pueden indicar la composición de la roca fuente (Cullers, 2000 citado en Romero, 2007). Las relaciones Th/Sc, Cr/Th y La/Co permiten establecer una diferencia entre una

proveniencia de rocas máficas vs. félsicas. Por ejemplo, Las relaciones La/Co y Th/Sc oscilan entre 1.8 y 13.8, y entre 0.84 y 20.5, en sedimentos de origen félsico, mientras que en rocas de origen máfico, estas relaciones muestran valores que van desde 0.14 hasta 0.38 y desde 0.05 hasta 0.22, respectivamente (Madhavaraju & Lee, 2009). Por último, la relación Cr/Th varía entre 4 y 15 en sedimentos derivados de rocas fuente félsicas, mientras que presenta valores de 25 a 500 en sedimentos cuya roca fuente es máfica (Madhavaraju & Lee, 2009).

### **5.2.2 Condiciones redox**

Junto con los cambios en la proveniencia, uno de los parámetros más importantes que los estudios basados en la quimioestratigrafía intentan modelar, son las variaciones en las condiciones de paleoreducción (paleoredox). Los cambios en el paleoredox generalmente implica distinguir entre ambientes óxicos, subóxicos y anóxicos. Las condiciones óxicas ocurren cuando las concentraciones de O<sub>2</sub> en las aguas profundas superan los 2 ml O<sub>2</sub>/1 H<sub>2</sub>O. En los ambientes subóxicos, los niveles de O<sub>2</sub> varían de 0.2 a 2 ml O<sub>2</sub>/1 H<sub>2</sub>O, mientras que durante las condiciones anóxicas son inferiores a 0.2 ml O<sub>2</sub>/1 H<sub>2</sub>O (Tyson & Pearson, 1991 citado en Craigie, 2018).

Las concentraciones de metales redox en los sedimentos marinos son influenciadas por las variaciones en la oxigenación de la columna de agua y del agua del fondo (Yarincik et al., 2000). Varios estudios han demostrado cambios pasados en el contenido de oxígeno del agua del fondo o en la productividad biológica mediante la variación en la concentración de metales traza sensibles al redox, como el Mn, V, Mo, U, Re y Cd; estos elementos tienden a enriquecerse en condiciones anóxicas (Morford & Emerson, 1999). Según Jarvis et al. (1998) diferentes elementos (As, Cd, Co, Cu, Fe, Mn, Ni, S, Sb, Se, Tl, U, V y Zn) experimentan movilización y redistribución en respuesta a cambios en las condiciones redox. Sin embargo, es importante destacar que otros

elementos como Si, Ti, Al, Mg, K y Zr no parecen ser afectados por estos procesos diagenéticos tempranos.

Bajo condiciones oxidantes, el manganeso tiene una baja solubilidad y se deposita en los sedimentos marinos en forma de oxihidróxidos. Estos se asocian con la materia orgánica, los carbonatos y los detritos presentes en los sedimentos. (Calvert et al., 1996 citado en Jarvis, 1998). Vera (1994) afirma que, en ambientes reductores, el Mn coprecipita con los carbonatos en menor proporción que en ambientes oxidantes, lo que resulta en un aumento del contenido de Mn. Según Yarincik et al. (2000), el Mn es más inestable que el Fe y durante condiciones reductoras y anóxicas puede disolverse desde el sedimento del fondo y difundirse hacia la columna de agua anóxica superpuesta.

### ***5.2.3 Condiciones paleoambientales***

La correlación entre variables geoquímicas se emplea como método para identificar la relación de ciertos elementos con los procesos paleoambientales que ocurrieron en la cuenca durante la deposición de la secuencia sedimentaria (Duarte, 2017).

Se muestra un interés particular en analizar la correlación del titanio (Ti) con variables como  $\text{SiO}_2$ , Nb, Y, Zr y  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , con el propósito de identificar en qué estratos este elemento se relaciona con el cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ), los minerales pesados (Nb, Y, Zr) o los minerales de arcilla ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) (Duarte, 2017). El titanio es un componente diagenéticamente estable en los sedimentos marinos, y la sólida correlación entre  $\text{TiO}_2$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$  sugiere la presencia de titanio en las estructuras de arcilla. La asociación del Ti con sedimentos de grano más grueso se observa en entornos de alta energía, posiblemente vinculados a zonas intermareales y a descensos en el nivel del mar (Wedepohl, 1978; Calvert et al., 1996, en Ross & Bustin, 2009).

El aluminio se emplea como indicador del aporte detrítico, utilizando la relación  $Al/(Al+Fe+Mn)$  para discernir si la fracción mineralógica de un determinado sedimento está compuesta principalmente por detritos continentales u oceánicos, o si proviene de un entorno submarino exhalativo (Boström et al., 1973). Cuando la relación es superior a 0.2, se atribuye el enriquecimiento de estos elementos a aportes detríticos; de lo contrario, se asocia con una fuente hidrotermal (Boström, 1973 en Carreño & Gómez, 2021).

Cuando las concentraciones de Si/Al superan el valor a 3, indica un enriquecimiento en  $SiO_2$ ; igualmente la relación  $SiO_2$  vs  $Al_2O_3$  podría sugerir si el exceso de sílice proviene de una fuente detrítica (alta correlación) o biogénica (Ross & Bustin, 2009).

Los elementos Rb, Zr, Ce, Cs y Th se atribuyen a las fases detríticas en sedimentos marinos y están controlados por la fracción de aluminosilicatos (Ross & Bustin, 2009). La concentración de Zr está relacionada con la presencia de  $Al_2O_3$ , es decir, si la correlación entre ellos es excelente indica que el aporte detrítico es arcilloso, sino hay aporte de detritos más gruesos (Gómez, 2021).

El Sr precipita con la calcita y aragonita y se ve modificado por la diagénesis en ambientes marinos someros, pero se mantiene relativamente constante en ambientes pelágicos; en donde está influenciado por la salinidad del mar, los aportes continentales y la actividad hidrotermal (Vera, 1994). La relación Sr/Ca se utiliza como un paleotermómetro, ya que la sustitución del Sr por el Ca en las rocas parece depender de la temperatura. Cambios bruscos en la relación Sr/Ca pueden producirse debido a variaciones en el nivel del mar de corta duración, generalmente inferiores a 1 millón de años. Durante períodos de alto nivel del mar, esta relación aumenta, y disminuye en los sedimentos depositados durante períodos de caída del nivel del mar, y viceversa (Vera, 1994).

Altas concentraciones de Mo, Cu, Co, Ni, Zn, Cr, U y V se asocian generalmente con paleoambientes anóxicos, y puede ser posible identificar sedimentos depositados bajo estas

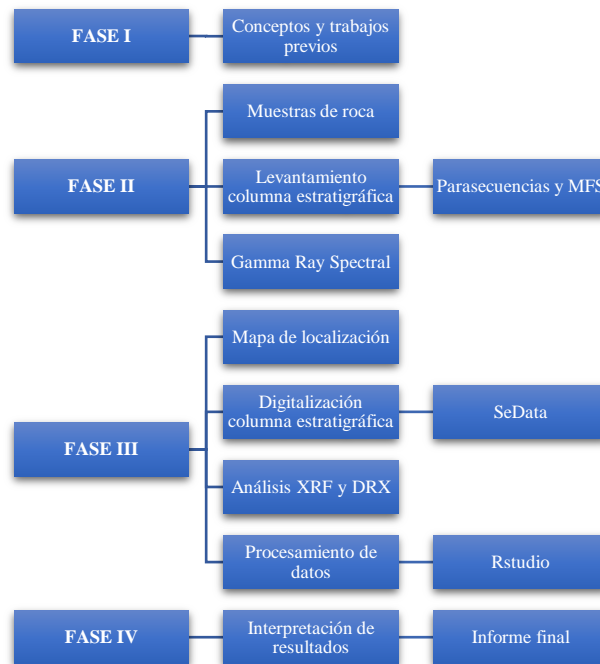
condiciones cuando los valores de estos elementos superan las concentraciones de "roca cortical promedio" (Wedepohl 1971, 1991; McLennan 2001 citado en Craigie, 2018). Sin embargo, se debe tener precaución al utilizar esta técnica para modelar paleoambientes, ya que estos elementos también pueden concentrarse en arcillas, carbonatos y minerales pesados. Por ejemplo, el U está comúnmente asociado con circón, monacita y apatita, por lo que altos niveles de este elemento pueden simplemente reflejar un aumento en la proporción de minerales pesados portadores de U, en lugar del inicio de la anoxia. Del mismo modo, el Cr está frecuentemente relacionado con espinelas de cromo, titanomagnetitas y otros minerales pesados. Los minerales de carbonato a menudo se caracterizan por concentraciones elevadas de zinc (Zn), mientras que los minerales arcillosos contienen cantidades variables de Mo, Cu, Co, Ni, Zn y V (Craigie, 2018).

## 6. Metodología

Con el fin de llevar a cabo los objetivos planteados, se establecieron cada una de las etapas que conformaron este estudio (Figura 8).

### **Figura 8**

*Diagrama metodológico para realizar el respectivo estudio*



### 6.1 Fase de compilación bibliográfica

En esta etapa se realizó una recopilación bibliográfica y revisión de los conceptos básicos que se abarcarían a lo largo de la investigación como quimioestratigrafía y estratigrafía secuencial. Se llevó a cabo la búsqueda y recopilación del material bibliográfico (publicaciones, informes, tesis) relacionado con la cuenca del Valle Medio del Magdalena a nivel regional y en específico para la Formación Tablazo.

Las fuentes de información utilizadas incluyen la base de datos del Instituto Colombiano del Petróleo (ICP), la Universidad Industrial de Santander (UIS), y material proporcionado por otras entidades a través de la web.

### 6.2 Fase de trabajo de campo

Se realizó en el municipio de Betulia (Santander), en el sector de la represa de Topocoro, en el sector conocido como paradero El Ramo (Figura 6). Las principales actividades realizadas

en esta etapa fueron: muestreo del afloramiento rocoso, levantamiento de la columna estratigráfica, por último, se acompañó a la toma de datos de Gamma Ray Espectral realizada en una campaña por Ecopetrol.

Se recolectaron un total de 95 muestras tomadas a intervalos de aproximadamente 1 metro (Apéndice A). La descripción de las muestras está basada en la clasificación de Dunham (1962) para rocas calcáreas y Folk (1980) para rocas terrígenas, y para determinar el tamaño de grano se usó la escala de Wentworth (1922). Para la referencia del color en el afloramiento y en las muestras se utilizó la Rock – Color Chart de Munsell (2009).

El levantamiento de la columna estratigráfica se realizó siguiendo el método de bastón de Jacob a escala 1:100. Se incluyeron datos como litologías, estructuras sedimentarias, número del bastón, datos estructurales, tamaño de grano, composición, contenido fósil, minerales secundarios, espesor de las capas, redondez y calibración de granos, bioturbación, entre otros. Las coordenadas geográficas del punto de inicio son 1079097 N, 1265752 E y del punto final 1078982 N, 1265927 E (Figura 6).

Además, se definieron e identificaron las posibles superficies de inundación de acuerdo con el concepto de parasecuencia. Se identificaron alrededor de once superficies de inundación junto con una Superficie de Máxima Inundación (MFS).

Se llevaron a cabo mediciones de Gamma Ray Spectral (GRS) para cuantificar las concentraciones de Uranio (U), Torio (Th) y Potasio (K), utilizando el instrumento Gamma Surveyor II. El equipo se posiciona en el área de interés y se tiene en cuenta el metro en el que fue tomada la medida. Estas mediciones se realizaron regularmente en intervalos de 1 pie de espesor a lo largo de la sección estratigráfica.

### **6.2.1 Gamma Ray Spectral (GRS)**

La espectrometría de rayos gamma es una técnica de teledetección que proporciona información geoquímica relevante en la prospección minera, el mapeo geológico y el estudio del medio ambiente (López, s.f.). Permite la determinación de radioelementos de potasio, uranio y torio, los cuales están presentes en formaciones naturales emitiendo concentraciones de radiación gamma, la cual es importante para proporcionar información sobre la historia geológica de una región. Estos elementos son medidos utilizando espectrómetros debidamente calibrados. A partir de los datos obtenidos, se pueden calcular los contenidos de potasio (K) en porcentaje, uranio (eU) en partes por millón (ppm) y torio (eTh) en partes por millón (ppm). Es importante mencionar que los contenidos de uranio y torio se determinan a partir de la medición de sus productos de desintegración,  $^{214}\text{Bi}$  y  $^{208}\text{Tl}$ , respectivamente. Por lo tanto, es más apropiado expresar los contenidos de estos elementos como sus equivalentes en uranio (eU) y torio (eTh), lo cual proporciona una mejor comparabilidad entre las muestras y una medida más precisa de su contenido radioactivo (López, s.f.).

La espectroscopia de rayos gamma se basa en la detección y análisis de la energía de los rayos gamma incidentes. Las fuentes radiactivas emiten rayos gamma con diferentes energías e intensidades. La primera etapa consiste en la detección de los rayos gamma utilizando un detector adecuado como, por ejemplo, los detectores de centelleo, detectores de semiconductores y detectores de gas; estos capturan y miden la energía de los rayos gamma entrantes. Al detectar y examinar estos rayos se genera un espectro de rayos gamma. El espectro de energía obtenido representa la distribución de la intensidad de los rayos gamma en función de su energía. Cada pico o banda en el espectro corresponde a una energía específica de los rayos gamma, lo que

proporciona información sobre los isótopos radioactivos presentes y sus concentraciones relativas en la muestra (Espectroscopia de rayos gamma: definición, principio, partes, usos., 2023).

En geología, la espectrometría de rayos gamma se utiliza, entre otras cosas, para detectar contactos litológicos ocultos por materiales de relleno y en la prospección de minerales radioactivos (Oyarzún et al., 2002). En general, los elementos Uranio (U), Potasio (K) y Torio (Th) son abundantes en rocas félsicas, las cuales son ricas en minerales como feldespatos potásicos y micas. Por otro lado, el contenido de estos elementos tiende a disminuir en rocas máficas, que están compuestas principalmente por minerales como anfíboles y piroxenos (López & Oyarzún, 1974 citado en Oyarzún et al., 2002).

Según Moreno y Arévalo (2015), la interpretación de las relaciones Th/U basadas en el estudio de Adam & Weaver (1958) es la siguiente: cuando los valores de Th/U son bajos, sugiere la presencia de ambientes submareales o intermareales y condiciones reductoras, lo que favorece la formación de pirita y está asociado con un aumento de materia orgánica; cuando los valores son altos, indica un incremento en la meteorización, relacionado con condiciones óxicas y ambientes supramareales. Los valores intermedios de la relación Th/U (aproximadamente de 2 a 7) podrían indicar la mezcla de sedimentos que provienen de entornos con relaciones bajas y altas de Th/U, relacionado con ambientes intermareales.

### **6.3 Fase de laboratorio y trabajo de oficina**

Por medio del aplicativo SeData (desarrollado por el Instituto Colombiano del Petróleo) se digitalizó la columna estratigráfica a escala 1:100. Primero, se digitalizó las capas litológicas teniendo en cuenta las bases y topes de estas mismas, luego se incluyen características sedimentarias tales como, fósiles, minerales accesorios y secundarios, bioturbación, datos estructurales y demás observaciones que se hayan tenido en cuenta al momento de evaluar el

afloramiento. Finalmente, se genera la columna estratigráfica haciendo uso del paquete analítico “SDAR” versión 0.9-55 (Ortiz and Jaramillo, 2020) del entorno de R versión 4.3.0 (R Core Team, 2023).

### **6.3.1 Análisis químicos**

El análisis de las muestras obtenidas previamente en campo se realizó en el laboratorio de Procesamiento de Muestras Geológicas del Instituto Colombiano del Petróleo para determinar la composición química elemental de los minerales constituyentes, aplicando las siguientes técnicas analíticas: Difracción de Rayos X (DRX) y Fluorescencia de Rayos X(XRF).

**6.3.1.1 Difracción de Rayos X (DRX).** Es un método analítico utilizado para investigar la estructura interna de los sólidos cristalinos. Aunque sus aplicaciones son variadas, su uso más común es la identificación de las fases cristalinas presentes en una muestra pulverizada. Este proceso, conocido como "Análisis mineralógico mediante DRX", se basa en la premisa de que cada fase cristalina tiene un difractograma único y característico, determinado por su estructura interna y la composición de átomos que la conforman (Sangüesa, 2007).

Una limitación de esta técnica es su incapacidad para detectar minerales que contienen materia orgánica en su estructura, lo que puede resultar en ocasiones en la falta de identificación de ciertos minerales.

**6.3.1.2 Fluorescencia de Rayos X (XRF).** La espectroscopía de fluorescencia de rayos X (XRF) es una técnica utilizada para la identificación de elementos en una muestra mediante la detección de la radiación de rayos X secundaria o fluorescente emitida después de la exposición de la muestra a una fuente de rayos X primarios (De la Cruz, 2018). Utilizando esta técnica, es factible cuantificar la concentración de elementos desde el Sodio ( $Z = 11$ ) hasta el Uranio ( $Z = 92$ ). Sin embargo, no es posible determinar elementos livianos como el hidrógeno, oxígeno,

carbono y nitrógeno debido a la baja energía de sus rayos X y a su baja eficiencia en la generación de fluorescencia (De la Cruz, 2018).

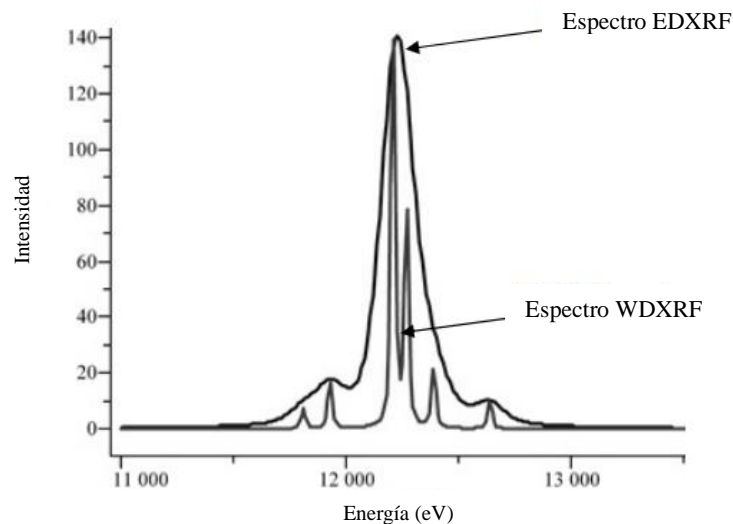
Los dos tipos principales de XRF utilizados en los estudios de quimioestratigrafía son la fluorescencia de rayos X de dispersión de energía (ED-XRF) y la fluorescencia de rayos X de dispersión de longitud de onda (WD-XRF).

En general, los WD-XRF ofrecen un mayor número de elementos analizados desde Berilio (Be) hasta el Uranio (U) y una mejor calidad de datos (en términos de precisión, exactitud y límites de detección) en comparación con los ED-XRF (utilizada en este proyecto).

En la Figura 9 se puede observar una comparación entre el espectro adquirido en un sistema ED-XRF y el espectro obtenido en un sistema WD-XRF (Sharma et al., 2009).

### Figura 9

*Comparación del espectro representativo para EDXRF y WDXRF*



*Nota.* En este espectro, el sistema EDXRF adquiere prácticamente todo el rango espectral simultáneamente, como se muestra en el espectro superior, lo que habilita la detección de elementos de gran parte de la tabla periódica en cuestión de segundos. Por otro lado, con el

WDXRF, la adquisición del espectro se realiza de manera punto por punto, tal como se muestra en el espectro inferior. Adaptado de “X-ray fluorescence analysis Indian and other countries coins using Energy Dispersive Experiment (EDX) method” (p. 6), por M. Sharma, 2009, *All India Forensic Science Conf XX*.

#### **6.4 Fase de análisis de resultados**

En esta etapa se procesaron, analizaron e interpretaron los datos obtenidos en campo y en el laboratorio. Los datos quimioestratigráficos inorgánicos se emplearon para establecer una zonación quimioestratigráfica y relacionar los cambios eustáticos con cambios en la química elemental de las muestras. Finalmente, se elaboró el presente informe que contiene los elementos teórico-prácticos utilizados en la caracterización quimioestratigráfica de la Formación Tablazo sección El Ramo.

### **7. Resultados**

#### **7.1 Caracterización estratigráfica Formación Tablazo sección El Ramo**

Teniendo en cuenta la información recolectada en campo, se realizó una columna estratigráfica de aproximadamente 119 metros (ver Apéndice B).

La sección estratigráfica fue dividida en tres segmentos informales que exhiben características litológicas y estratigráficas específicas, las cuales se resumen en la Tabla 1.

#### **Tabla 1**

*Características litoestratigráficas de la Fm. Tablazo (El Ramo)*

Unidad litoestratigráfica	Segmento	Intervalo (m)	Espesor (m)	Litologías	Minerales secundarios y accesorios	Fósiles	N° muestras
Formación Tablazo	I	0 – 31.5	31.5	Lodolita calcárea, arenita calcárea, wackestone de foraminíferos, wackestone de bivalvos, packstone de bivalvos, lodolita, arenisca, limolita, wackestone arenoso, packstone de foraminíferos	Mv, fragmentos carbonosos, óxidos de hierro (OxFe), Gp, pirita (Py)	Foraminíferos planctónicos, bivalvos, <i>thalassinoides</i>	43
	II	31.5 – 58.7	27.2	Wackestone de bivalvos, packstone de bivalvos, lodolita, wackestone arenoso, limolita calcárea, wackestone, arenisca, arenisca calcárea, limolita	Glauconita (Glt), yeso (Gp), siderita (Sd), yCa, Mv	Foraminíferos planctónicos, bivalvos, moluscos articulados, moluscos desarticulados, gasterópodos	34
	III	58.7 – 118.5	59.8	Wackestone de bivalvos, wackestone arenoso, packstone de bivalvos, lodolita calcárea, wackestone, wackestone de foraminíferos, arenisca, arcillolita, packstone de foraminíferos, arenisca calcárea, lodolita, limolita	Glt, muscovita (Mv), Py, OxFe, calcopirita, Gp, venas de calcita (yCa)	Foraminíferos planctónicos, bivalvos, moluscos, crustáceos, gasterópodos	18

*Nota.* Resumen litoestratigráfico de la Fm. Tablazo en la sección de El Ramo, que incluye los tres segmentos informales con su espesor correspondiente, junto con algunas de sus características sedimentarias y muestras obtenidas en cada uno de ellos.

Segmento I (0 – 31.5 m) (Figura 10). Incluye capas gruesas de lodolita calcárea de tonalidad marrón (5Y 3/2) y arenisca calcárea con foraminíferos, así como wackestones que contienen tanto foraminíferos como bivalvos de diversos tamaños, con fragmentación y desorganización en algunas capas. En el intervalo de 7 a 9 metros se presentan niveles de lodolita gris físil con muscovita, lodolita con fragmentos carbonosos y areniscas muy finas con diferentes tipos de laminación. En el rango de 23 a 29 metros se observan intercalaciones de capas que varían

desde wackestones y lodolitas ligeramente calcáreas. Hacia la parte media, las capas de wackestone presentan un aumento en el contenido de materia orgánica y hacia el tope se encuentran wackestones ligeramente arenosos, lodolitas calcáreas y areniscas con presencia de ondulitas. A la altura de 30 metros, se registran concreciones calcáreas de 16 cm de diámetro, y en el metro 31 se identifican packstone que contienen foraminíferos y bivalvos. En la parte superior de esta capa, se observan bivalvos de hasta 7 cm dispuestos caóticamente, junto con fósiles de trigonia, mientras que el resto de la capa contiene bivalvos de 0.5 a 3 cm. A lo largo del segmento, se identifican contactos planos, irregulares y ondulados.

Segmento II (31.5 – 58.7 m) (Figura 11). Hacia la base, la formación consiste en una serie de capas de packstone con bivalvos en la parte superior, lodolitas silíceas con óxidos de hierro y, ocasionalmente, concreciones calcáreas, limolitas con bivalvos esporádicos y nódulos calcáreos, así como wackestone arenoso con concreciones calcáreas y fósiles de gasterópodos. Hacia el metro 43.5, presenta una ritmita compuesta por wackestone y limo calcáreo con fósiles de bivalvos y venas de calcita ocasionales. A la altura de 45.5 metros, se identificó arenisca glauconítica acompañada de concreciones de siderita y desarrollo de matriz calcárea al tope, seguida de una caliza con bivalvos y bajo contenido de glauconita, que varía desde wackestone en la base hasta packstone. A partir del metro 49.36, se evidencian lodolitas de tono gris oscuro con presencia ocasional de bivalvos y foraminíferos, junto con concreciones de siderita que contienen bivalvos. Hacia el tope de este segmento, se aprecia el inicio de calizas arenosas con aparición de nódulos de siderita, foraminíferos y gasterópodos.

Segmento III (58.7 – 118.5 m) (Figura 12). La base de este segmento presenta capas de wackestone arenoso con laminación ondulada, wackestone y packstone de bivalvos. Así como capas medias a gruesas de wackestone de foraminíferos con concreciones y glauconita. A la altura

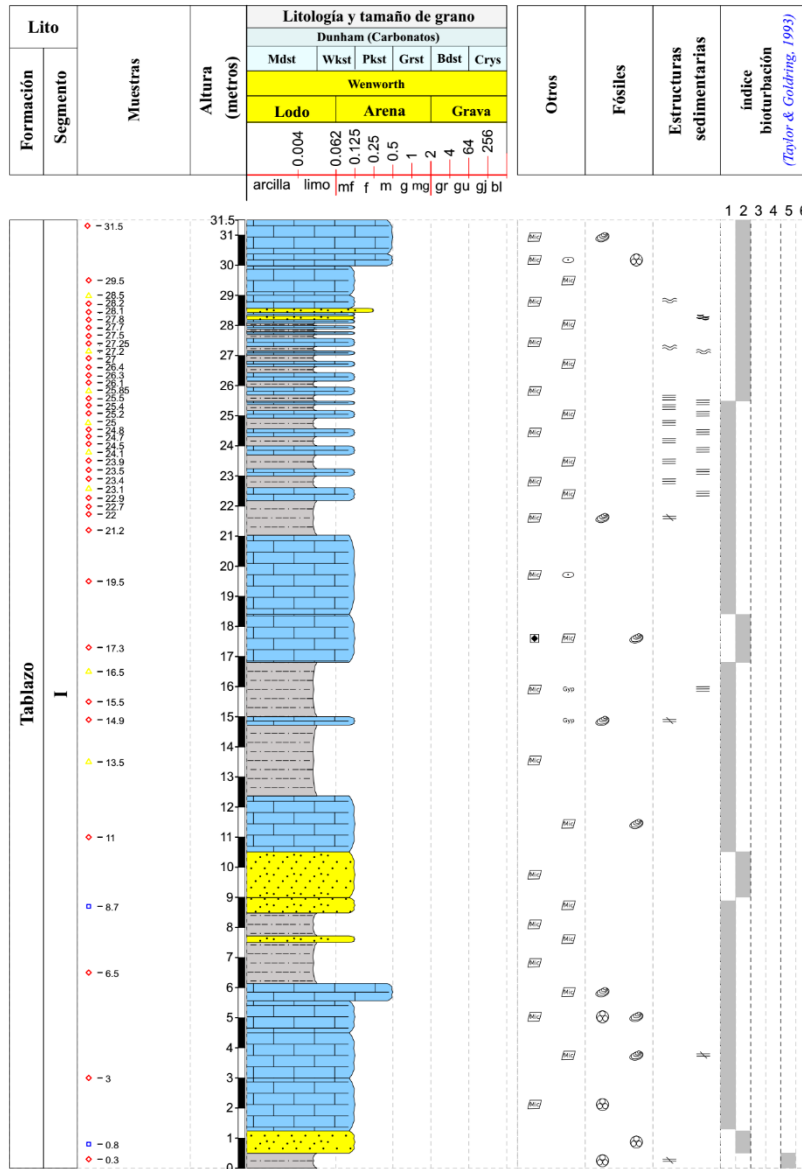
de 69.23 metros, se encuentra una capa de arenisca calcárea con erosión basal y al tope se erosiona por un lente de packstone que contiene bivalvos y gasterópodos. En el intervalo de 70.7 – 72 metros, se observan intercalaciones de shale con láminas de packstone de foraminíferos, seguido de capas gruesas de wackestone que gradúan hacia packstone de bivalvos con venas de calcita y nódulos esparitizados hasta el metro 77. Seguidamente, se presentan intercalaciones de shale calcáreo con materia orgánica y wackestone de foraminíferos. Hacia el metro 85, se evidencian superficies estilolíticas en packstone de foraminíferos con glauconita. El metro 95 muestra una capa de lodolita arenosa muy gruesa con concreciones de micrita de hasta 2 cm. A partir del metro 97, aparecen capas muy gruesas de areniscas calcáreas con concreciones esféricas y elipsoidales de 12 a 15 cm, presencia de muscovita y óxidos de hierro. Hacia el metro 108, una capa de arcillolita lodosa muestra óxidos rellenando fracturas y se presencian láminas de yeso. Más adelante, se encuentran areniscas altamente meteorizadas, oxidadas y fracturadas. Finalmente, hacia el metro 114.5, hay capas de wackestone compuestas por fragmentos de bivalvos, con venas de calcita y packstone que contienen bivalvos alineados paralelamente con la estratificación.

### **Figura 10**

*Segmento uno (I) del afloramiento Tablazo – El Ramo*

COLUMNA ESTRATIGRÁFICA TABLAZO – EL RAMO

FORMACIÓN TABLAZO

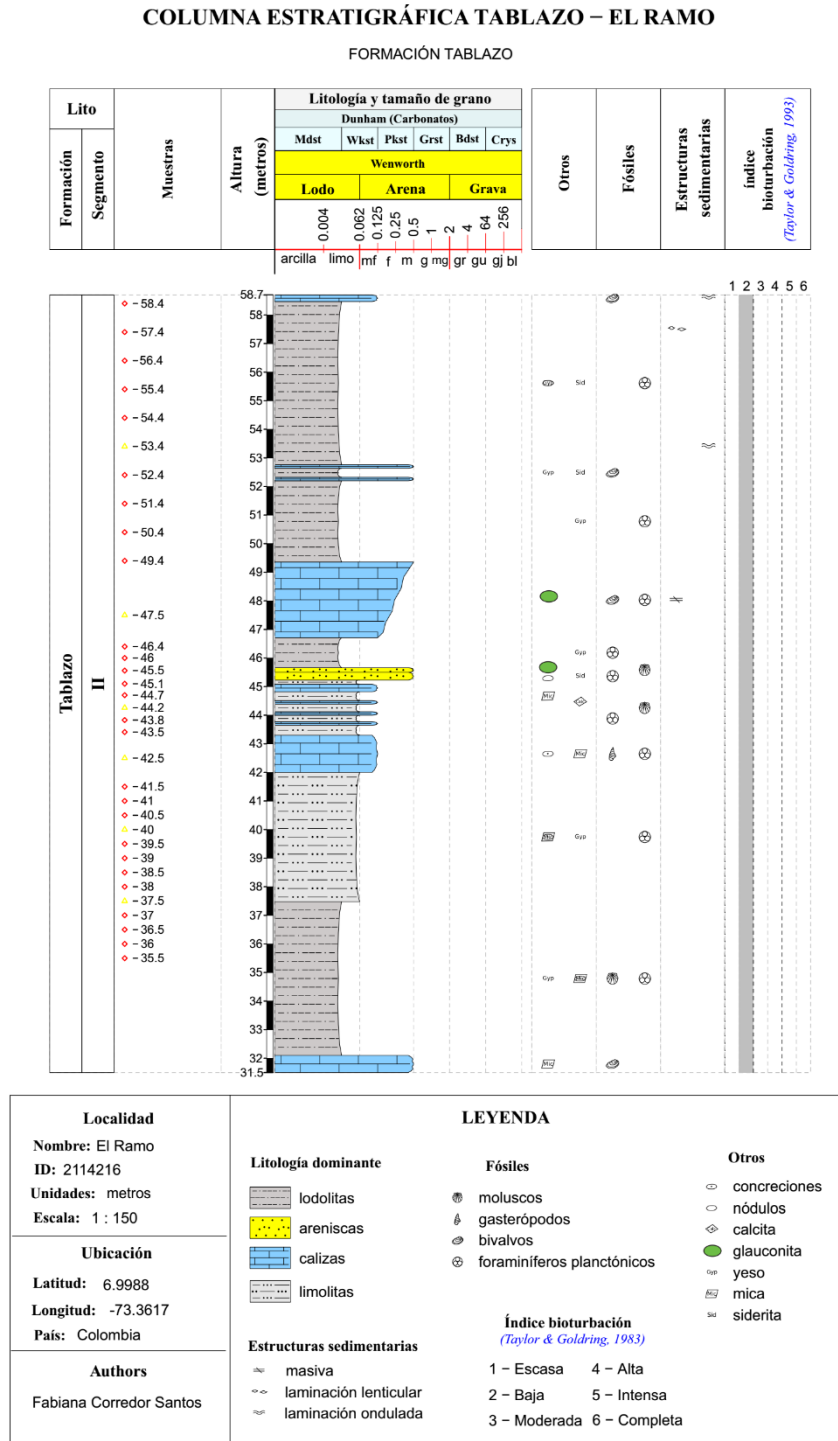


Localidad		LEYENDA		
Nombre: El Ramo ID: 2114216 Unidades: metros Escala: 1 : 150		<b>Litología dominante</b>	<b>Estructuras sedimentarias</b>	<b>Fósiles</b>
<b>Ubicación</b> Latitud: 6.9988 Longitud: -73.3617 País: Colombia		lodo (gris)	masiva (—)	bivalvos (o)
<b>Autor</b> Fabiana Corredor Santos		areniscas (amarillo)	laminación planar paralela (   )	foraminíferos planctónicos (o)
		calizas (azul)	laminación flaser (wavy)	
			laminación ondulada (wavy)	
		<b>Índice bioturbación (Taylor &amp; Goldring, 1983)</b>	<b>Otros</b>	
		1 - Escasa	4 - Alta	concreciones (o)
		2 - Baja	5 - Intensa	yeso (—)
		3 - Moderada	6 - Completa	mica (—)
				pirita (*)

Nota. La sección I de la columna estratigráfica de la Fm. Tablazo. Fuente: Autor.

**Figura 11**

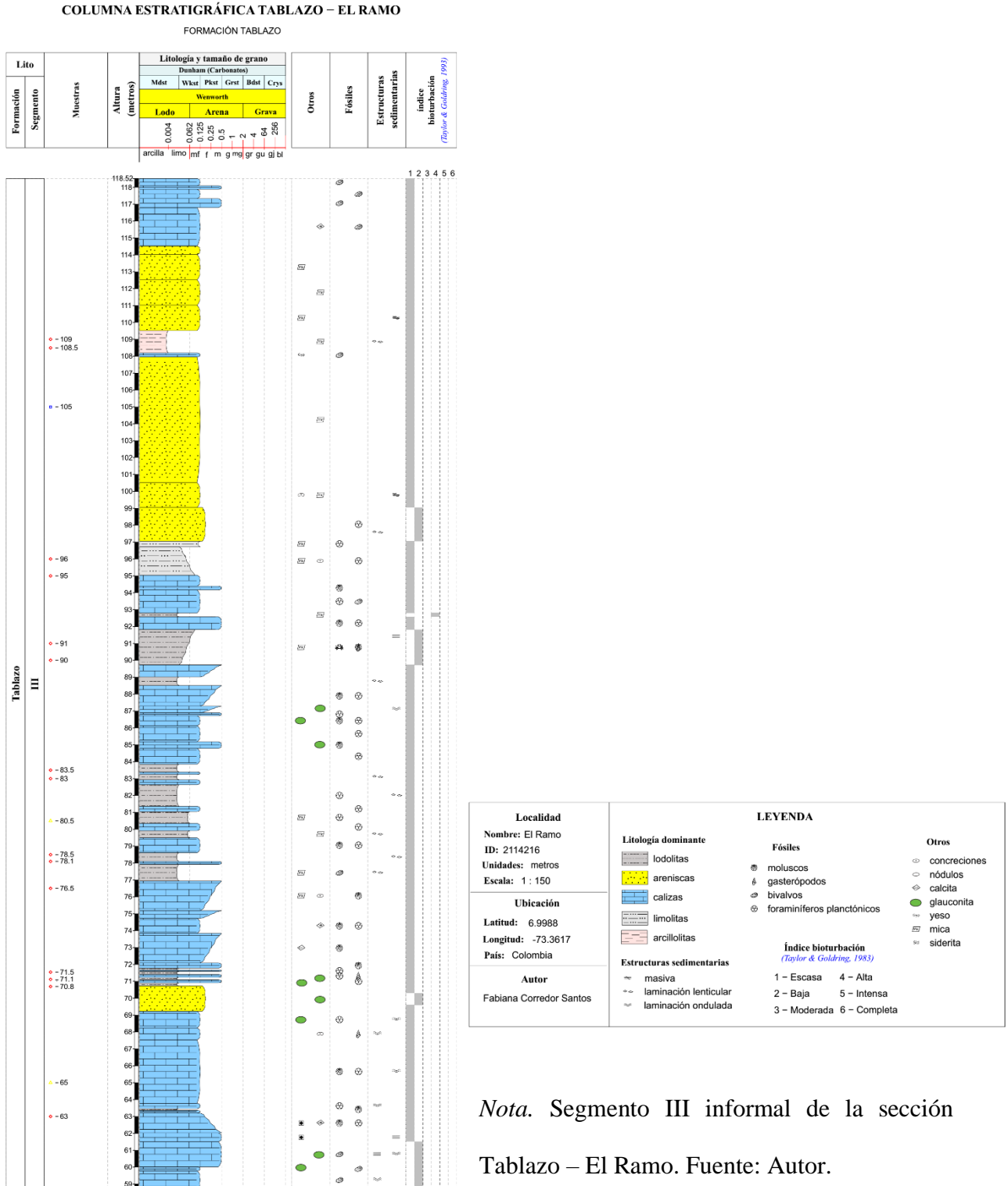
Segmento dos (II) de la Formación Tablazo - El Ramo



Nota. Segmento II de la columna de la Formación Tablazo, sección El Ramo. Fuente: Autor.

Figura 12

Segmento tres (III) del afloramiento Tablazo - El Ramo



### 7.1.1 Superficies de inundación

Durante la fase de campo, se interpretaron once superficies de inundación, aplicando el concepto de "parasecuencia", que se refiere a una secuencia de rocas relacionadas genéticamente y delimitadas por cambios en el nivel del mar (superficies de inundación). Además, se determinó que la superficie de máxima inundación se ubicaba a una altura estratigráfica de 55 metros. La posición estratigráfica de las superficies se presentan en la Tabla 2 y en la columna estratigráfica detallada en el Apéndice B.

**Tabla 2**

*Ubicación estratigráfica superficies de inundación, Fm. Tablazo (El Ramo)*

Unidad litoestratigráfica	Superficies de inundación	Altura estratigráfica (m)
Formación Tablazo	1	6.14
	2	12.37
	3	21.03
	4	32.1
	5	49.36
	6	63.2
	7	70.73
	8	76.94
	9	94.39
	10	108.19
	11	118.52

*Nota.* En la tabla 2 se muestra la posición estratigráfica en metros de las superficies de inundación interpretadas en el afloramiento estudiado. Fuente: Autor.

### 7.2 Mineralogía por Difracción de Rayos X

La caracterización mineralógica se llevó a cabo mediante la técnica de Difracción de Rayos X (DRX), la cual permitió la identificación de minerales arcillosos (filosilicatos) y minerales no arcillosos con una estructura interna ordenada; asimismo se logró establecer el perfil mineralógico

y los diferentes tipos de mineralogías presentes. Este análisis se realizó en dos modalidades: una en la que se analizó la muestra en su totalidad (Roca Total o *bulk*) y otra en la que se analizó la fracción arcilla, que consiste en las partículas de la muestra con un diámetro efectivo menor a 2  $\mu\text{m}$ .

En el análisis cualitativo del afloramiento Tablazo - El Ramo, se logró la identificación de diversas fases cristalinas (Figura 13), que se corresponden con las siguientes fases minerales en la muestra de roca total: Cuarzo, Carbonatos (incluyendo calcita, dolomita y siderita), Minerales arcillosos (filosilicatos no fibrosos o aluminosilicatos hidratados), Plagioclasa, Feldespato potásico, Apatito, Pirita, Yeso, otras fases cristalinas que se encuentran en proporciones menores o presentan una menor cristalinidad (“Otros”).

Según se evidencia en la Tabla 3, en todo el afloramiento se destaca una predominancia mineral, siendo el cuarzo el mineral principal, seguido por calcita y minerales arcillosos, mientras que los demás minerales se encuentran en proporciones mínimas.

En el segmento I (0 – 31.5 m), las muestras de roca analizadas revelan una abundancia mineral de cuarzo, con un contenido promedio del 48% (ver Tabla 3). Al mismo tiempo, la calcita está presente en niveles promedio del 26%, llegando a superar el 50% en estratos específicos. Además, se identifican otras fases correspondientes a minerales arcillosos, con una media del 19%, mostrando variaciones predominantemente por debajo del 22% (ver Figura 13); las restantes fases se encuentran en proporciones inferiores al 5%.

Al igual que en el intervalo anterior, el segmento II (31.5 – 58.7 m) exhibe una notable presencia de cuarzo, con un contenido promedio del 46% (Tabla 3), variando principalmente en el rango del 50% al 70%. Se evidencia un incremento en la proporción de minerales arcillosos, con un promedio del 40%, y una disminución en el contenido de calcita, que se registra en valores

inferiores al 5% en la mayoría de las capas. En este segmento, se destaca la presencia más significativa de yeso, con un promedio del 1.1%.

Finalmente, en el segmento III (58.7 – 118.5 m) se destaca la proporción más alta de cuarzo, con un promedio del 52.4%, siendo que el 66% de las muestras muestran valores superiores al 50%. En lo que respecta a los minerales arcillosos y la calcita, exhiben concentraciones promedio del 18% y 21%, respectivamente (ver Tabla 3). Las demás fases minerales presentan valores inferiores al 5%.

**Tabla 3**

*Media de la proporción de las fases minerales (bulk) en la sección El Ramo*

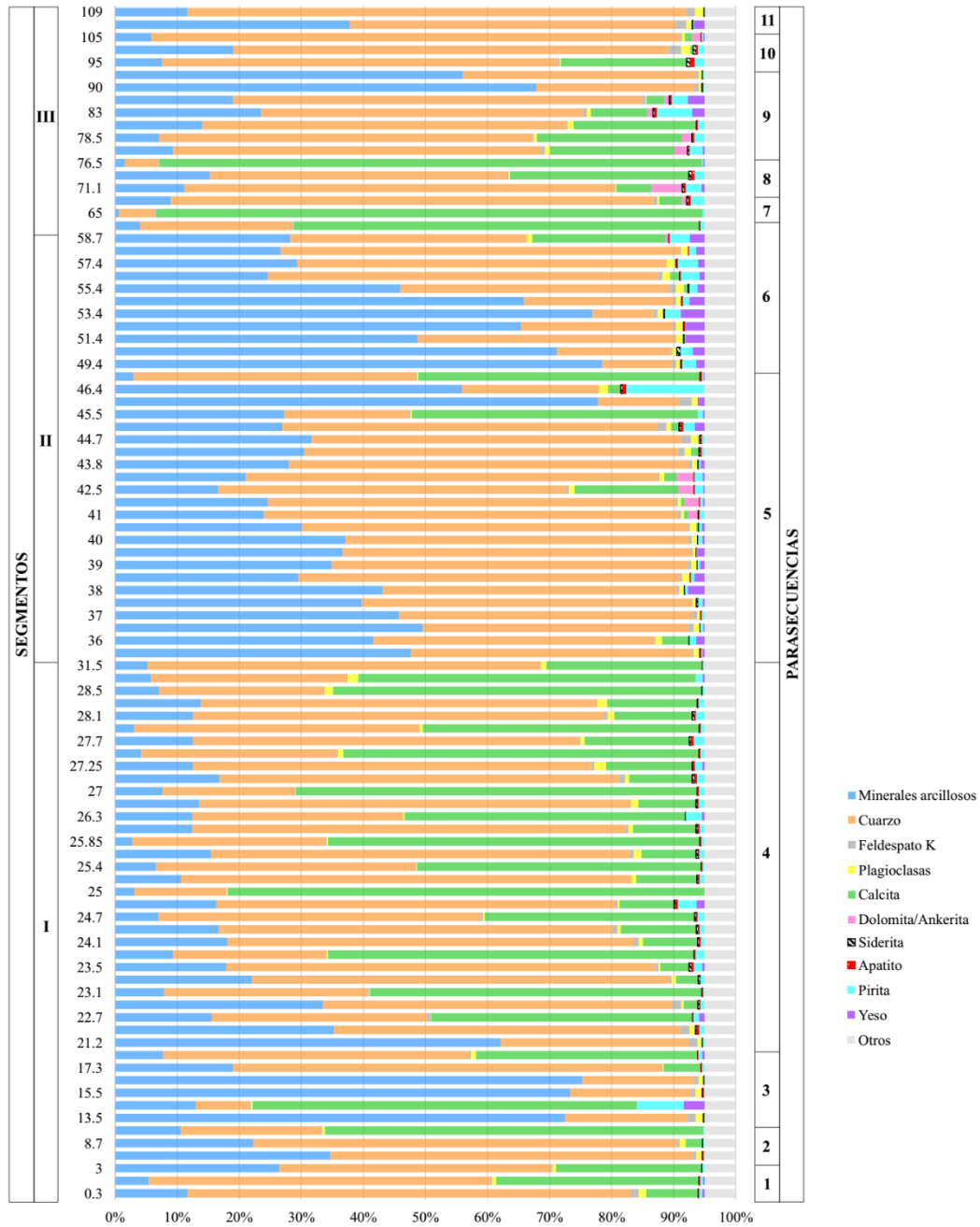
Tablazo – El Ramo Bulk DRX						
Mineralogía (%)	Segmento I		Segmento II		Segmento III	
	Promedio	S	Promedio	S	Promedio	S
Minerales arcillosos	18.87	18.45	40.12	18.35	17.79	17.90
Cuarzo	47.99	19.38	46.23	17.65	52.35	23.21
Feldespato K	0.43	0.41	0.53	0.44	0.56	0.54
Plagioclasas	0.70	0.46	0.90	0.30	0.52	0.44
Calcita	25.57	23.41	4.27	11.30	20.89	28.42
Dolomita/Ankerita	0.00	0.00	0.28	0.75	0.70	1.22
Siderita	0.18	0.14	0.15	0.12	0.23	0.18
Apatito	0.11	0.10	0.06	0.09	0.14	0.17
Pirita	0.95	1.19	1.38	2.16	1.37	1.35
Yeso	0.19	0.56	1.07	1.03	0.43	0.80
Otros	5.00	0.00	5.00	0.00	5.00	0.00

*Nota.* En la tabla se presentan los valores promedio junto con las desviaciones estándar (S) de cada fase mineral para los diferentes segmentos de la Formación Tablazo (El Ramo). Fuente: Autor.

**Figura 13**

*Distribución de fases minerales encontradas en el afloramiento Tablazo – El Ramo*

TABLAZO - EL RAMO



*Nota.* En el gráfico, el eje x representa la proporción porcentual de las fases minerales, mientras que en el eje y se muestra la altura estratigráfica en la que se tomó cada muestra. A la izquierda se presentan los intervalos definidos para esta secuencia, y a la derecha se identifican las parasecuencias interpretadas, delimitadas entre sí por superficies de inundación. Fuente: Autor.

La distribución de la fracción de arcilla ( $<2 \mu\text{m}$ ) en las muestras de la Formación Tablazo se describe de la siguiente manera: en el segmento I, prevalece la presencia de calcita microcristalina con proporciones promedio del 41% (ver Tabla 4), posiblemente asociada a la existencia de cemento calcáreo en las rocas. En el segmento II, se destaca una concentración significativa de caolinita e illita, con valores promedio del 58% y 24% (Tabla 4), respectivamente, los cuales podrían vincularse a procesos diagenéticos o de meteorización y alteración de feldespatos. Por último, en el segmento III, se observa un mayor contenido de caolinita, con un promedio del 36%. La illita y la calcita en este segmento presentan valores promedio similares (21%). Los interestratificados, posiblemente de illita/esmectita o illitas alteradas, se encuentran en mayor proporción en el segmento III, con un valor promedio del 12% (ver Tabla 4). Cabe destacar que el segmento I muestra un contenido más elevado de calcita microcristalina, mientras que el segmento II presenta una mayor proporción de caolinita (Figura 14).

**Tabla 4**

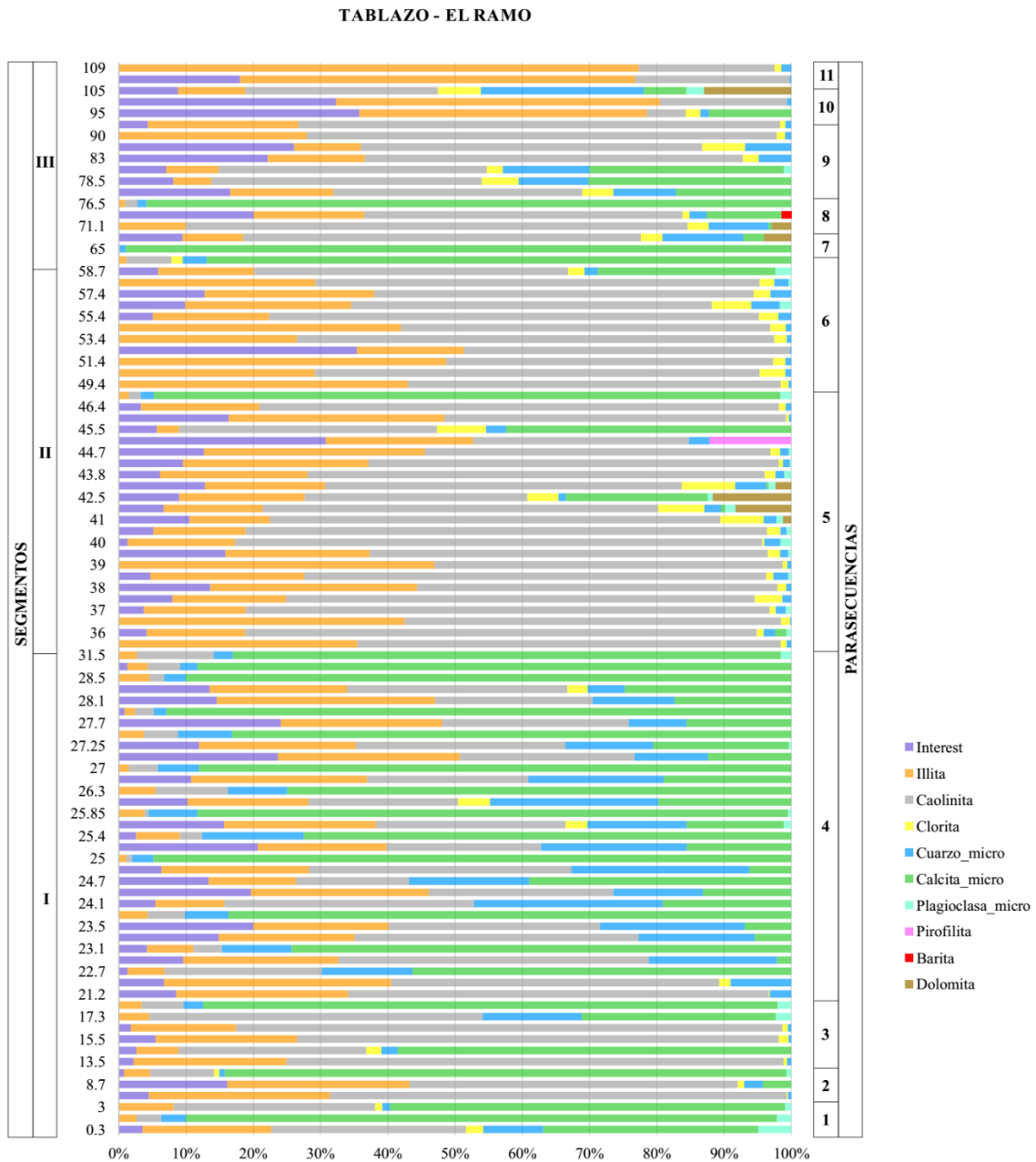
*Valores promedio para las fases minerales a nivel de arcilla de la Fm. Tablazo*

Tablazo – El Ramo Arcilla DRX						
Mineralogía (%)	Segmento I		Segmento II		Segmento III	
	Promedio	S	Promedio	S	Promedio	S
Interestratificados	6.90	7.40	7.31	8.19	11.59	11.49
Illita	14.41	10.01	23.96	11.43	21.01	21.23
Caolinita	27.17	21.58	57.77	15.57	36.20	23.82
Clorita	0.54	1.07	2.37	2.18	2.33	2.10
Cuarzo micro	9.69	7.77	1.58	1.08	5.74	6.14
Calcita micro	40.90	35.12	5.46	17.67	21.73	33.67
Plagioclasa micro	0.38	0.93	0.49	0.63	0.21	0.64
Pirofilita	0.00	0.00	0.36	2.05	0.00	0.00
Barita	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08	0.34
Dolomita	0.00	0.00	0.69	2.40	1.11	3.08

*Nota.* Se determinan las proporciones promedio, junto con las desviaciones estándar (S) de cada fase mineral a nivel de fracción (<2 µm) para los tres segmentos de la Formación Tablazo (El Ramo). Fuente: Autor.

**Figura 14**

*Distribución de la mineralogía en la fracción <2 µm del afloramiento Tablazo – El Ramo*



*Nota.* En el gráfico, el eje x representa la proporción porcentual de las fases minerales  $<2 \mu\text{m}$  presentes en cada muestra, mientras que en el eje y se muestra la altura estratigráfica en la que fue tomada dicha muestra. En el lado izquierdo se muestran los intervalos definidos, y en el lado derecho se identifican las parasecuencias interpretadas. Fuente: Autor.

### **7.3 Química elemental por Fluorescencia de Rayos X**

Los componentes se categorizaron en elementos mayores, que son los componentes principales en la mayoría de las rocas, generalmente presentes en porcentajes superiores al 0.1%; y elementos menores, que son menos comunes y suelen estar en porcentajes inferiores al 0.1% o a niveles de ppm. Los elementos mayores incluyen sodio, magnesio, potasio, calcio, titanio, aluminio, hierro y silicio, expresados como óxidos correspondientes:  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , con unidades de medida en porcentaje (%). Los elementos menores abarcan los demás elementos de la tabla periódica, expresados en su forma elemental y medidos en partes por millón (ppm).

#### **7.3.1 Elementos mayores**

Las concentraciones de estos elementos están expresadas en porcentaje en peso (%w) de sus óxidos correspondientes, tal como se muestra en la Tabla 5.

El segmento I presenta valores promedio moderados a bajos para el contenido de  $\text{CaO}$  y de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (24% y 12% respectivamente). Sin embargo, este intervalo es el que tiene mayor contenido de  $\text{CaO}$  (ver Tabla 5). Es importante mencionar que la Formación Tablazo en El Ramo presenta concentraciones altas de  $\text{SiO}_2$  a lo largo de toda la sección (ver Figura 15), registrando los mayores contenidos en el segmento II [31.5 – 58.7] m, con una concentración promedio del 62% (Tabla 5).

En el segmento III, se observa un aumento en los niveles de  $\text{CaO}$  en comparación con el segmento II, alcanzando su valor máximo (86.5%) a los 76.5 m; al mismo tiempo, refleja el valor

máximo de SiO<sub>2</sub> (81%) correspondiente al metro 105. Las concentraciones de los elementos mayores restantes (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O y MgO) son considerablemente reducidas, todas inferiores al 5%, excepto en el caso del Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> que presenta una concentración promedio del 6.7%, en el intervalo II y de 5.6% en el intervalo I.

**Tabla 5**

*Concentración de elementos mayores (%w) en la Formación Tablazo - El Ramo*

Tablazo - El Ramo									
Elemento (%w)	Segmento I			Segmento II			Segmento III		
	Promedio	Min	Máx	Promedio	Min	Máx	Promedio	Min	Máx
Na <sub>2</sub> O	0.01	0.00	0.45	0.00	0.00	0.00	0.06	0.00	1.14
MgO	0.47	0.00	4.01	0.69	0.00	1.67	0.67	0.00	1.62
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.06	3.26	40.20	19.64	3.91	28.60	13.09	1.12	26.10
SiO <sub>2</sub>	54.20	0.22	73.60	61.56	31.20	71.00	56.89	8.94	81.10
CaO	23.56	0.35	66.80	6.23	0.21	50.90	22.44	0.04	86.50
TiO <sub>2</sub>	0.78	0.16	3.24	1.28	0.36	1.63	0.81	0.00	1.97
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.67	0.03	23.10	6.66	2.46	24.90	3.22	0.38	5.89
K <sub>2</sub> O	2.75	0.00	51.10	2.70	0.26	5.04	2.04	0.00	5.19

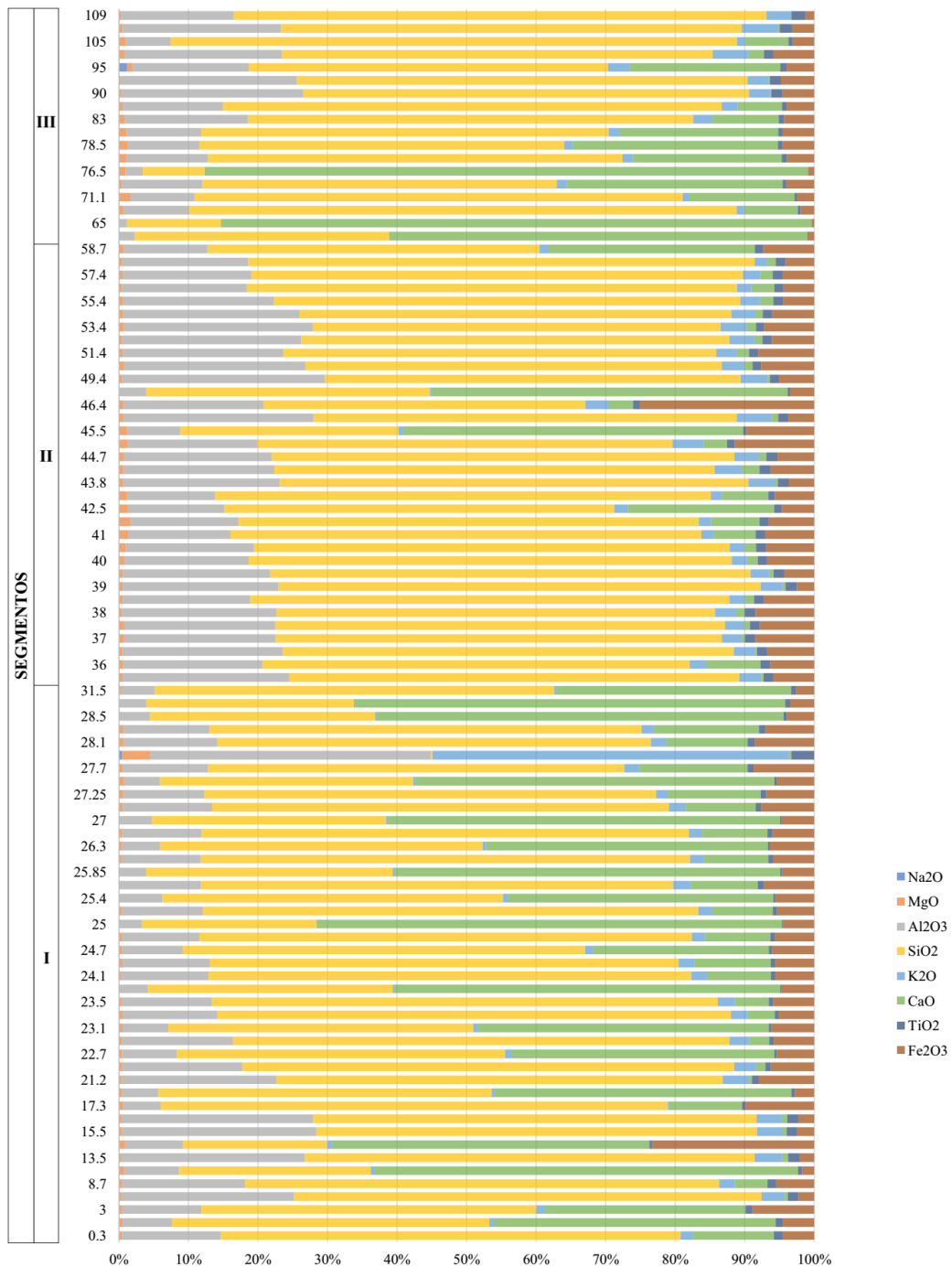
*Nota.* La tabla presenta las concentraciones promedio de cada elemento mayor, al igual que los valores mínimos y máximos de cada uno de ellos, divididos en los respectivos segmentos. Fuente:

Autor.

**Figura 15**

*Distribución de elementos mayores del afloramiento Tablazo – El Ramo*

TABLAZO - EL RAMO



Nota. En la figura, el eje Y representa la ubicación estratigráfica de cada muestra y el eje X muestra su distribución porcentual en dicha muestra. Al costado izquierdo se diferencian los tres intervalos propuestos. Fuente: Autor.

### **7.3.2 Elementos menores y traza**

A través del análisis EDXRF, también se evaluó la distribución (% abundancia) de elementos menores en las muestras de roca del afloramiento estudiado (Figura 16). La Tabla 6 presenta las concentraciones promedio en partes por millón (ppm) para cada elemento cuantificado. Los valores de cero en la tabla indican que estos elementos se encuentran en cantidades tan reducidas que el equipo no puede cuantificarlos. En este caso, el único elemento con esta condición es el wolframio (W).

Es importante mencionar que, a pesar de que estos elementos se encuentren en cantidades reducidas, el azufre registra un valor promedio elevado en los tres intervalos, llegando a concentraciones de hasta 23900 ppm (ver Tabla 6), siendo este valor reportado en el segmento II. Esto posiblemente se relacione con condiciones anóxicas, así como con la presencia de minerales como la piritita, que tienden a depositarse de manera significativa en dichos entornos. De manera similar, el fósforo (P) se presenta en proporciones considerables, posiblemente vinculado a la presencia de minerales fosfáticos como el apatito o a restos esqueléticos de peces, presentando su concentración promedio más alta en el segmento III. Elementos como el manganeso (Mn), cromo (Cr) y estroncio (Sr) muestran valores moderados a lo largo de la sección, aunque reflejan un aumento promedio en el segmento I. Además, el zirconio (Zr) presenta concentraciones promedio moderadas, siendo el segmento II donde se registra el promedio más alto (ver Figura 16).

#### **Tabla 6**

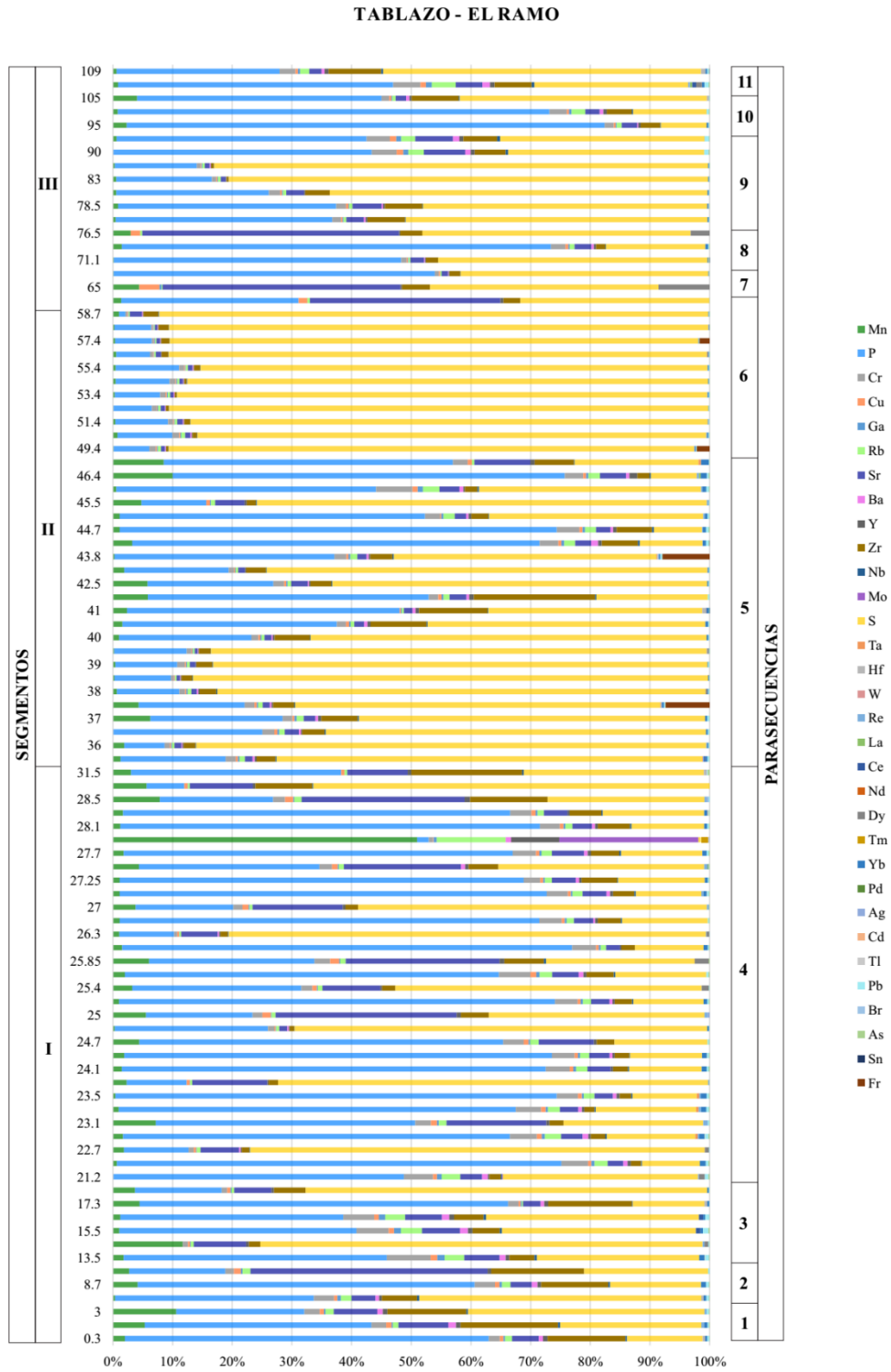
*Concentraciones de elementos menores (ppm) presentes en el Tablazo – El Ramo*

Tablazo - El Ramo									
Elemento (ppm)	Segmento I			Segmento II			Segmento III		
	Promedio	Min	Máx	Promedio	Min	Máx	Promedio	Min	Máx
<b>Mn</b>	194.29	0.00	2340.00	157.59	0.00	730.00	65.41	0.00	224.00
<b>P</b>	1873.65	0.00	4020.00	1876.47	293.00	4800.00	2760.11	0.00	7710.00
<b>Cr</b>	115.10	0.00	225.00	127.62	0.00	227.00	103.27	0.00	168.00
<b>Cu</b>	29.45	5.05	45.80	27.81	16.20	38.80	30.31	16.30	53.20
<b>Ga</b>	13.96	0.00	33.90	19.28	0.00	32.90	13.90	0.00	29.30
<b>Rb</b>	66.88	8.17	530.00	65.95	18.60	150.00	54.76	2.29	127.00
<b>Sr</b>	355.30	0.00	1350.00	157.90	74.70	546.00	312.33	80.20	1310.00
<b>Ba</b>	19.64	0.00	53.90	23.27	0.00	54.50	18.58	0.00	38.40
<b>Y</b>	29.49	11.10	369.00	26.06	8.49	99.80	20.74	4.37	39.40
<b>Zr</b>	238.17	0.00	814.00	310.15	61.80	1150.00	232.54	51.20	619.00
<b>Nb</b>	6.87	0.00	14.70	11.05	5.70	18.40	7.06	0.00	14.00
<b>Mo</b>	25.00	0.00	1070.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>S</b>	1780.65	19.80	9110.00	9280.06	351.00	23900.00	3473.83	600.00	13500.00
<b>Ta</b>	1.10	0.00	18.70	2.12	0.00	17.90	0.00	0.00	0.00
<b>Hf</b>	1.83	0.00	23.10	3.60	0.00	65.70	2.51	0.00	27.20
<b>W</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>Re</b>	5.61	0.00	31.10	5.06	0.00	28.90	0.50	0.00	9.06
<b>La</b>	0.00	0.00	0.00	0.65	0.00	22.00	0.65	0.00	11.70
<b>Ce</b>	0.97	0.00	22.20	1.10	0.00	19.00	1.07	0.00	19.30
<b>Nd</b>	0.00	0.00	0.00	0.26	0.00	8.67	0.00	0.00	0.00
<b>Dy</b>	7.43	0.00	64.80	3.32	0.00	41.20	14.57	0.00	134.00
<b>Tm</b>	1.35	0.00	58.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>Yb</b>	14.17	0.00	44.40	24.72	0.00	71.90	12.07	0.00	31.00
<b>Pd</b>	0.09	0.00	3.75	0.08	0.00	2.67	0.19	0.00	3.40
<b>Ag</b>	0.37	0.00	8.62	0.08	0.00	2.71	0.28	0.00	5.01
<b>Cd</b>	0.20	0.00	2.54	0.04	0.00	1.27	0.37	0.00	2.66
<b>Tl</b>	0.12	0.00	5.29	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>Pb</b>	11.58	0.00	27.10	18.68	3.76	30.00	11.62	0.00	22.70
<b>Br</b>	0.08	0.00	3.32	0.00	0.00	0.00	0.07	0.00	1.22
<b>As</b>	4.12	0.00	13.90	4.72	0.00	10.30	3.46	0.00	6.80
<b>Sn</b>	0.00	0.00	0.00	0.13	0.00	2.66	0.19	0.00	2.12
<b>Fr</b>	0.00	0.00	0.00	55.53	0.00	584.00	0.00	0.00	0.00

*Nota.* La tabla muestra las concentraciones promedio en unidades de ppm de cada elemento menor detectado en las muestras de cada segmento. También se evalúan los valores mínimos y máximos del conjunto de datos de dichos elementos. Fuente: Autor.

**Figura 16**

*Distribución de elementos menores en la Formación Tablazo (El Ramo)*



*Nota.* Se ilustra la distribución de las proporciones de los elementos menores registrados en cada segmento. El eje Y indica la altura estratigráfica en metros y el eje X el porcentaje. Fuente: Autor.

#### 7.4 Gamma Ray Espectral

En la Figura 17 se presenta el registro espectroscópico de la radiación gamma junto con la respuesta de los tres isótopos mencionados. El segmento II exhibe las mayores concentraciones promedio para todos los isótopos, a diferencia del segmento III, que muestra las concentraciones más bajas. Igualmente se encuentran las concentraciones promedio de cada elemento para cada litología vista en la sección (ver Tabla 7).

**Tabla 7**

*Concentraciones promedio de los isótopos (K, U, Th) y del GR para cada segmento y litología*

<b>Tablazo - El Ramo GRS</b>									
<b>Elemento</b>	<b>Segmento I</b>			<b>Segmento II</b>			<b>Segmento III</b>		
	Promedio	Min	Máx	Promedio	Min	Máx	Promedio	Min	Máx
U (ppm)	4.69	2.00	15.30	5.73	3.20	9.90	4.53	1.80	11.20
Th (ppm)	17.98	8.80	32.30	26.48	9.80	38.70	14.40	0.00	41.70
K (%)	1.17	0.10	2.30	1.73	0.50	2.80	0.97	0.10	3.50
GR (API)	128.13	64.40	272.00	179.35	82.40	244.40	109.38	18.40	270.80

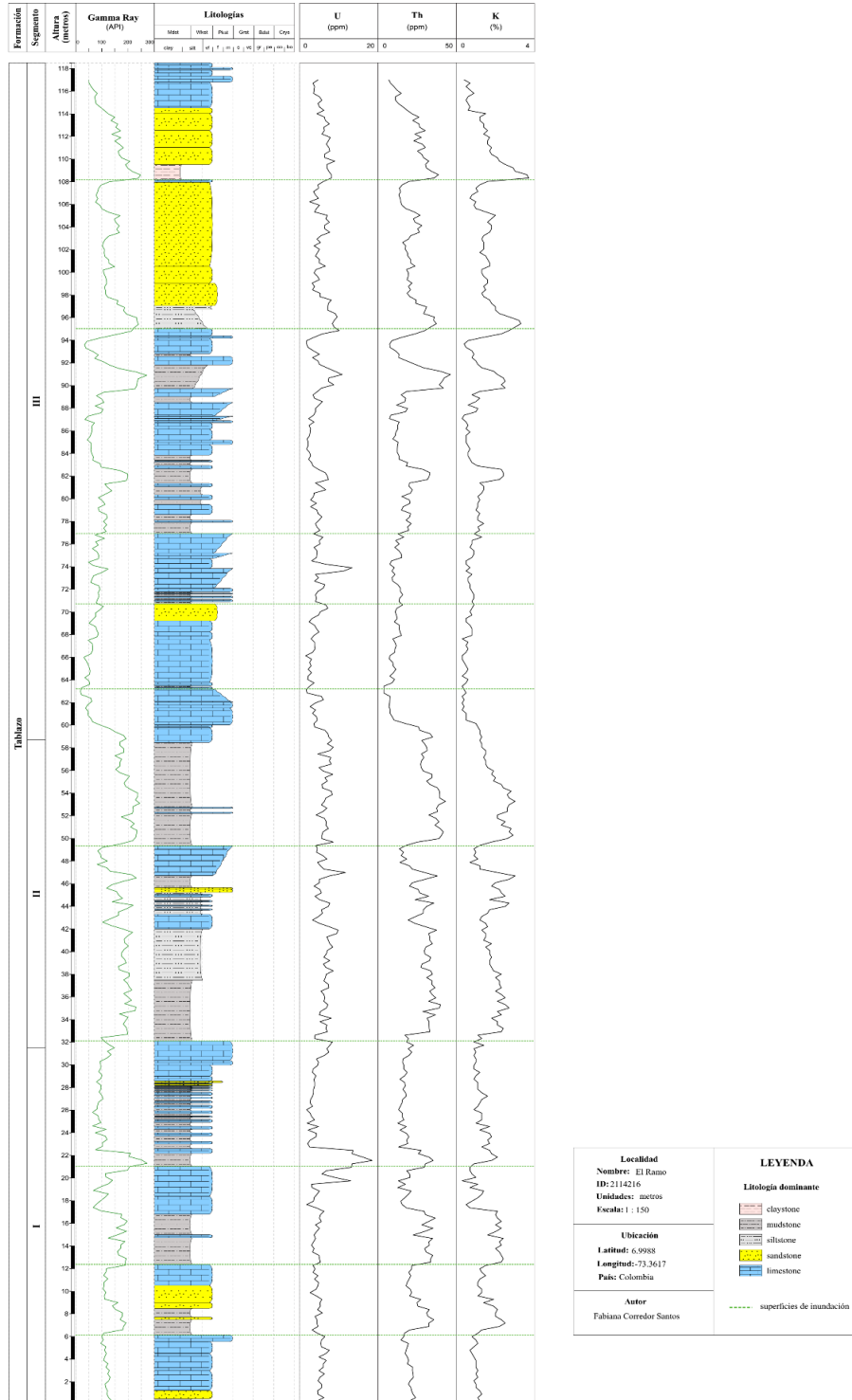
<b>Tablazo - El Ramo GRS</b>					
<b>Elemento</b>	<b>Arcillolitas</b>	<b>Calizas</b>	<b>Areniscas</b>	<b>Lodolitas</b>	<b>Limolitas</b>
U (ppm)	6.54	4.35	4.83	8.555	9.815
Th (ppm)	29.7	12.71	17.15	39.82	43.19
K (%)	2.94	0.76	1.18	2.74	2.65
GR (API)	218.16	97.86	126.19	271.42	293.59

*Nota.* Se presentan los valores promedio de los isótopos correspondientes junto al registro GR de cada intervalo y los valores mínimo y máximo de cada uno. Asimismo, de cada litología. Fuente:

Autor.

**Figura 17**

*Perfiles espectrales de radiación gamma (GR) de U, Th, K y total*



*Nota.* En el gráfico, el registro de radiación gamma se muestra a la izquierda, mientras que a la derecha se exhiben las respuestas de U, Th en ppm y K en %w junto con las líneas verdes que indican las superficies de inundación. Fuente: Autor.

## **8. Análisis de resultados**

### **8.1 Evaluación y clasificación mineralógica por DRX**

Según Carreño & Gómez (2021) para clasificar la mineralogía de las muestras por medio de DRX utilizan las abundancias relativas de cuarzo, minerales arcillosos y carbonatos. Esto implica que una roca con una proporción de cuarzo superior al 80% se considera de Dominio Cuarzoso; más del 80% de minerales arcillosos como Dominio Arcilloso, y si supera el 80% de carbonatos, se categoriza como Dominio Calcáreo (Figura 18). Aquellas rocas que contienen entre el 50% y el 80% de cualquiera de estos minerales se denominan Mineralogía Cuarzosa, Mineralogía Arcillosa o Mineralogía Calcárea, respectivamente (Figura 18). Finalmente, se utiliza el término Mineralogía Mixta para describir aquellas muestras que presentan menos del 50% de cuarzo, carbonatos y minerales arcillosos (Figura 18).

Según esta clasificación, las muestras de la Formación Tablazo en la sección El Ramo se agrupan en diversas categorías distintivas a lo largo de los tres intervalos litoestratigráficos (ver Figura 18): El 35% de las muestras del segmento I presentan mineralogía cuarzosa, mientras que el 19% exhibe una mineralogía calcárea rica en cuarzo. Un 12% muestra mineralogía cuarzosa con abundante presencia de minerales arcillosos, y otro 12% revela mineralogía mixta. Además, el 9% corresponde a una mineralogía cuarzosa rica en carbonatos, el 7% revela mineralogía arcillosa rica

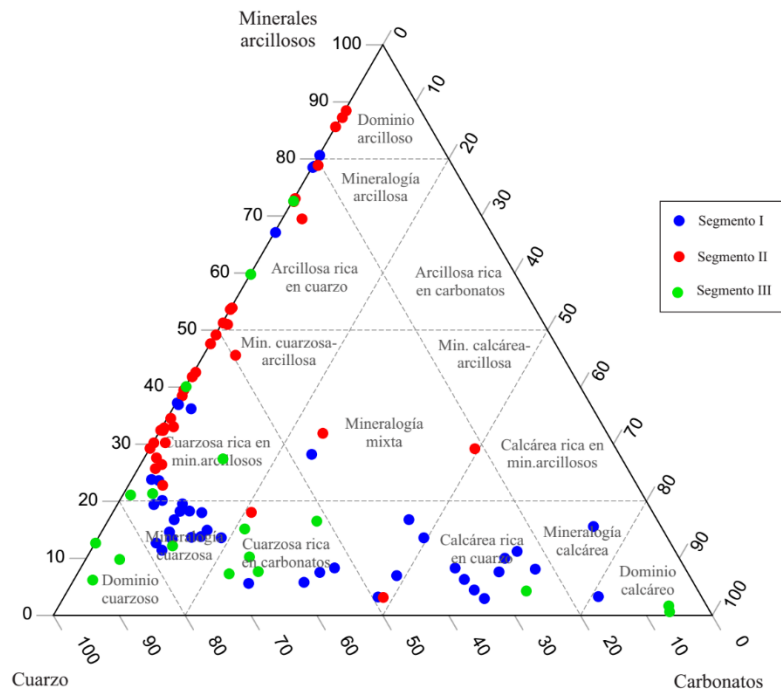
en cuarzo y el 6% restante se distribuye entre muestras con mineralogía calcárea, y de dominio calcáreo y arcilloso, cada una representando un 2% del total.

En el segmento II, se observa un 53% de mineralogía cuarzosa con una presencia significativa de minerales arcillosos, seguido de un 23% de mineralogía arcillosa enriquecida en cuarzo. Un 18% se distribuye entre composiciones minerales mixtas y de predominio arcilloso, cada una representando el 9%. El 6% restante se divide, con un 3% correspondiente a mineralogía cuarzosa-arcillosa y otro 3% a mineralogía cuarzosa con un contenido notable de carbonatos.

Finalmente, en el segmento III, se observa un 28% de mineralogía cuarzosa con una presencia significativa de carbonatos, seguido de un 22% de mineralogía cuarzosa rica en minerales arcillosos. Un 17% pertenece al dominio cuarzoso, mientras que un 11% se asigna tanto al dominio calcáreo como a la mineralogía arcillosa enriquecida en cuarzo. El 11% restante se distribuye entre la mineralogía cuarzosa y la mineralogía calcárea con una rica presencia de cuarzo, cada una representando el 5.5%.

### **Figura 18**

*Clasificación mineralógica roca total afloramiento Tablazo - El Ramo*



*Nota.* El diagrama ternario ilustra la composición mineralógica *bulk* de las rocas con contenido calcáreo. En la base del triángulo se refleja la proporción de cuarzo, el lado derecho indica la cantidad de carbonatos y, por último, el lado opuesto muestra la proporción de minerales arcillosos. Las muestras se distinguen mediante tres colores diferentes, cada uno representando el segmento al que pertenecen. Fuente: Autor.

## 8.2 Variación y correlación

Al representar gráficamente las concentraciones de los elementos mayores en función de la posición estratigráfica (ver Figura 19), se evidencia lo siguiente.

En el segmento I (0 – 31.5 m), las concentraciones de CaO y SiO<sub>2</sub> representan un patrón cíclico pronunciado; los valores de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> son generalmente bajos, salvo en la muestra a 27.8 metros (40%w), la cual es la concentración más alta en toda la sección. Respecto al Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, se encuentra en concentraciones más bajas, pero en el metro 14.9 muestra una de las dos concentraciones más altas de la secuencia (>20%w).

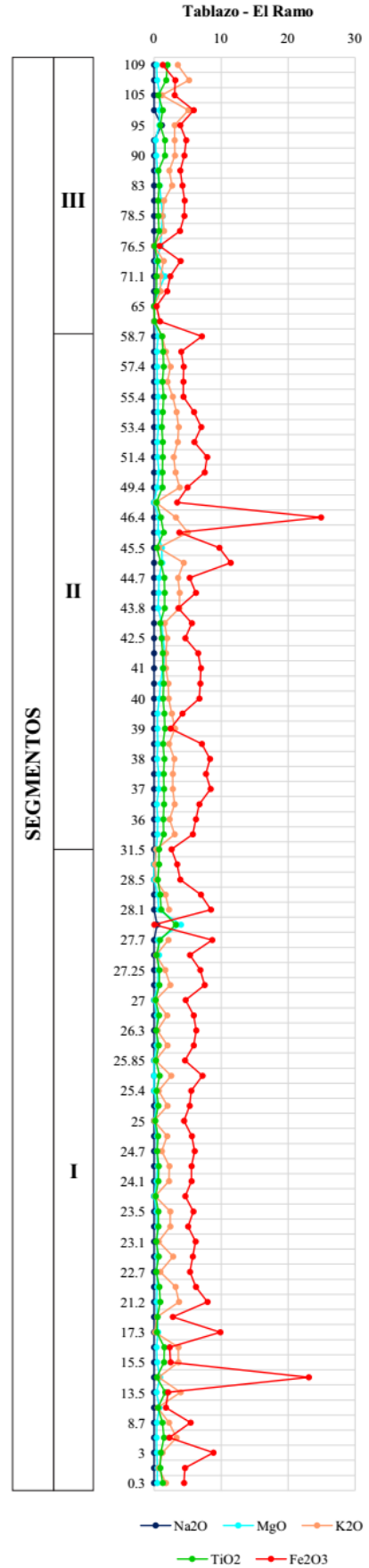
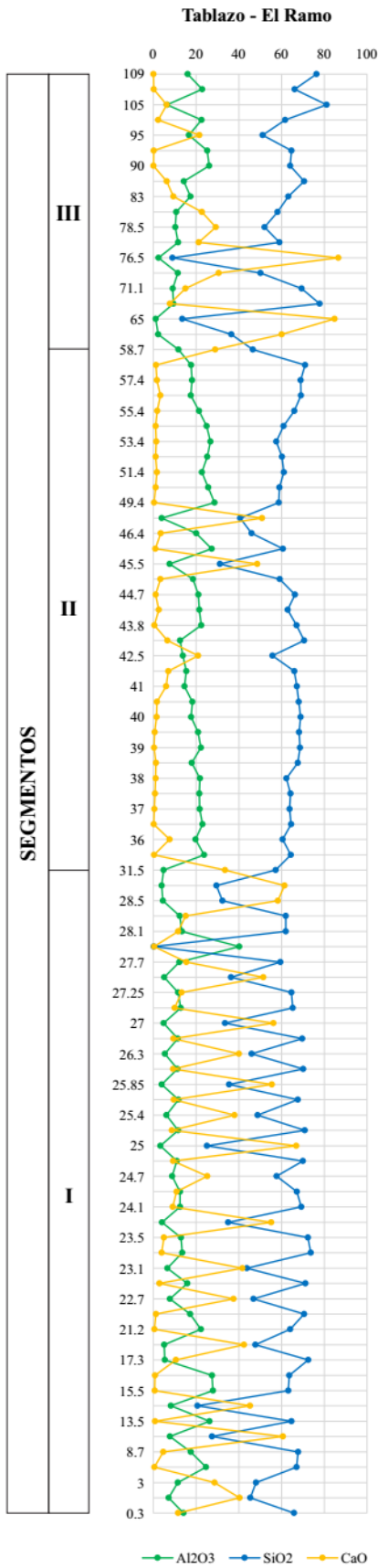
En el segmento II, las proporciones de  $\text{SiO}_2$  permanecen relativamente constantes, manteniéndose por encima del 60% en peso en general. Sin embargo, en el intervalo de 45.1 a 49.4 m se aprecia un patrón cíclico junto con el CaO, similar al observado en el segmento I. Además, en el metro 46.4 se registra una de las concentraciones más elevadas de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . La Figura 19a muestra que este segmento presenta las concentraciones más altas de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  en toda la sección.

Con respecto al segmento III, suele mostrar concentraciones moderadas de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y exhibe una ciclicidad similar a la de los intervalos anteriores, abarcando el rango de 58.7 a 78.1 metros para los elementos  $\text{SiO}_2$  y CaO.

En términos generales, se nota que la relación entre  $\text{SiO}_2$  y CaO es inversamente proporcional, lo que significa que cuando el valor de  $\text{SiO}_2$  aumenta, disminuye el de CaO. Por otro lado, elementos como  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  y  $\text{K}_2\text{O}$  reflejan patrones de comportamiento similares, aunque en proporciones diferentes. Elementos como MgO,  $\text{TiO}_2$  y  $\text{Na}_2\text{O}$  a lo largo de toda la formación, se encuentran en cantidades muy reducidas e incluso en algunos casos son nulos.

### **Figura 19**

*Variación de elementos mayores de la Formación Tablazo – El Ramo*



*Nota.* Las gráficas ilustran las variaciones de los elementos mayores en relación con su ubicación estratigráfica. A la izquierda se encuentra la gráfica que representa los elementos con concentraciones más elevadas, mientras que a la derecha están los elementos con concentraciones más bajas. Fuente: Autor.

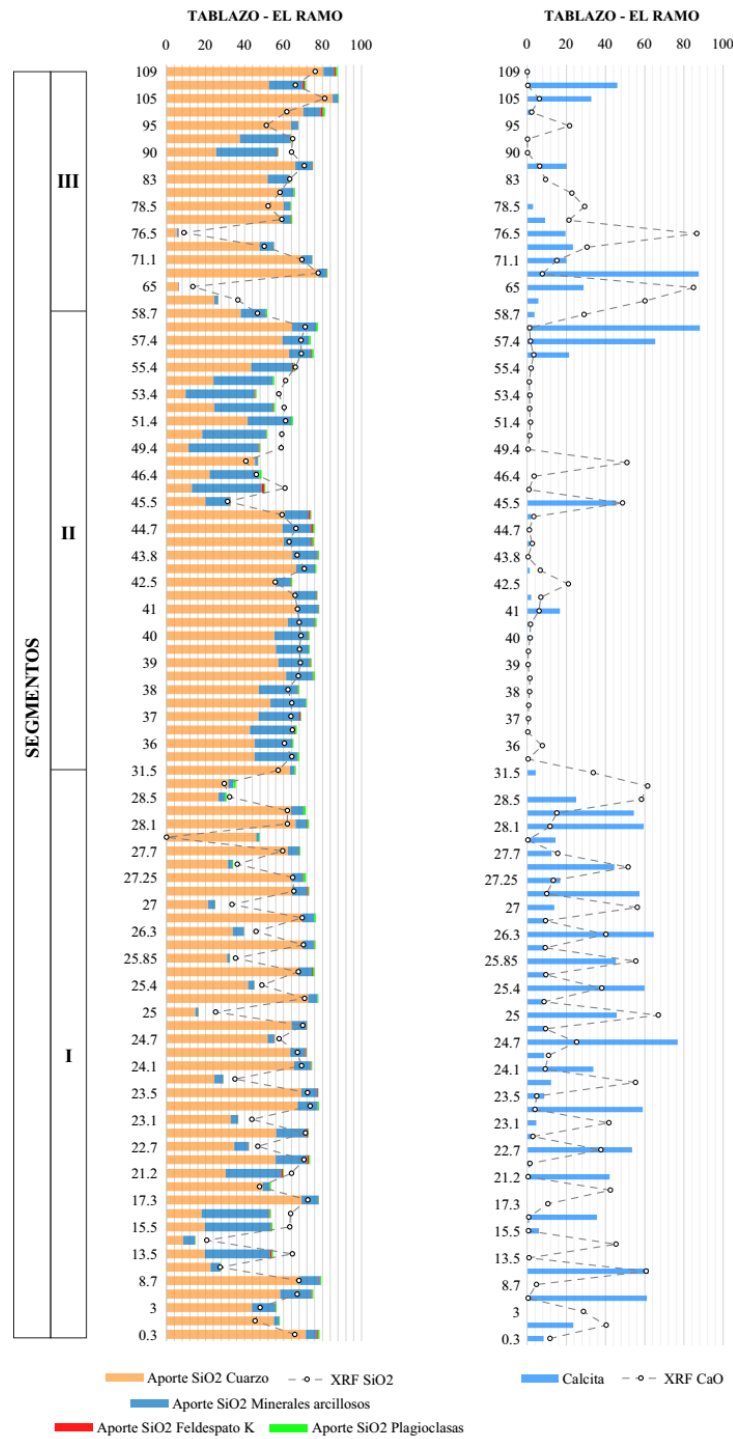
En la Figura 20, considerando fórmulas químicas estándar, se presenta el aporte de cada componente químico elemental, expresado en forma de óxidos, en los minerales dominantes de la roca total. En este contexto, el contenido de silicio (Si), en su forma de óxido, constituye un componente esencial de minerales como el cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ) y otros minerales, como los minerales arcillosos o filosilicatos ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 0.05\text{TiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) y feldespatos ( $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$ ).

El contenido de  $\text{SiO}_2$  promedia alrededor del 54% en el segmento I, con aproximadamente el 48% vinculado a estructuras cristalinas como el cuarzo, y cerca del 9% corresponde a estructuras cristalinas presentes en minerales arcillosos o filosilicatos y feldespatos, siendo los minerales arcillosos los principales contribuyentes. Los minerales arcillosos a nivel de la fracción menor de 2 micras incluyen caolinita, micas, clorita e interestratificados de tipo illita/esmectita o illitas alteradas. Además, se observa la relación entre las concentraciones de CaO, con un promedio del 24%, y la presencia de calcita, considerada como la principal fuente de calcio en la roca, con un promedio del 26%. En el segmento II, el contenido promedio de  $\text{SiO}_2$  es del 62%, con una contribución del 46% por parte del cuarzo y del 19% por minerales arcillosos y feldespatos. El contenido promedio de CaO en este segmento es del 24%, y la calcita aporta un 26%. Finalmente, en el segmento III, se registran valores promedio de  $\text{SiO}_2$  alrededor del 57%, con el cuarzo contribuyendo en un 52%, y los minerales arcillosos y feldespatos en un 9%. Las concentraciones promedio de CaO son del 22%, con un aporte de la calcita del 21%.

En resumen, a partir de las características de la mineralogía obtenida mediante DRX y de la composición química elemental, podemos inferir que el contenido de  $\text{SiO}_2$  está principalmente asociado al cuarzo y el  $\text{CaO}$  se asocia principalmente con la calcita, y en menor medida con la dolomita y el yeso.

**Figura 20**

*Correlación de las tendencias en las concentraciones relativas del aporte  $\text{SiO}_2$  y  $\text{CaO}$  por XRF vs DRX en el afloramiento Tablazo – El Ramo*



*Nota.* Los gráficos representan la contribución de SiO<sub>2</sub> y CaO proporcionada por los minerales principales de la roca total. En el eje X se refleja la proporción de cada uno, mientras que en el eje Y se indica la altura estratigráfica en metros. Fuente: Autor.

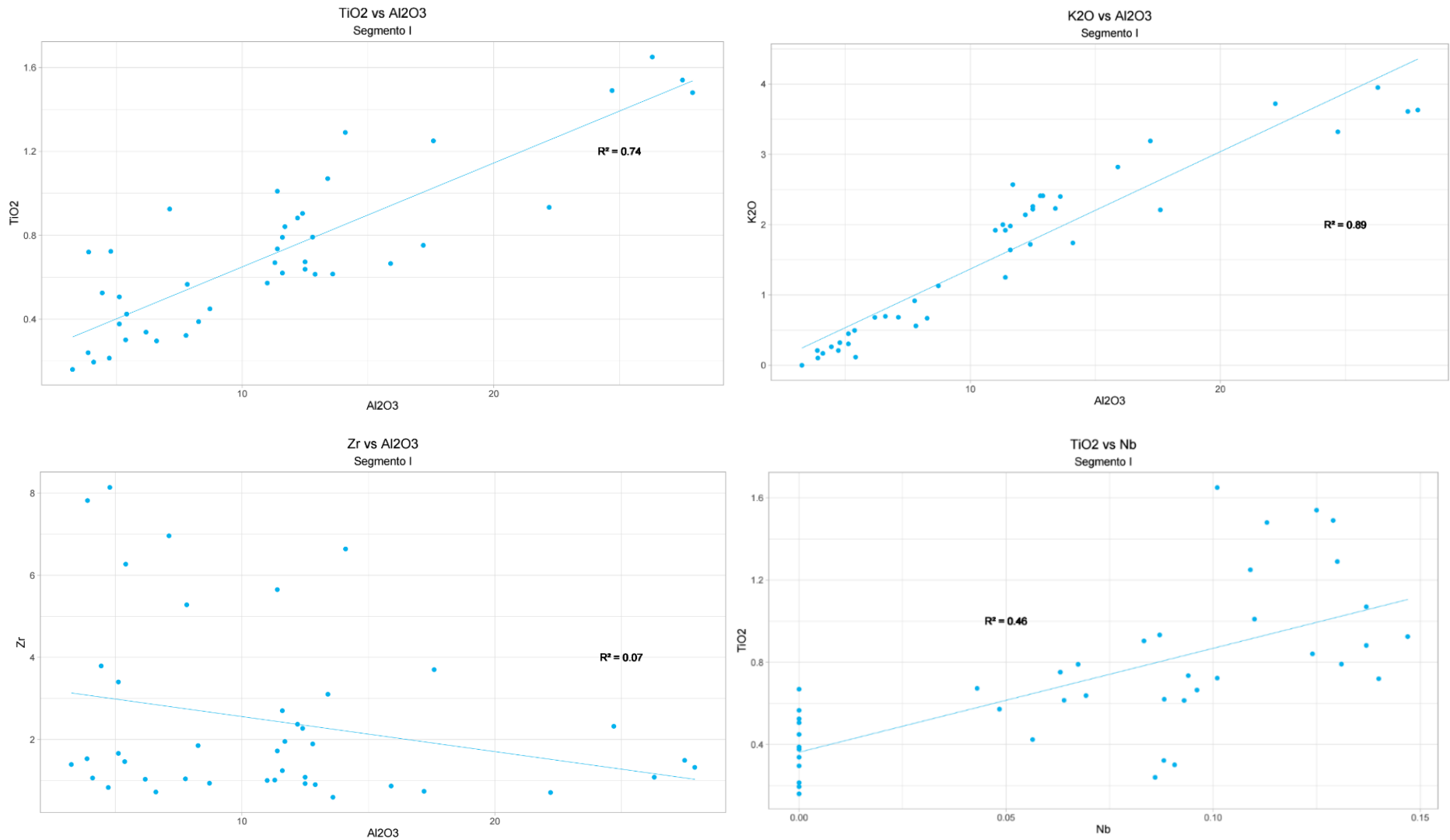
La correlación entre variables geoquímicas es un método para determinar las diferentes asociaciones que tienen algunos elementos con los procesos que ocurrieron durante la depositación (Duarte, 2017). A continuación se describen las diferentes correlaciones para cada segmento determinado.

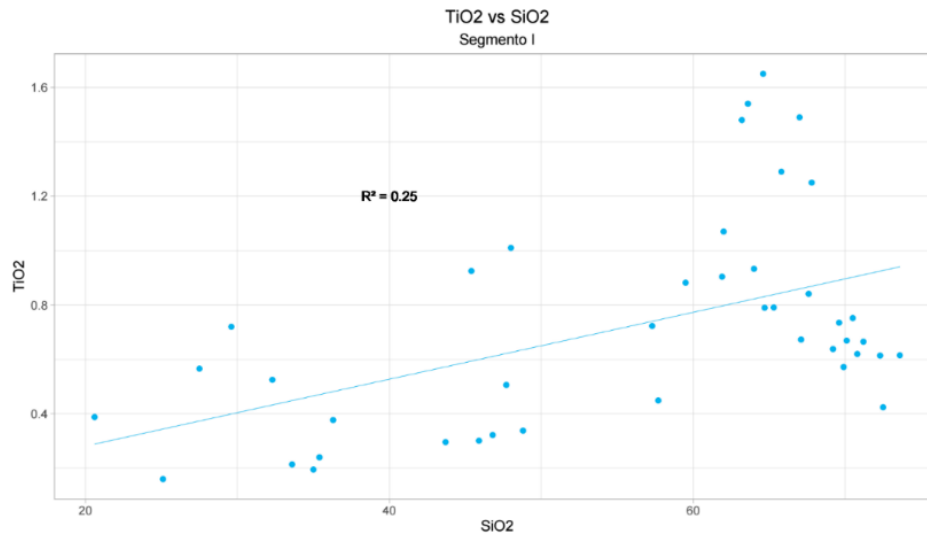
Segmento I (Figura 21): En este segmento, la correlación entre  $\text{TiO}_2$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$  es positiva y alta ( $r = 0.74$ ), con un valor  $p$  ( $p$ -value) de  $3.94 \times 10^{-13}$ , indicando significancia estadística. De manera similar, en la relación  $\text{K}_2\text{O}$  vs  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , el  $p$ -value es de  $1.3 \times 10^{-20}$  y el coeficiente de correlación es positivo y elevado ( $r = 0.89$ ). Por otro lado, la correlación entre  $\text{Zr}$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$  es muy baja ( $r = 0.07$ ) y su valor  $p$  es de  $0.087$ , lo que sugiere una falta de certeza sobre la presencia de un aporte significativo. En cuanto a las relaciones  $\text{TiO}_2$  vs  $\text{SiO}_2$  y  $\text{TiO}_2$  vs  $\text{Nb}$ , presentan coeficientes de correlación bajos y positivos ( $0.25$  y  $0.46$  respectivamente), con  $p$ -values favorables para considerar los valores como significativos ( $0.00068$  y  $8.74 \times 10^{-7}$ , respectivamente). En resumen, estos datos señalan la presencia de aporte detrítico en los sedimentos y también sugieren una asociación entre el contenido de titanio y la presencia de minerales arcillosos, como illita o caolinita, además de una relación mínima con minerales pesados.

Segmento II (Figura 22): Este segmento presenta un coeficiente de correlación bajo ( $r = 0.45$ ) en la relación  $\text{TiO}_2$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , con un valor  $p$  de  $1.25 \times 10^{-5}$ . En la relación  $\text{K}_2\text{O}$  vs  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , se observa una correlación positiva y elevada ( $r = 0.74$ ), respaldada por valores significativos (valor  $p = 2.57 \times 10^{-11}$ ), indicando un aporte detrítico a la sección. A pesar de que la correlación entre  $\text{TiO}_2$  y  $\text{SiO}_2$  no es tan baja ( $r = 0.6$ ), presenta una significación considerable ( $p = 7.42 \times 10^{-8}$ ), sugiriendo una asociación entre el titanio y el cuarzo en este segmento. Por otro lado, las restantes relaciones ( $\text{Zr}$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , y  $\text{TiO}_2$  y  $\text{Nb}$ ) muestran coeficientes de correlación muy bajos, con  $p$ -values de  $0.01$ ,  $0.03$ , respectivamente, indicando una significación favorable, por lo que no existe relación alguna.

**Figura 21**

*Correlaciones químicas para el segmento I de la Fm. Tablazo - El Ramo*



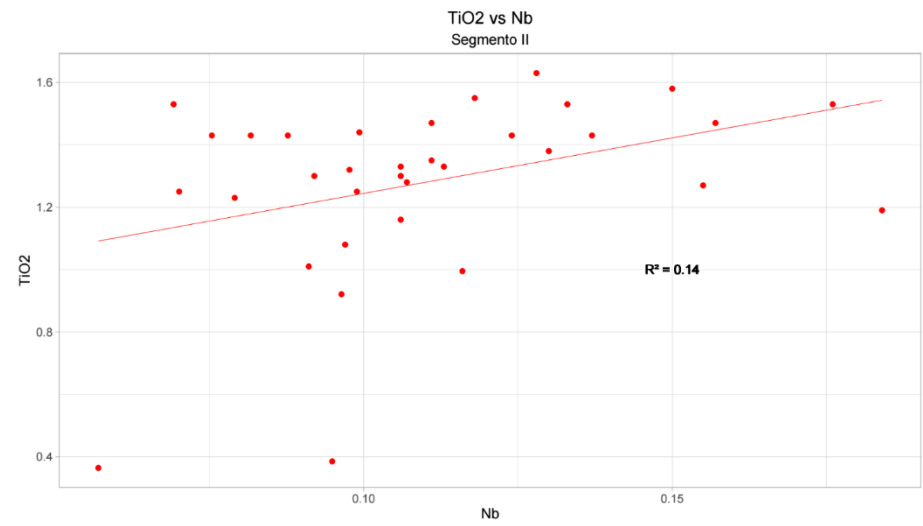
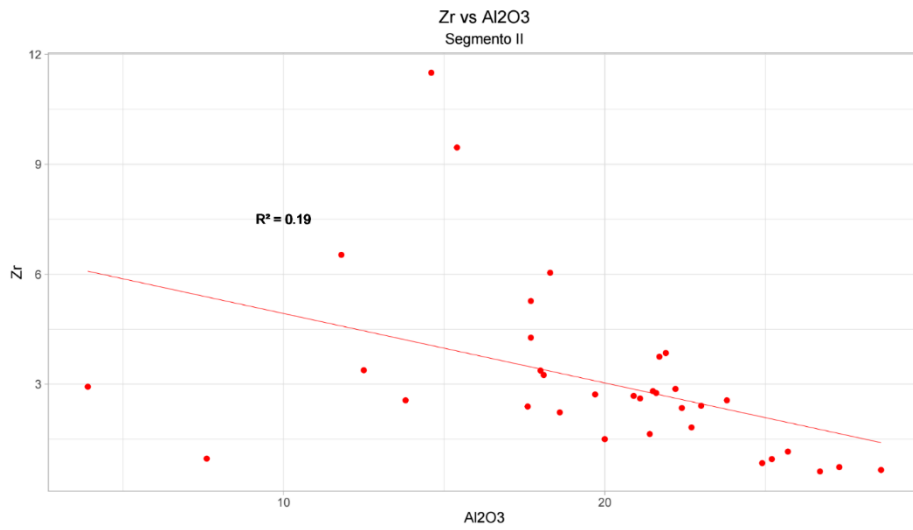
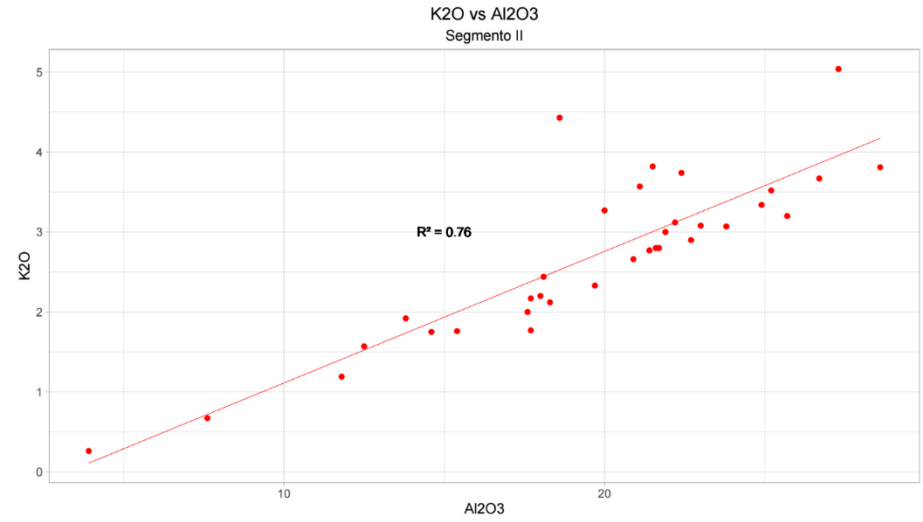
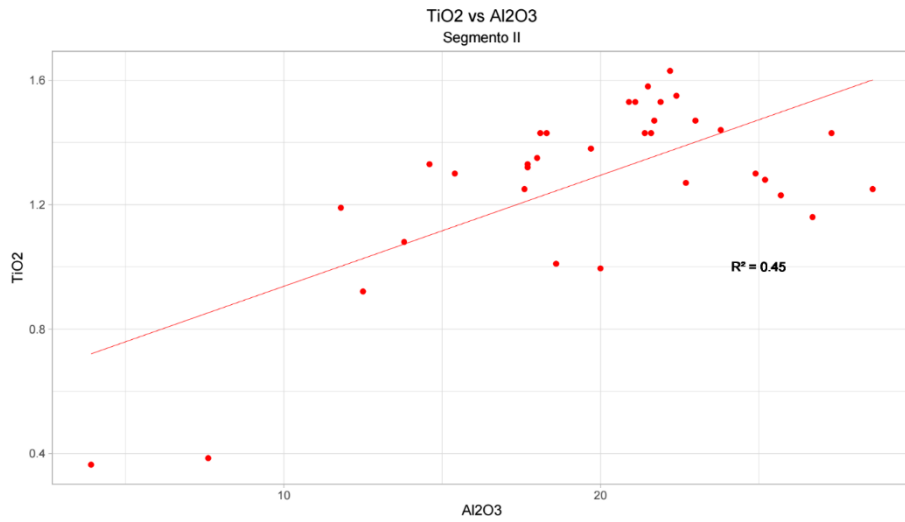


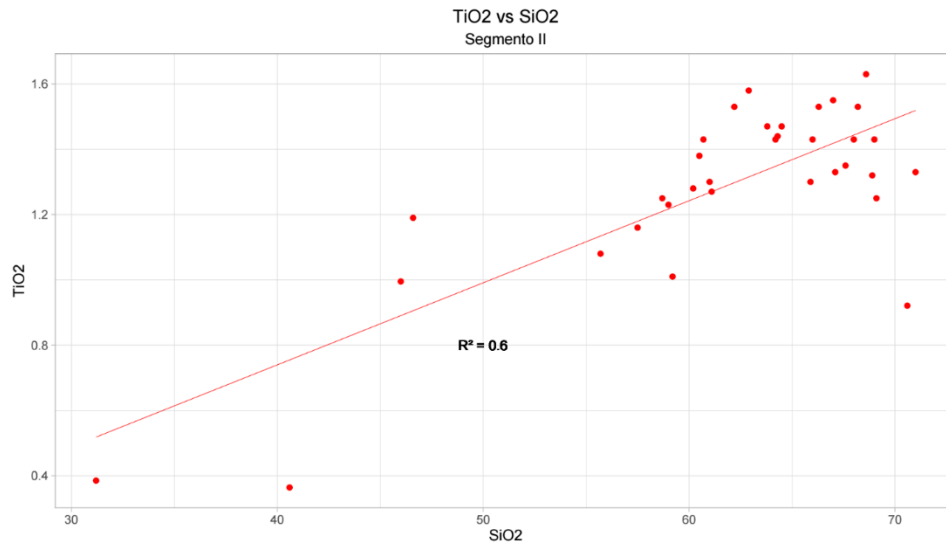
*Nota.* En todas las gráficas, el coeficiente de correlación de Pearson está representado por  $r^2$ . Es importante destacar que los valores  $p$  deben ser menores que el nivel de significación definido, generalmente 0.05 o, en algunos casos, 0.01. Todos los cálculos se llevaron a cabo en el entorno de R versión 4.3.0 (R Core Team, 2023). Fuente: Autor.

Segmento III (Figura 23) : En este segmento, la relación del  $TiO_2$  con el  $Al_2O_3$  es positiva y fuerte, con un coeficiente de 0.78 y un valor  $p$  de  $1.39 \times 10^{-6}$ , esto indica que el titanio se asocia a minerales arcillosos como la illita y caolinita. Esto también se atribuye a la alta relación entre  $K_2O$  y  $Al_2O_3$ , con un valor  $p$  de  $7.11 \times 10^{-7}$ . Asimismo, la relación entre  $TiO_2$  y Nb es positiva y elevada ( $r = 0.77$  y  $p = 1.84 \times 10^{-6}$ ), sugiriendo una posible asociación del titanio con algunos minerales pesados. Las demás regresiones ( $Zr$  vs  $Al_2O_3$  y  $TiO_2$  vs  $SiO_2$ ) presentan muy bajas relaciones, en el caso del zirconio es nula con un valor  $p$  de 0.973, por lo que los datos no se consideran significantes para determinar una relación entre estas variables.

## Figura 22

*Correlaciones químicas para el segmento II de la Fm. Tablazo - El Ramo*

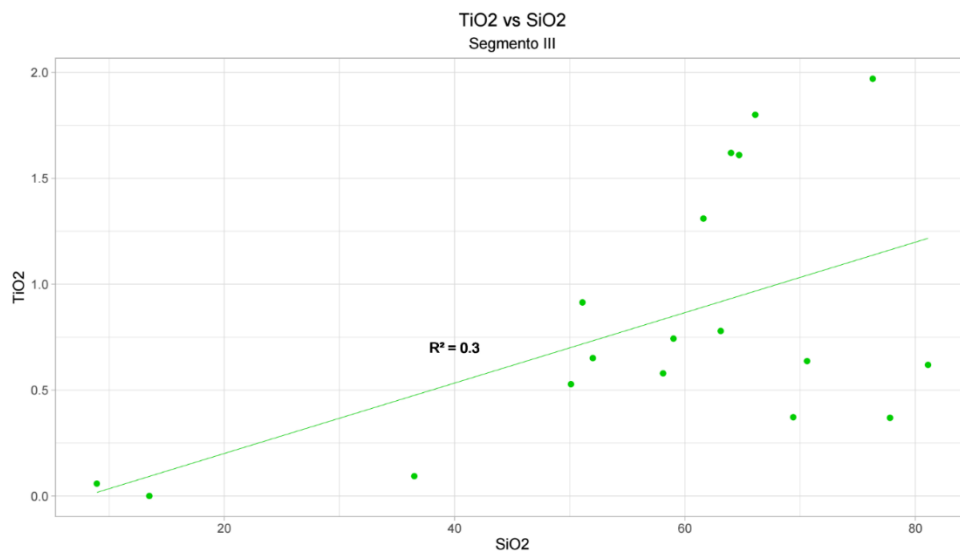


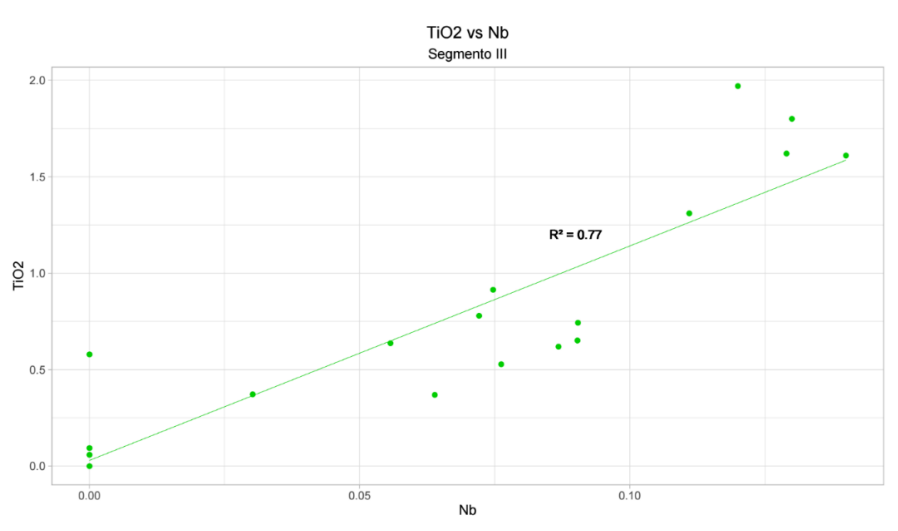
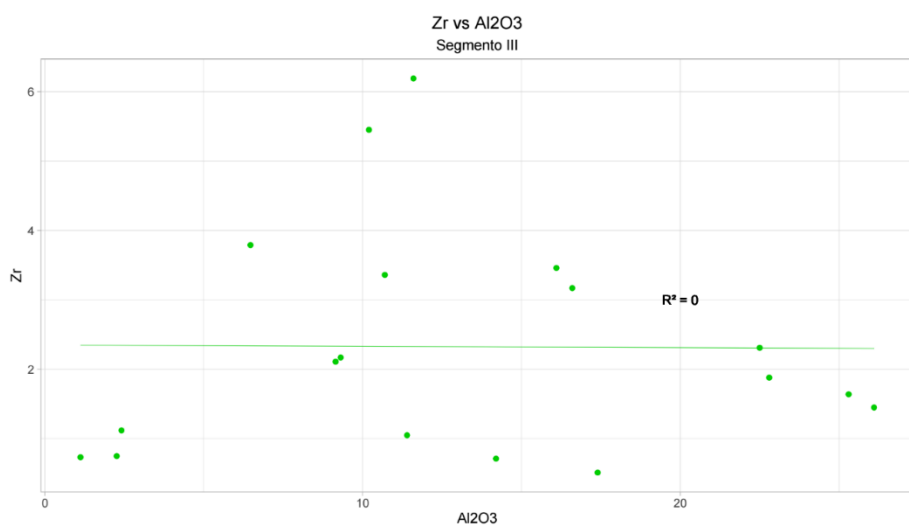
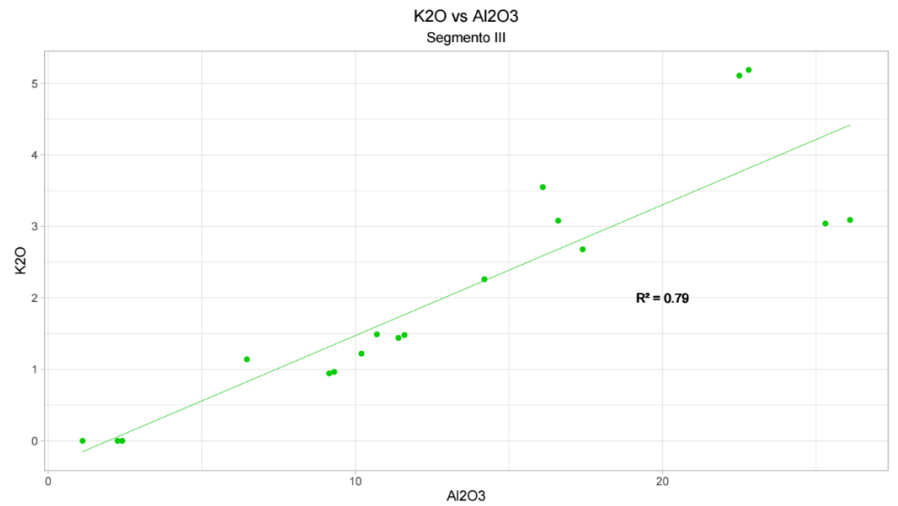
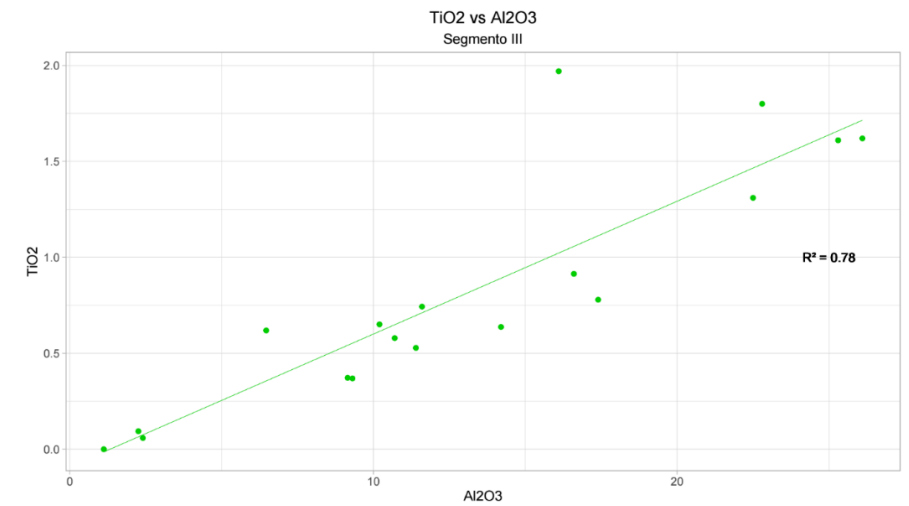


*Nota.* En todas las gráficas, el coeficiente de correlación está representado por  $r^2$ . Todos los cálculos se llevaron a cabo en el entorno de R versión 4.3.0 (R Core Team, 2023). Fuente: Autor.

### Figura 23

*Correlaciones químicas para el segmento III de la Fm. Tablazo - El Ramo*





*Nota.* Para todas las gráficas, el coeficiente de correlación está representado por  $r^2$ . El valor p de la relación  $TiO_2$  vs  $SiO_2$  es de 0.019.

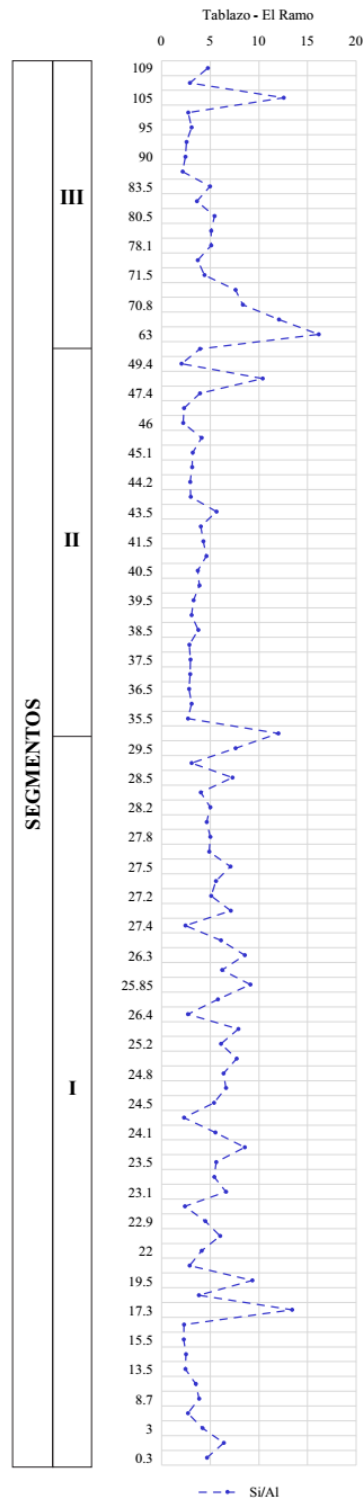
Todos los cálculos se llevaron a cabo en el entorno de R versión 4.3.0 (R Core Team, 2023). Fuente: Autor

Observando la relación Si/Al, se aprecia que la mayoría de las muestras analizadas exhiben un enriquecimiento en SiO<sub>2</sub>, ya que la relación Si/Al a lo largo del afloramiento revela valores superiores a 3 (Figura 24). El segmento I es el que mayor variaciones de SiO<sub>2</sub> presenta y el segmento III es el que presenta el valor más abundante de sílice.

En la Figura 25, se puede apreciar la correlación entre SiO<sub>2</sub> y Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> en cada segmento de la sección. Para el segmento I, presenta una relación de 0.36 con un valor p de  $2.7 \times 10^{-5}$ ; para el intervalo II, el coeficiente es de  $r = 0.18$ , con un p-value de 0.013; y en el segmento III, la correlación es de 0.28 con un nivel de significación de 0.023. Se concluye que los valores en los dos últimos segmentos no alcanzan significancia estadística para evaluar esta relación. Esta correlación sugiere que el exceso de sílice no proviene exclusivamente de aportes detríticos, sino que posiblemente está vinculado a contribuciones de origen biogénico o incluso con procesos de reemplazamiento durante la diagénesis (Rantitsh, et al. 2003 citado en Gómez, 2022).

#### **Figura 24**

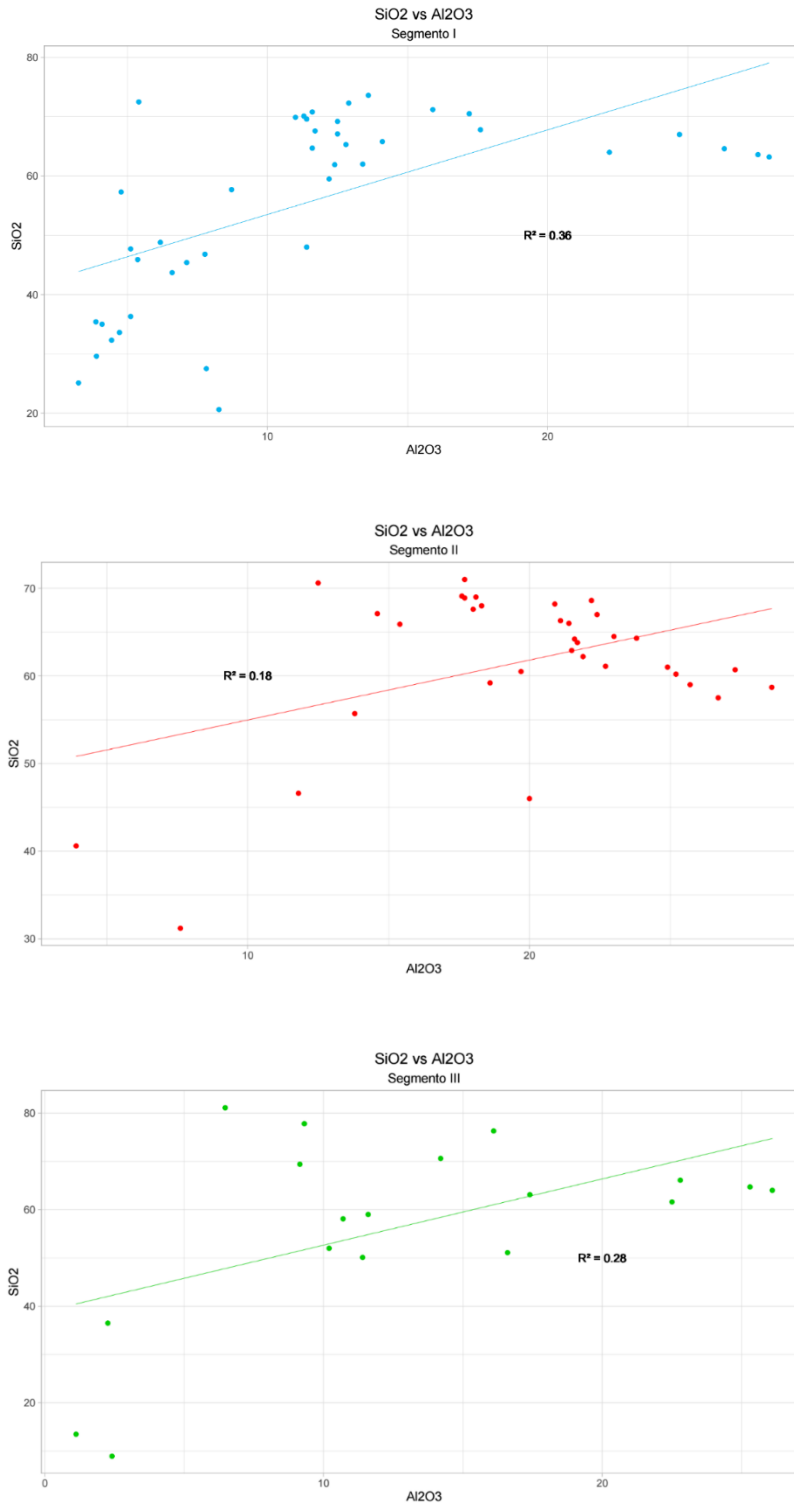
*Relación Si/Al del afloramiento Tablazo – El Ramo*



*Nota.* Se grafica la ubicación estratigráfica con sus segmentos en el eje y, y la relación Si/Al en el eje x. Fuente: Autor.

**Figura 25**

*Correlación  $\text{SiO}_2$  vs  $\text{Al}_2\text{O}_3$  del afloramiento Tablazo – El Ramo*



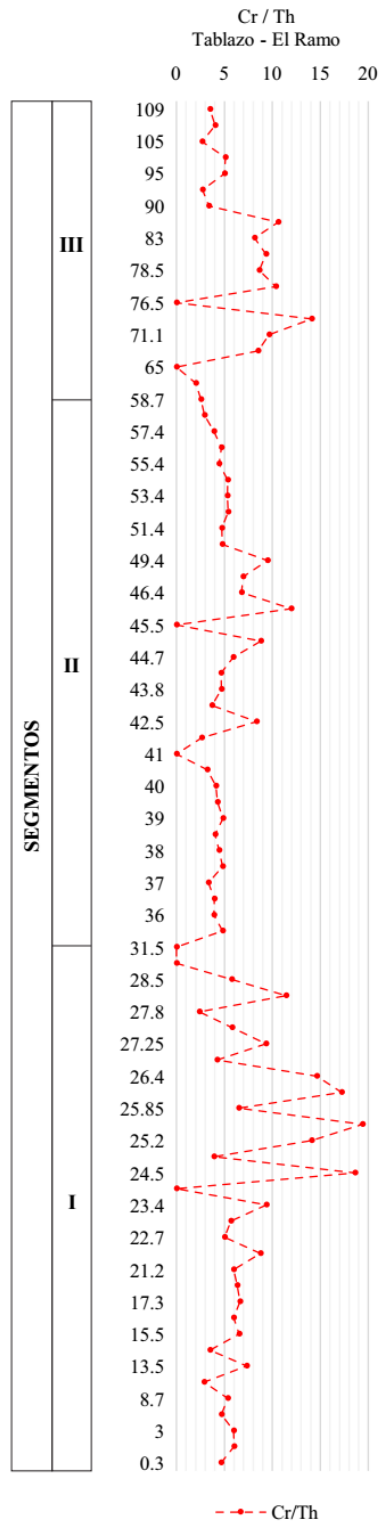
*Nota.* El grafico ilustra la relación entre el sílice y la alúmina en los tres segmentos del afloramiento en estudio. Se observan coeficientes de correlación bajos y valores p no significativos, a excepción del segmento I. Fuente: Autor.

### **8.3 Proveniencia sedimentaria**

Con el fin de determinar la procedencia sedimentaria de la roca, se examinaron las relaciones Cr/Th, las cuales permiten diferenciar entre rocas con aporte de fuentes máficas y/o félsicas. En términos generales, valores  $< 15$  son indicativos de un aporte félsico, mientras que valores entre 25 y 500 sugieren un aporte máfico; valores entre 15 y 25 señalan un aporte intermedio (Madhavaraju & Lee, 2009). En el segmento I, en el intervalo de [24.5 – 28.5], se observa un incremento en las concentraciones del parámetro Cr/Th. Sin embargo, el aporte de roca se originó mayormente en rocas félsicas, a excepción de alrededor del 7% de las muestras que superan el umbral para un aporte de roca félsica y se interpreta como un aporte de origen intermedio. En el segmento II, las concentraciones son relativamente constantes, salvo en el intervalo de 41 a 49.4 metros. Por último, el segmento III revela un aumento en las concentraciones en la base hasta el metro 83.5. Aunque las concentraciones aumentaron en estos dos últimos intervalos, ninguna muestra superó el valor umbral que indicaría un aporte de roca fuente máfica. En conclusión, las rocas que afloran en la Formación Tablazo en la sección El Ramo tienen una procedencia sedimentaria con aporte tanto de rocas de origen félsico como intermedio.

### **Figura 26**

*Relación Cr/Th para discriminar la proveniencia de las rocas de la Fm. Tablazo*



*Nota.* Relación cromo/torio para sugerir el aporte de roca fuente en la Fm. Tablazo – El Ramo.

Fuente: Autor.

#### 8.4 Condiciones paleoambientales

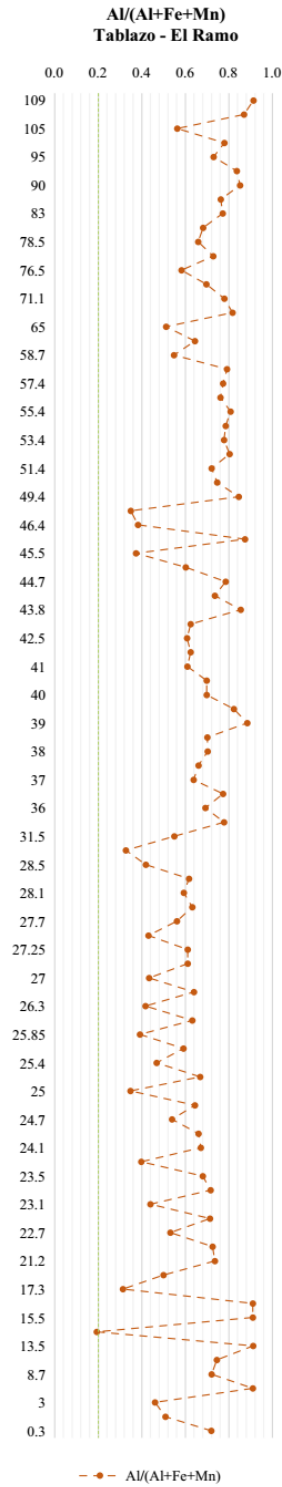
Como se ha mencionado previamente, el aluminio es un elemento que se encuentra ampliamente distribuido en las rocas sedimentarias, y se emplea como indicador del aporte detrítico. Para este propósito, se utiliza la relación  $Al/(Al+Fe+Mn)$ , donde si el valor es  $> 0.2$ , se atribuye el enriquecimiento de estos elementos a aportes detríticos; de lo contrario, tiende a indicar una influencia hidrotermal (Boström, 1973 citado en Carreño & Gómez, 2021). De esta manera, para la sección analizada se identifica que todos los sedimentos fueron depositados bajo aportes detríticos (ver Figura 27).

El estroncio (Sr) se ha empleado como un indicador de las condiciones ambientales en entornos de sedimentación marina y se ha interpretado que su concentración está inversamente relacionada con la energía del entorno marino (Vera, 1994). También, la relación Sr/Ca parece estar sujeta a la influencia de la temperatura y a los cambios del nivel del mar.

En la Figura 28, se presenta la distribución estratigráfica de la concentración de estroncio (Sr) a lo largo del afloramiento, junto con su relación con el calcio (Ca) y la distribución de CaO. En la Figura 28a, se aprecia la variación del estroncio como resultado de procesos diagenéticos en ambientes marinos someros. Los picos de mayor concentración sugieren condiciones de baja energía, lo cual concuerda con la información presentada en la columna estratigráfica. Asimismo, cuando aumentan los valores de Sr/Ca, se pueden inferir pequeños incrementos relativos en el nivel del mar. Estos estarían evidenciados en las alturas estratigráficas de 6.5, 13.5, 21.2, 36.5, 49.4, 90 y 109 metros del afloramiento, las cuales se asemejan a las superficies de inundación identificadas en campo.

#### Figura 27

*Relación  $Al/(Al+Fe+Mn)$  en el afloramiento Tablazo – El Ramo*

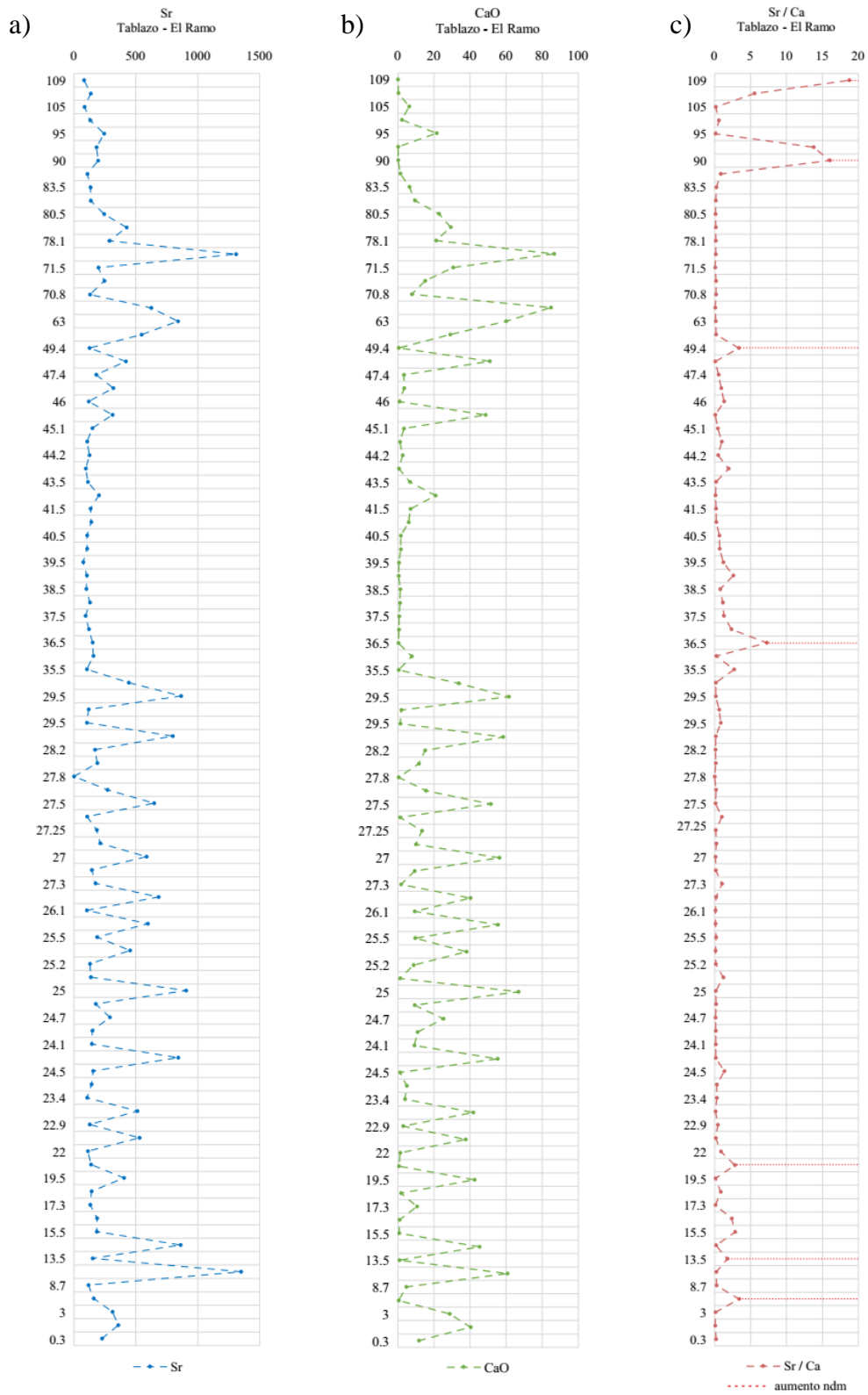


*Nota.* Se ilustra la relación  $Al/(Al+Fe+Mn) > 0.2$  para sugerir aporte detrítico en el afloramiento.

Fuente: Autor.

**Figura 28**

*Variaciones de Sr, CaO y relación Sr/Ca en la Fm. Tablazo*



*Nota.* De izquierda a derecha, se ilustran las concentraciones de Sr, CaO y la relación Sr/Ca con respecto a la altura estratigráfica en que fue tomada la muestra. En la figura 28c se presentan algunos picos que podrían significar aumentos relativos del ndm (nivel del mar). Fuente: Autor.

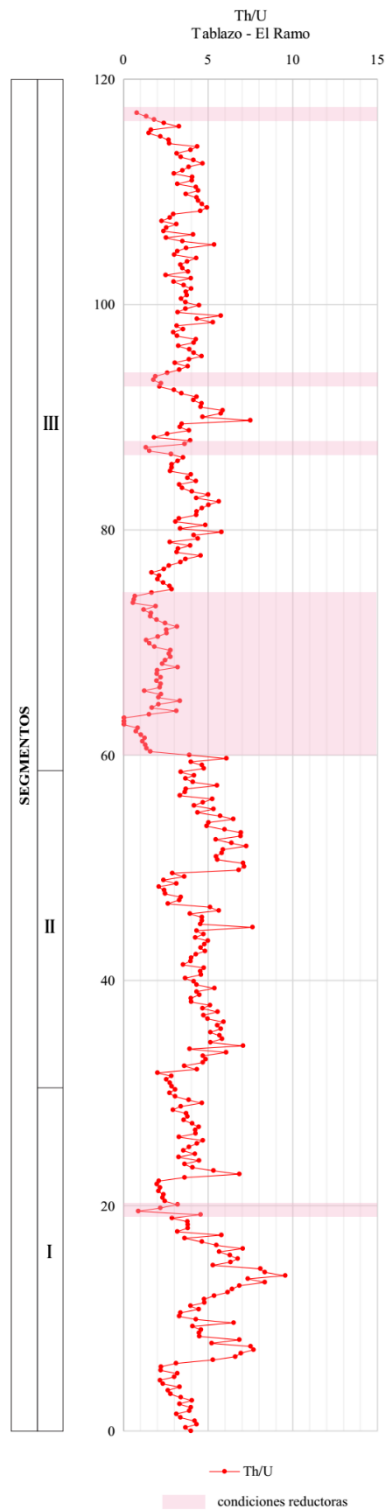
### **8.5 Análisis Gamma Ray Spectral**

De acuerdo con el análisis de Adam & Weaver (1958) mencionado en el trabajo de Moreno y Arévalo (2015), la relación Th/U se interpreta de la siguiente manera: valores bajos sugieren condiciones reductoras favorables para la formación de pirita y materia orgánica, mientras que valores altos indican procesos de meteorización y condiciones oxidantes. Cuando los valores oscilan entre 2 y 7 ppm, es posible inferir la existencia de ambientes intermareales.

La Figura 29 sugiere que, para el segmento I, se pueden identificar los siguientes ambientes: hasta aproximadamente el metro 6, con valores intermedios de Th/U, un ambiente intermareal; el siguiente ambiente podría ser supramareal (hasta el metro 20) con valores relativamente altos de Th/U, seguido nuevamente de un ambiente intermareal por sus valores intermedios. El segmento II sugiere un ambiente intermareal. Finalmente, el segmento III se encuentra en un ambiente submareal hasta el metro 76, a partir de donde se podría inferir la transición a un ambiente intermareal.

### **Figura 29**

*Análisis relación Th/U de la Fm. Tablazo - El Ramo*



*Nota.* Relación Th/U Formación Tablazo - El Ramo. El eje Y representa la altura estratigráfica (metros) y el eje X la proporción de los elementos en cuestión. Fuente: Autor.

## 8.6 Zonas quimioestratigráficas

Utilizando el perfil gamma ray evaluado anteriormente junto con los análisis XRF y DRX, se identificaron tres zonas quimioestratigráficas (A, B y C) y cinco subzonas quimioestratigráficas (A1, A2, C1, C2 y C3) (Figura 30), basadas en las variaciones de elementos asociados a minerales arcillosos y minerales pesados, los cuales pueden estar relacionados con la procedencia y el ambiente de deposición ( $\text{TiO}_2$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , Zr, Cr, Th, U, entre otros). Las quimiozonas A, B y C coinciden con los límites litoestratigráficos de la sección. En la Figura 37 se muestran las características geoquímicas de cada zona y se resumen brevemente a continuación:

Quimiozona A (0 – 31.5 m): En comparación con la zona química B, tiene un mayor contenido de CaO,  $\text{SiO}_2$  y Zr/Cr. La relación  $\text{TiO}_2/\text{K}_2\text{O}$  es baja, pero su concentración aumenta gradualmente de abajo hacia arriba. Mineralógicamente, el complejo contiene cantidades significativas de cuarzo y calcita con una dosis menor de minerales arcillosos, principalmente caolinita, debido a las bajas proporciones K/Al.

Subzona A1: En esta zona, Si y Ti tienen una buena relación y el contenido de Zr es alto. Su contenido de carbonato está asociado al mineral calcita y tiene el mayor pico de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , posiblemente debido al contenido de óxido de hierro de esta fracción. Además, contiene un mayor contenido en Cu y Sr.

Subzona A2: Presenta altos valores de  $\text{SiO}_2$  y CaO, pero bajos contenidos de  $\text{TiO}_2$ , lo que indica una mineralogía calcárea rica en cuarzo. Muestra valores altos de Zr y una buena relación de  $\text{Nb}/\text{Al}_2\text{O}_3$ , por lo que están relacionados con la presencia de minerales pesados.

Quimiozona B (31.5 – 58.7 m): Generalmente, esta zona exhibe una alta concentración de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{TiO}_2$ , lo cual sugiere una mineralogía cuarzosa rica en minerales arcillosos,

especialmente caolinita debido a su baja proporción de K/Al. Además, presenta concentraciones moderadas de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , lo que está asociado con la formación de concreciones de siderita.

Quimiozona C (58.7 – 118.5 m): De manera general, esta área presenta altas concentraciones de  $\text{SiO}_2$ , Cu, Cr y Zr. Asimismo, la quimiozona incluye CaO,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  y MgO, los cuales están vinculados a las litologías y mineralogías particulares de cada subzona. Además, presenta un alto contenido de Ba y P, relacionado con la presencia de minerales como la barita y el apatito. Aunque las concentraciones de elementos son constantes y similares en esta quimiozona, la limitación de solo 18 muestras analizadas en un intervalo extenso dificulta una caracterización precisa.

Subzona C1: Exhibe un elevado contenido de  $\text{SiO}_2$  y CaO debido a su litología principal de calizas, con un pico de concentración de MgO asociado a minerales de glauconita o dolomita. Además, presenta proporciones elevadas de cobre (Cu) y hierro (Fe), posiblemente relacionadas con la presencia de calcopirita y óxidos de hierro.

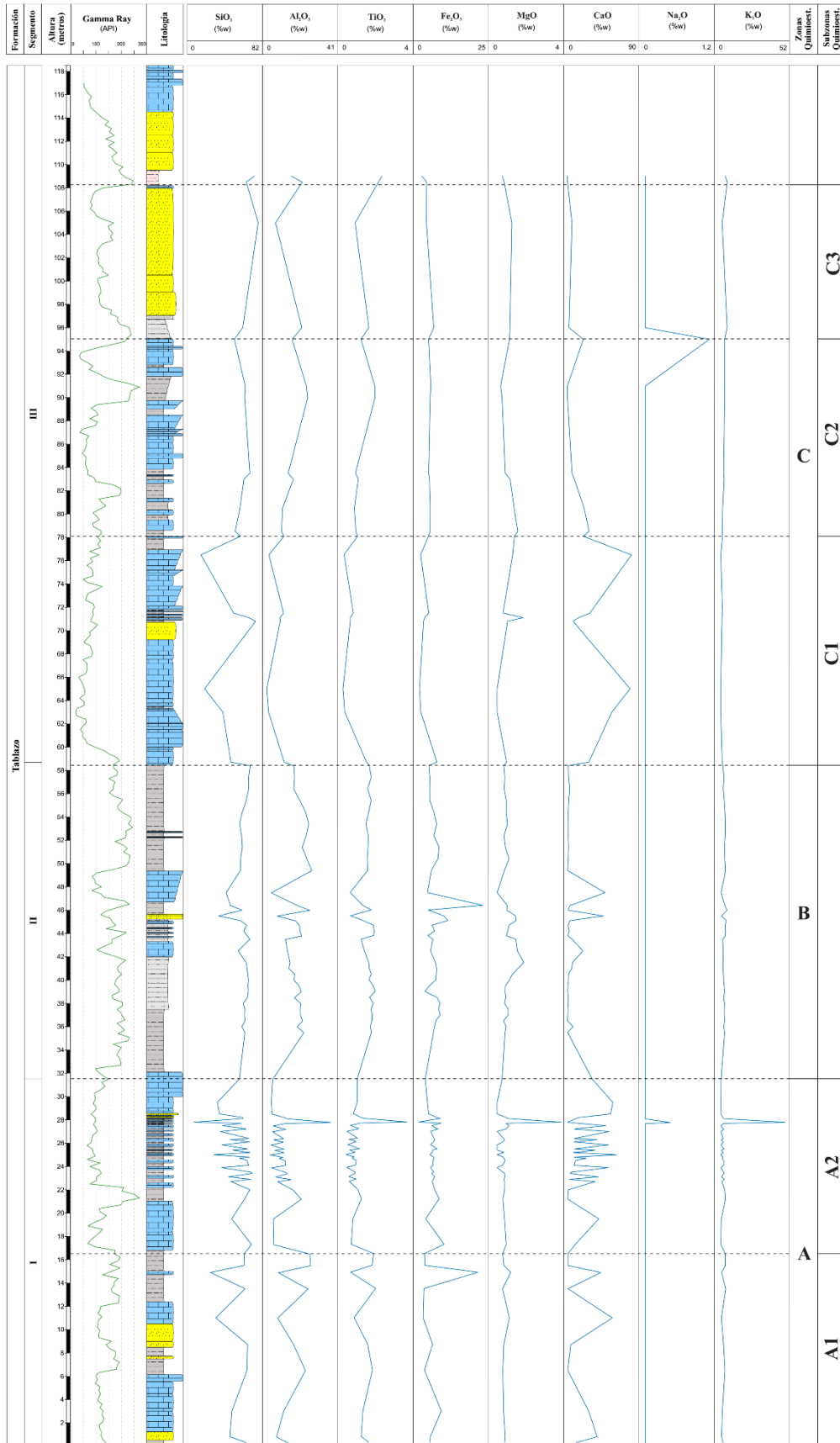
Subzona C2: Muestra mayores contenidos de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{TiO}_2$  en comparación con la subzona inferior, indicando la presencia de minerales arcillosos. También se registra magnesio y calcio, aunque en proporciones menores, posiblemente vinculados a calizas, dolomitas y la glauconita.

Subzona C3: Presenta el contenido más elevado de  $\text{SiO}_2$  debido a su composición litológica limitada a areniscas y arcillolitas, con bajos niveles de CaO, MgO y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , atribuibles a minerales como la dolomita, ankerita, calcita, siderita, pirita y clorita.

### **Figura 30**







*Perfiles geoquímicos de elementos mayores, traza y sus relaciones para el afloramiento Tablazo – El Ramo*

a)







<p><b>Localidad</b>  <b>Nombre:</b> El Ramo  <b>ID:</b> 2114216  <b>Unidades:</b> metros  <b>Escala:</b> 1 : 150</p>	<p><b>LEYENDA</b></p> <p><b>Litología dominante</b></p> <p> claystone</p> <p> mudstone</p> <p> siltstone</p> <p> sandstone</p> <p> limestone</p> <p> zonas quimioestratigráficas</p>
<p><b>Ubicación</b>  <b>Latitud:</b> 6.9988  <b>Longitud:</b> -73.3617  <b>País:</b> Colombia</p>	
<p><b>Autor</b>  Fabiana Corredor Santos</p>	

*Nota.* Se presentan los perfiles geoquímicos evaluados en el afloramiento Tablazo - El Ramo. La figura 30a muestra el análisis de los elementos mayores, la figura 30b muestra los elementos menores y la figura 30c se refiere a algunas relaciones entre estos elementos. Fuente: Autor.

La Tabla 8 muestra los valores promedio de cada elemento para cada subzona quimioestratigráfica de la Formación Tablazo en la sección El Ramo, así como el número de muestras en cada una de ellas (N). Los datos indican que la subzona A1 tiene la mayor concentración promedio de estroncio (Sr), la subzona A2 presenta concentraciones elevadas de fósforo, la zona B tiene mayores concentraciones de cromo (Cr) y la subzona C1 tiene mayores concentraciones de CaO debido a la presencia de capas gruesas de carbonatos. Por último, las subzonas C2 y C3 presentan altos contenidos de bario (Ba), fósforo (P) y zirconio (Zr).

### **Tabla 8**

*Concentraciones elementales medias para cada zona quimioestratigráfica definida en la columna Tablazo - El Ramo*

Tablazo - El Ramo										
Zona	Subzona	N	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
A	A1	10	53.35	17.27	1.16	5.74	0.49	19.39	0.00	2.16
	A2	33	54.46	10.48	0.66	5.65	0.46	24.82	0.01	2.93
B	-	33	62.02	19.88	1.28	6.65	0.69	5.54	0.00	2.74
C	C1	8	45.23	7.38	0.42	2.67	0.66	41.84	0.00	0.75
	C2	7	60.51	17.21	0.97	4.35	0.71	12.78	0.16	2.41
	C3	3	69.60	17.26	1.24	4.03	0.72	2.89	0.00	3.81

Tablazo - El Ramo									
Zona	Subzona	N	Ba	Cr	Cu	Sr	Y	Zr	P
A	A1	10	28.78	118.64	29.82	390.40	27.33	362.90	1275.50
	A2	33	16.88	114.03	29.34	344.67	30.15	200.38	2054.91
B	-	33	23.07	129.11	27.65	146.14	25.74	299.76	1924.45
C	C1	8	22.68	121.78	28.38	119.70	23.13	303.63	1371.25
	C2	7	25.91	119.31	29.34	122.09	23.70	306.00	1405.71
	C3	3	24.73	126.67	30.60	137.00	21.33	256.33	1313.33

*Nota.* Los elementos mayores se expresan en %w y los traza en ppm. La columna “N” indica el número de muestras en cada subzona. Fuente: Autor.

## 9. Conclusiones

En el presente estudio, se llevó a cabo el levantamiento y digitalización de una columna estratigráfica con un espesor de 118.5 metros a escala 1:100 de la Formación Tablazo en la sección El Ramo. Esta sección fue dividida en tres segmentos de manera informal, considerando sus características litoestratigráficas y la información proveniente de la Difracción de Rayos X. El segmento I se caracteriza por litologías como mudstone y calizas, y se distingue especialmente por el intervalo [23-29 m], que exhibe intercalaciones de lodolita y wackestone en capas delgadas. El segmento II presenta extensas capas de mudstone y silstone, acompañadas de concreciones de siderita. El segmento III se destaca por las capas gruesas de caliza en su base, y en la parte superior, se registran capas de arenisca de considerable espesor.

Los resultados de los análisis de Difracción de Rayos X (DRX) y Fluorescencia de Rayos X (XRF) desvelan que la Formación Tablazo presenta una mineralogía donde el cuarzo es el componente principal, seguido de minerales arcillosos o filosilicatos y carbonatos. Alrededor del 50% de las muestras muestran concentraciones de minerales arcillosos superiores al 20%, mientras que aproximadamente el 57% de las muestras indican valores por debajo del 10% en lo que respecta a los carbonatos.

Según los estudios de difracción de rayos X (DRX), la distinción entre los intervalos I y II radica en su elevada concentración de cuarzo y calcita, aunque es importante señalar que la relación comportamental entre estos dos minerales es inversa a lo largo de toda la sección. La mineralogía del segmento I se clasifica generalmente como mixta. El segmento II exhibe la mayor presencia de minerales arcillosos, catalogándose como arcillosa-cuarzosa; mientras que el intervalo III se

distingue de los demás debido a la presencia notoria de dos capas con la concentración más alta de calcita y se clasifica como cuarzosa rica en carbonatos.

De acuerdo con los resultados de XRF, los tres intervalos muestran notables concentraciones de  $\text{SiO}_2$ . Sin embargo, el intervalo I se caracteriza por poseer niveles más elevados de estroncio (Sr) y manganeso (Mn), en contraste con el segmento II, que se destaca por sus proporciones significativas de azufre (S). En lo que respecta al intervalo III, presenta las concentraciones más altas de fósforo (P).

En lo que respecta a la fracción de arcilla ( $<2\mu\text{m}$ ), la caolinita es la fase mineral predominante en esta sección, con un promedio de alrededor del 40%. Esto podría estar relacionado posiblemente con las primeras etapas de diagénesis de las rocas o su interacción con aguas meteóricas. Le sigue la calcita microcristalina, con un promedio del 25%, posiblemente asociada a la presencia de cemento calcáreo en las rocas. Por otro lado, la illita muestra valores promedio de aproximadamente el 19%, lo que podría estar vinculado a procesos de alteración diagenética. En relación con este análisis, se observa que el segmento I continúa exhibiendo una alta concentración de cuarzo y calcita microcristalina. En el caso del segmento II, prevalecen la caolinita y la illita. Por último, el intervalo III se caracteriza por su contenido de minerales interestratificados y barita. Aunque la barita se encuentra en proporciones reducidas, es el único segmento que la contiene.

En lo que respecta a la correlación entre el DRX y la composición química elemental según el análisis XRF, es posible inferir que el  $\text{SiO}_2$  está principalmente asociado al cuarzo, mientras que el contenido de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  está controlado en su mayoría por los minerales arcillosos. Por otro lado, el CaO se relaciona prácticamente en su totalidad con la presencia de calcita, yeso o dolomita. Asimismo, se presume que elementos menores, como el azufre (S), podrían estar vinculados a

condiciones anóxicas y minerales como la pirita, que se depositan bajo dichas condiciones. De manera similar, el fósforo puede estar relacionado con minerales fosfáticos como el apatito o con restos esqueléticos de peces. Elementos como Ba, Cd, Se, P y Mn parecen estar asociados a entornos de deposición caracterizados por una alta disponibilidad de nutrientes.

Al evaluar la relación  $Si/Al > 3$ , se puede determinar la presencia de un exceso de sílice. Debido a la correlación baja, se sugiere que la abundancia de sílice podría tener un origen biogénico o estar relacionada con procesos de reemplazamiento.

Los valores en la relación  $Cr/Th < 15$  sugieren que la fuente de sedimentos de la roca tiene un origen félsico. Por otro lado, aquellas muestras que superaron este umbral sugieren una fuente de roca intermedia.

A través de diversas correlaciones realizadas en esta sección, se estableció que el titanio (Ti) está vinculado a minerales arcillosos, especialmente la illita, y en el segmento III, se asocia con minerales pesados. En cuanto a la relación  $Zr$  vs  $Al_2O_3$ , indica que el aporte de detritos es de mayor tamaño. Del mismo modo, se concluye que los sedimentos presentes en esta sección fueron depositados mediante aportes detríticos, como se deduce de la relación  $Al/(Al+Fe+Mn) > 0.2$ .

La concentración de Sr a lo largo del afloramiento sugiere procesos diagenéticos en ambientes marinos someros, al igual que, podría indicar un medio de baja energía hacia la base del afloramiento y la relación  $Sr/Ca$  indica pequeñas variaciones en el nivel del mar.

Los picos caracterizados por la abundancia de potasio (K) y torio (Th) medidos del GR Spectral coinciden con las superficies de inundación en la sección, lo que podría insinuar el comienzo de transgresiones marinas. Los valores de  $Th/U$  podrían proporcionar indicios sobre las condiciones ambientales del sistema. En este contexto, se interpreta que el segmento I refleja

ambientes intermareales y supramareales, el segmento II sugiere un ambiente intermareal, mientras que el segmento III se asocia con un ambiente submareal a intermareal.

Se identificaron tres zonas quimioestratigráficas y cinco subzonas quimioestratigráficas en la sección El Ramo de la Formación Tablazo mediante el uso de perfiles geoquímicos y análisis de elementos asociados a minerales arcillosos y minerales pesados. Estas zonas se basan en fluctuaciones de elementos y en la variación del registro de gamma ray. Las quimiozonas coinciden con los tres intervalos estratigráficos. Se espera que estas zonas quimioestratigráficas sean de utilidad y permitan establecer correlaciones en secuencias sedimentarias donde el recobro bioestratigráfico sea escaso.

### Referencias Bibliográficas

- ANH. (2012). *Cuenca Valle Medio Del Magdalena. Integración Geológica de la Digitalización y Análisis de Núcleos.*
- Arche, A. (2010). *Sedimentología. Del proceso físico a la cuenca sedimentaria.*
- Azar, E.J. (2015). *Quimioestratigrafía isotópica (O y C) y elemental en el intervalo Oligo-Mioceno de la plataforma carbonática “Perla” al noreste del Golfo de Venezuela: implicaciones en estudios de correlaciones y paleoambientes.* (Trabajo de Grado). Universidad Central de Venezuela.
- Bautista, S., et al. (2016). *Exploración de Minerales Energéticos a partir de Mediciones Gamaespectrométricas para Potasio, Uranio Y Torio en el área Simacota – Lebrija y área de California, Departamento de Santander.*
- Bedoya, C. & Nomesqui, H. (2013). *Estratigrafía, quimioestratigrafía y petrografía de la Formación Rosablanca: Implicaciones para la identificación de eventos anóxicos oceánicos en la Cordillera Oriental colombiana.* (Trabajo de pregrado). Universidad de Caldas, Manizales, Colombia.
- Beil, S., et al. (2020). *Cretaceous oceanic anoxic events prolonged by phosphorus cycle feedbacks.* Clim. Past, 16, 757–782, 2020. <https://doi.org/10.5194/cp-16-757-2020>
- Cáceres, C., et al. (2003). *Mapas de distribución de facies sedimentarias y almacén tectónico de Colombia a través del proterozoico y del fanerozoico.* INGEOMINAS. Bogotá, Colombia.
- Carreño, A. & Gómez, J. (2021). *Informe técnico de caracterización mineralógica por difracción de rayos-x y fluorescencia de rayos-x por energía dispersa a muestras de roca de los*

*afloramientos Chucuri-Frontera y Quebrada Aguablanca, Cuenca Valle Medio del Magdalena.*

Catuneanu, O. (2006). *Principles of sequence stratigraphy*. Elsevier Science & Technology.

Craigie, N. (2018). *Principles of Elemental Chemostratigraphy. A Practical User Guide*.

<https://doi.org/10.1007/978-3-319-71216-1>

De la Cruz, E. (2018). *Fluorescencia de rayos X y su aplicación en la determinación de elementos químicos en determinadas muestras*. [Monografía técnica de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ciencias Físicas, Escuela Profesional de Física]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Duarte, E., et al. (2017). *Identificación De Los Máximos Eventos De Inundación Marina Miocenos Y Su Uso En La Correlación Y Análisis De La Cuenca De Antepaís De Los Llanos Orientales, Colombia*. Boletín De Geología, 39(1), 19–40.

<https://doi.org/10.18273/revbol.v39n1-2017001>

Duarte, J. (2017). *Geoquímica de la Formación Caballos (Aptiano-Albiano), Valle Superior del Magdalena, Colombia: Quimioestratigrafía y Condiciones Ambientales* (Tesis de Maestría). Universidad Nacional Autónoma de México.

*Espectroscopia de rayos gamma: definición, principio, partes, usos*. (2023, junio 26).

Microbiology Note – Online Biology Notes. <https://microbiologynote.com/es/gamma-ray-%CE%B3-ray-spectroscopy/>

Esteves, I., et al. (2007). *An integrated organic/inorganic chemostratigraphy study in Paleocene Barco Formation at the Lobaterita River, Táchira State, Venezuela*. Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia. Vol. 30, Edición Especial, 370 – 379.

- Etayo-Serna, Fernando, dir. cient. y ed. (2019). *Estudios geológicos y paleontológicos sobre el Cretácico en la región del embalse del río Sogamoso, Valle Medio del Magdalena*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.
- Farfán, A. & Vargas, M. (2015). *Estudio sedimentológico y geoquímico generalizado de la secuencia Cretácico-Paleógeno para determinar los ambientes de depositación y el potencial de generación de las rocas aflorantes en las quebradas Las Blancas y La Argentina en el municipio de Acacias (Meta)*. (Trabajo de grado). Universidad Industrial de Santander, Colombia.
- Gaona, T. (2015). *El Cretácico sedimentario al este de la falla de San Jerónimo*. Servicio Geológico Colombiano. En: Gómez, J. & Almanza, M.F. (Editores), *Compilando la geología de Colombia: Una visión a 2015*. Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales 33: 421-429. Bogotá.
- Gómez, J. e Infante, M. (2019). *Caracterización sedimentológica y estratigráfica del contacto entre la Formación La Paja y la Formación Tablazo en el noreste de la mesa de Barichara, Santander*. (Trabajo de grado). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.
- INGEOMINAS. (1973). *Memoria explicativa; Mapa Geológico de Colombia, cuadrángulo H-12 Bucaramanga y H-13 Pamplona*.
- Jarvis, I., et al. (1998). *Chemostratigraphy of Madeira Abyssal Plain Miocene-Pleistocene turbidites, Site 950*. En Proceedings of the Ocean Drilling Program, 157 Scientific Results (Vol. 157). Ocean Drilling Program.
- Jarvis, I., Murphy, A. M., & Gale, A. S. (2001). *Geochemistry of pelagic and hemipelagic carbonates: Criteria for identifying systems tracts and sea-level change*. *Journal of the Geological Society*, 158(4), 685-696. <https://doi.org/10.1144/jgs.158.4.685>

- Jiménez, G., & García, C. A. (2023). Mineralogía magnética en rocas del Jurásico de la Cordillera Oriental de Colombia. *Boletín De Geología*, 45(2), 35–49. <https://doi.org/10.18273/revbol.v45n2-2023002>
- Juliao, T. (2021). *Estudio de la porosidad orgánica con la evolución térmica en rocas generadoras cretácicas de la cuenca Valle Medio del Magdalena, Colombia*. (Tesis doctoral). Universidad de Oviedo, Asturias, España.
- Julivert, M. (1961). *Las estructuras del valle medio del Magdalena y su significación*. *Boletín De Geología*, (6), 33–52. Recuperado a partir de <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistaboletindegologia/article/view/4257>
- Julivert, M., et al. (1968). *Precámbrico, Paleozoico, Mesozoico, e intrusiones del Mesozoico - edad Terciaria*. Vol. 5. Colombia.
- López, L. (s/f). *Espectrometría de Rayos Gamma: Aplicaciones en Prospección Uranífera Y en Medio Ambiente*. Osti.gov. Recuperado el 24 de julio de 2023, de <https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/20302868>
- Lozano, E. y Zamora, N. (2014). *Anexo N Compilación de la Cuenca del Valle Medio del Magdalena*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.
- Madhavaraju, J., & Lee, Y. I. (2009). *Geochemistry of the Dalmiapuram Formation of the Uttatur Group (Early Cretaceous), Cauvery basin, southeastern India: Implications on provenance and paleo-redox conditions*. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v.26, núm 2, p. 380-394.
- Madhavaraju, J., et al. (2016). *Paleoclimate, paleoweathering and paleoredox conditions of Lower Cretaceous shales from the Mural Limestone, Tuape section, northern Sonora, Mexico*:

- Constraints from clay mineralogy and geochemistry*. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v.33, núm. 1, p. 34-48.
- Medina, M. (s.f.). *Estratigrafía de La Formación Tablazo en la zona de Barichara, Santander*. (Trabajo de grado). Universidad Nacional de Colombia.
- Modulo I, Trabajo Práctico N°5. Quimioestratigrafía*. (s/f). Universidad Nacional de Córdoba.
- Moreno, D. y Arévalo, L. (2015). *Estratigrafía del Grupo Guadalupe y análisis de Gamma Ray de afloramiento en la Quebrada Caño Blanco en los alrededores del municipio de Acacias (Meta)* (Trabajo de Grado). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- Moreno, G., & Sarmiento, G. (2002). *Estratigrafía Cuantitativa de las Formaciones Tablazo y Simití en las localidades de Sáchica (Boyacá) y Barichara—San Gil (Santander), Colombia*. GEOLOGIA COLOMBIANA, 27, pp. 51-76, 21 Figs., 2 Tablas, Bogotá.
- Morford, J. L., & Emerson, S. (1999). *The geochemistry of redox sensitive trace metals in sediments*. Geochimica et Cosmochimica Acta, 63(11-12), 1735-1750.  
[https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(99\)00126-X](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(99)00126-X)
- Murphy, M. & Salvador, A. (2000). *International Stratigraphic Guide – An Abridged Version*. GeoArabia, Vol. 5, No. 2, 231-266. University of Texas at Austin.
- Navarrete, E. (s. f.). *Apuntes de Estratigrafía y Sedimentación*. Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), Guayaquil, Ecuador.
- Nichols, G. (2009). *Sedimentology and stratigraphy* (2nd ed). Wiley-Blackwell.
- Ortiz, J., and Jaramillo, C., (2020). *SDAR: a Toolkit for Stratigraphic Data Analysis*. R package version 0.9-55. <https://cran.r-project.org/package=SDAR>

- Oyarzún L., et al. (2002). *Espectrometría gamma: Un método complementario para determinar la litología de materiales parentales de suelos. Aplicación a un estudio agrológico*. Agricultura Técnica, 62(3), 480–484. <https://doi.org/10.4067/s0365-28072002000300013>
- Pearce, T., et al. (1999). *Chemostratigraphy: a method to improve interwell correlation in barren sequences – a case study using onshore Duckmantian/Stephanian sequences (West Midlands, U.K.)*. Sedimentary Geology 124, 197–220.
- Pearce, T. et al. (2010). *A whole-rock geochemical approach to the recognition and correlation of “marine bands”*. En Application of Modern Stratigraphic Techniques: Theory and Case Histories (pp. 219–238). SEPM (Society for Sedimentary Geology).
- Pérez, A. (2019). *Introducción al reconocimiento de pautas para establecer un GSSP del Cretácico: Formación Paja, Colombia* (Tesis de pregrado). Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.
- Piovano, E. L., et al. (1999). *Geochemical tracers of source rocks in a Cretaceous to Quaternary sedimentary sequence (Eastern Sierras Pampeanas, Argentina)*. Journal of South American Earth Sciences, 12(5), 489-500. [https://doi.org/10.1016/S0895-9811\(99\)00031-0](https://doi.org/10.1016/S0895-9811(99)00031-0)
- Polare, M. y Fraga, H. (2021). *Estratigrafía*. 9ª edición. Departamento de Ciencias Geológicas, UNR.
- Ratcliffe, K., et al. (2010). *Application of chemostratigraphy to the Mungaroo Formation, the Gorgon field, offshore northwest Australia*. The APPEA Journal, 50(1), 371. <https://doi.org/10.1071/AJ09022>

- Ratcliffe, K. & Schmidt, K. (2011). *Application of Inorganic Whole-Rock Geochemistry to Shale Resource Plays: An Example from the Eagle Ford Shale, Texas*. HGS Northsiders Luncheon. *Houston Geological Society Bulletin*.
- R Core Team (2023). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>
- Rey, O., et al. (2009). *Sedimentología y geoquímica sedimentaria de la formación el paraíso, Cuenca de Falcón, Venezuela*. *Revista De La Facultad De Ingeniería*, 24(4), 16–26. [http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0798-40652009000400002](http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-40652009000400002)
- Rimmer, S. M. (2004). *Geochemical paleoredox indicators in Devonian–Mississippian black shales, Central Appalachian Basin (USA)*. *Chemical Geology*, 206(3-4), 373-391. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2003.12.029>
- Rivera, H. A., et al. (2018). *Palaeoredox conditions and sequence stratigraphy of the Cretaceous storm-dominated, mixed siliciclastic-carbonate ramp in the Eastern Cordillera Basin (Colombia): Evidence from sedimentary geochemical proxies and facies analysis*. *Sedimentary Geology*, 372, 1-24. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2018.05.003>
- Romero, M. (2007). *Quimioestratigrafía y geoquímica sedimentaria en una sección de la Formación El Paraíso, Quebrada Purureche, Cuenca de Falcón, Venezuela* (Tesis de Magíster). Universidad Central de Venezuela.
- Ross, D. J. K., & Bustin, R. M. (2009). *Investigating the use of sedimentary geochemical proxies for paleoenvironment interpretation of thermally mature organic-rich strata: Examples from the Devonian–Mississippian shales, Western Canadian Sedimentary Basin*. *Chemical Geology*, 260(1-2), 1-19. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.10.027>

- Sánchez, A y Esteban, L. (2012). *Columna tipo y estratigrafía secuencial del sistema petrolífero asociado a un miembro del Grupo Calcáreo Basal, la Formación Tablazo en el Valle Medio del Magdalena*. (Trabajo de grado). Universidad Industrial de Santander, Colombia.
- Sánchez, E. & Rodríguez, R. (2016). *Análisis quimioestratigráfico de rocas siliciclásticas del Cretáceo a lo largo de la Cordillera Oriental y la faja Subandina*. XVIII Congreso Peruano de Geología.
- Sangüesa, J. (2007). *El análisis mineralógico mediante difracción de rayos X (DRX) y sus aplicaciones*. Tierra y tecnología. N° 32, p 75-86. España.
- Sarmiento, G., et al. (2015). *Evolución Geológica y Estratigrafía del Sector Norte del Valle Medio del Magdalena*. Departamento de Geociencias de la Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Sarmiento, L. (2011). *Middle Magdalena Basin*. Petroleum Geology of Colombia. Vol 11. Fondo Editorial Universidad EAFIT. ANH.
- Sarmiento, L. F. (2019). *Cretaceous Stratigraphy and Paleo-Facies Maps of Northwestern South America*. En F. Cediél & R. P. Shaw (Eds.), *Geology and Tectonics of Northwestern South America* (pp. 673-747). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-76132-9\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-319-76132-9_10)
- Sharma, M., et al. (2009). *X-ray fluorescence analysis Indian and other countries coins using Energy Dispersive Experiment (EDX) method*.
- Schlanger, S. & Jenkyns, H. (1976). *Cretaceous Oceanic Anoxic Events: Causes and Consequences*. Geologie en Mijnbouw. Volume 55 (3-4), p 179-184.
- SGC. (2014). *Geología de la plancha 120 Bucaramanga*.

Toussaint, J. & Restrepo, J. (1994). *The Colombian Andes During Cretaceous Times*. Cretaceous Tectonics of the Andes edited by J. A. Salfity, J. pp 61-100.

Vera, J. A. (1994). *Estratigrafía: Principios y métodos*. Rueda.

*Wavelength Dispersive X-ray Fluorescence (WDXRF)*. (s/f). Xos.com. Recuperado el 24 de julio de 2023, de <https://www.xos.com/WDXRF>

Yarincik, K. M., et al. (2000). *Climatically sensitive eolian and hemipelagic deposition in the Cariaco Basin, Venezuela, over the past 578,000 years: Results from Al/Ti and K/Al*. *Paleoceanography*, 15(2), 210-228. <https://doi.org/10.1029/1999PA900048>

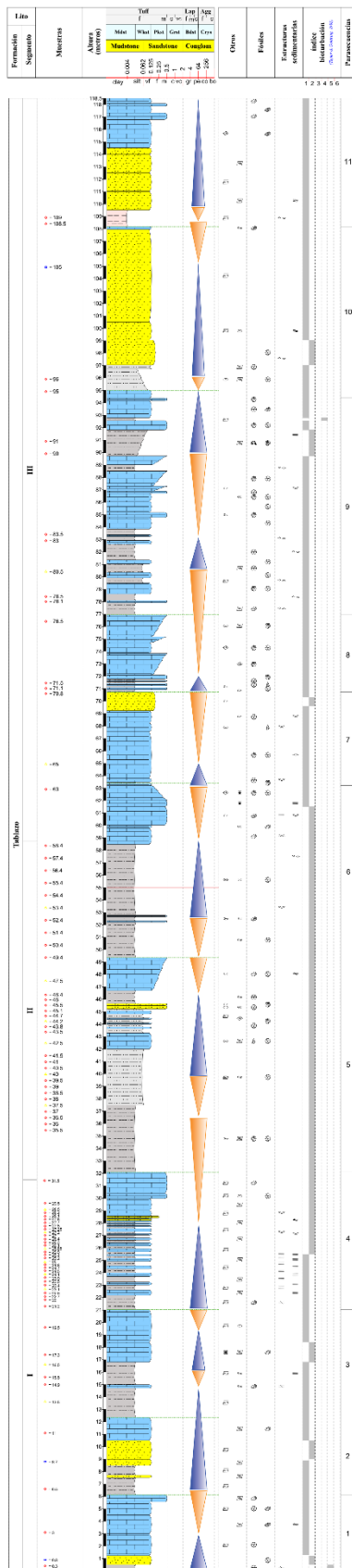
Yarincik, K. M., et al. (2000). *Oxygenation history of bottom waters in the Cariaco Basin, Venezuela, over the past 578,000 years: Results from redox-sensitive metals (Mo, V, Mn, and Fe)*. *Paleoceanography*, 15(6), 593-604. <https://doi.org/10.1029/1999PA000401>

## Apéndices

## Apéndice A. Posición estratigráfica de las muestras de roca Formación Tablazo – El Ramo

Muestras de roca Tablazo - El Ramo		Muestras de roca Tablazo - El Ramo		Muestras de roca Tablazo - El Ramo	
N° muestra	Posición estratigráfica (m)	N° muestra	Posición estratigráfica (m)	N° muestra	Posición estratigráfica (m)
1	0.3	32	26.4	63	45.5
2	0.8	33	27	64	46
3	3	34	27.2	65	46.4
4	6.5	35	27.25	66	47.5
5	8.7	36	27.5	67	49.4
6	11	37	27.7	68	50.4
7	13.5	38	27.8	69	51.4
8	14.9	39	28.1	70	52.4
9	15.5	40	28.2	71	53.4
10	16.5	41	28.5	72	54.4
11	17.3	42	29.5	73	55.4
12	19.5	43	31.5	74	56.4
13	21.2	44	35.5	75	57.4
14	22	45	36	76	58.4
15	22.7	46	36.5	77	58.7
16	22.9	47	37	78	63
17	23.1	48	37.5	79	65
18	23.4	49	38	80	70.8
19	23.5	50	38.5	81	71.1
20	23.9	51	39	82	71.5
21	24.1	52	39.5	83	76.5
22	24.5	53	40	84	78.1
23	24.7	54	40.5	85	78.5
24	24.8	55	41	86	80.5
25	25	56	41.5	87	83
26	25.2	57	42.5	88	83.5
27	25.4	58	43.5	89	90
28	25.5	59	43.8	90	91
29	25.85	60	44.2	91	95
30	26.1	61	44.7	92	96
31	26.3	62	45.1	93	105
				94	108.5
				95	109

Apéndice B. Columna estratigráfica de la Formación Tablazo sección El Ramo



Localidad		LEYENDA		
Nombre: El Ramo ID: 2114216 Unidades: metros Escala: 1 : 150		<b>Litología dominante</b> claystone mudstone siltstone sandstone limestone	<b>Índice bioturbación</b> (Taylor & Goldring, 1983) 1 - Escasa    4 - Alta 2 - Baja     5 - Intensa 3 - Moderada    6 - Completa	<b>Estructuras sedimentarias</b> = masiva = laminación planar = laminación flaser = laminación ondulada = laminación lenticular
<b>Ubicación</b> Latitud: 6.9988 Longitud: -73.3617 País: Colombia		<b>Otros</b> Fósiles crustáceos moluscos gasterópodos bivalvos foraminíferos planctónicos	concreciones nódulos calcita glauconita yeso mica pirita siderita	superficies de inundación superficie de máxima inundación retrogradación progradación
<b>Autor</b> Fabiana Corredor Santos				