



Criterios en la definición del Límite Cretácico-Paleógeno en el Sector Norte del VMM-
Colombia

Clara Inés Torres Vásquez

Trabajo de Grado para Optar el título de Magister en Geología

Director

Jorge Eduardo Pinto Valderrama
M.Sc. en Geología

Codirector

Victor Manuel Caballero Ortíz
M.Sc. en Geología

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ciencias Físico-químicas
Escuela de Geología
Maestría en Geología
Bucaramanga

2020



Dedicatoria

A Dios por la salud, fortaleza y entendimiento que me ha dado

A mis padres que desde el cielo me acompañan

A mi esposo Martín por su incondicionalidad

A mis hijos Camilo y Marcela por su amor y compañía

Agradecimientos

Quiero dar un agradecimiento muy especial a mi director Jorge Eduardo Pinto, excelente docente y ser humano, me ha enseñado a perseverar, a no rendirme en este proceso, su valioso tiempo, gestión, enseñanzas, apoyo y patrocinio, han sido muy importantes para este logro.

A la maestría y la Escuela de Geología, por la oportunidad que me han brindado. Al profesor Luis Carlos Mantilla, por su comprensión y apoyo para sacar este proyecto adelante, por sus aportes e ideas para la investigación. Al profesor Juan Diego Colegial, por sus buenos consejos y sus buenos deseos. A Jairo Clavijo, por sus buenas recomendaciones.

Al laboratorio de Rayos X – sede Guatigurá-UIS, en especial al profesor Henao, excelente docente y gran ser humano, gracias por su tiempo, su disponibilidad, su sencillez, por recibirme en todo momento con el deseo exclusivo de colaborar en esta investigación. A las personas que allí laboran, Edy (muy especial), Silvia, Cindy, Jhon, a todos por su tiempo, por su amistad y buenos deseos.

Al profesor Víctor Caballero, codirector de esta tesis, gracias por su tiempo, por su compañía en campo, por sus enseñanzas, por estar siempre listo a colaborar con este proyecto.

A todos aquellos que han sido parte de este proceso, a Silvana, Rossana y Silvia. A mi buena amiga Mailen, por su buena vibra y su compañía. A Julián por compartir conmigo de manera abierta y desinteresada su trabajo de pregrado y ser mi compañero de campo.

A todos aquellos que de alguna manera han contribuido a que esto sea una realidad. Al Convenio y a la gestión de los docentes de la maestría. Mil gracias a todos.



Tabla de Contenido

Introducción	13
1. Objetivos	17
1.1 Objetivo General	17
1.2 Objetivos Específicos.....	17
3. Cuerpo del Trabajo.....	18
3.1 Marco Referencial	18
3.1.1 Método.	26
3.1.2 Resultados.	33
4. Conclusiones	74
5. Recomendaciones.....	76
Referencias Bibliográficas	77



Lista de Tablas

Tabla 1. Selección de muestras para análisis en laboratorio, Sección Lizama.	43
Tabla 2. Selección de muestras para análisis en laboratorio, sección Mata de Cacao	47
Tabla 3. Selección de muestras para XRF en la sección Rio Sucio.....	49
Tabla 4. Atributos químicos para inferir condiciones en el ambiente sedimentario.....	60
Tabla 5. Porcentaje de elementos mayores para la sección Lizama por XRF	62
Tabla 6. Matriz de correlación para identificar elementos inmóviles en la sección Lizama ...	62
Tabla 7. Elementos mayores para la sección Mata de Cacao por XRF	64
Tabla 8. Elementos traza para la sección Mata de Cacao por XRF.	64
Tabla 9. Matriz de correlación para los elementos de la sección Mata de Cacao	65
Tabla 10. Elementos mayores para la sección Rio Sucio por XRF.	66
Tabla 11. Elementos traza para la sección Rio Sucio por XRF.	67

Lista de Figuras

Figura 1. Ubicación del área de estudio, cuenca del VMM.	15
Figura 2. Representación de las extinciones en el planeta	19
Figura 3. Evidencias de Ir sobre el K/Pg en el planeta	20
Figura 4. El límite K/Pg alrededor del mundo	21
Figura 5. Límite K/Pg Isla Gorgonilla-Colombia	22
Figura 6. Evidencias petrológicas y mineralógicas en el límite K/Pg.....	23
Figura 7. Columna Generalizada Valle Medio del Magdalena (VMM).	25
Figura 8. Preparación de muestras para análisis DRX Guatiguará- UIS.	28
Figura 9 Clasificación de elementos químicos: mayores, menores y trazas.	29
Figura 10. Distribución de elementos mayores, menores y trazas	32
Figura 11. Secuencia parcial del Cretácico, Quebrada la Julia.	35
Figura 12. Sección Lizama.....	39
Figura 13. Contacto Umir-Lizama. Presencia de paleosuelos, arcillas abigarradas y m.o	40
Figura 14. Método de bastoneo para levantamiento de columna estratigráfica.	41
Figura 15. Columna Estratigráfica de la Sección Lizama.....	42
Figura 16. Ubicación del Límite K/Pg en la Sección Lizama, según análisis de campo.	44
Figura 17. Sección Mata de Cacao sobre la vía a Barrancabermeja	45
Figura 18. Paleosuelos en la sección Mata de Cacao.....	45
Figura 19. Columna Estratigráfica de la sección Mata de Cacao.	46
Figura 20. Ubicación del Límite K/Pg en Mata de Cacao según análisis de campo.....	48
Figura 21. Ubicación del límite K/Pg, sección Rio Sucio según análisis de campo	50

Figura 22. Palinomorfo del Cretácico- Maastrichtiense, <i>Buttinia Andreevi</i>	51
Figura 23. Especies monoporites <i>annulatus</i> , esporas del Daniense	51
Figura 24. Ubicación zona K/Pg según análisis palinológico en la Sección Lizama.....	52
Figura 25. Análisis petrográfico Sección Lizama.	53
Figura 26. Análisis Petrográfico de lodolitas en la Sección Lizama.....	54
Figura 27. Análisis petrográfico de muestras para la Sección Lizama.	55
Figura 28. Homogeneidad petrográfica en la Sección Lizama.	56
Figura 29. Análisis DRX para la Sección Lizama.	57
Figura 30. Comportamiento de elementos inmóviles en la Sección Lizama.	62
Figura 31. Quimiofacies según elementos inmóviles en la Sección Lizama	63
Figura 32. Comportamiento de los elementos inmóviles en la sección Mata de Cacao.	65
Figura 33. Quimiofacies según elementos inmóviles en la Sección Mata de Cacao.	66
Figura 34. Comportamiento de los elementos inmóviles en la sección Río Sucio.	67
Figura 35. Quimiofacies según elementos inmóviles en la Sección Río Sucio.	68
Figura 36. Correlación de quimiofacies en las tres secciones.....	73

Lista de Apéndices

“Los apéndices están adjuntos en el CD y puede visualizarlos en base de datos de la biblioteca

UIS”

Apéndices A. Columnas estratigráficas

Apéndices B. Informe análisis petrográfico

Apéndices C. Quimioestratigrafía

Apéndices D. Estadística para quimioestratigrafía

Apéndices E. Palinología

Resumen

Título: Criterios en la definición del límite Cretácico-Paleógeno en el contacto Umir – Lizama, sector Norte, VMM-Colombia

Autor: Clara Inés Torres Vásquez **

Palabras Claves: Límite K/Pg, Formación Umir, Formación Lizama, quimioestratigrafía elemental, indicadores del límite K/Pg

Descripción:

El límite K/Pg, representa la línea de tiempo de la última extinción masiva hace 66 ± 0.5 M.a, identificada en varias partes del mundo por una delgada capa de arcilla que contiene evidencias de dicha extinción. En el sector Norte del VMM, Colombia, la capa de arcilla no se visualiza y el límite es tomado como el contacto entre las Formaciones Umir del Cretácico y Lizama del Paleógeno. Se analizan aquí, tres secciones (Lizama, Mata de Cacao y Rio Sucio), ubicadas al NE de la vía que conduce de Bucaramanga a Barrancabermeja; con el fin de encontrar criterios estratigráficos que permitan definir la zona donde se encuentra el límite K/Pg. Se utiliza la palinología como herramienta de datación relativa, visualizando cambios en los palinomorfos, separando el Cretácico del Paleógeno. A partir de este rango, se hace análisis petrográfico y DRX, siendo para la sección Lizama criterios que no permiten establecer alguna zona de cambio importante, por la homogeneidad mineralógica presentada. Posteriormente, se realiza un análisis químico, con fluorescencia de Rayos X (FRX), determinando elementos mayores, menores y trazas. Se hace análisis estadístico, método de pares de elementos (Fralick y Kronberg, 1997), se determina el coeficiente de correlación, estableciendo la movilidad e inmovilidad de elementos, generando una matriz de correlación. Los elementos inmóviles permiten el análisis de atributos y perfiles químicos para determinar quimiofacies y establecer la zona del K/Pg. En las tres secciones se observa una asociación de carbonatos hacia la base y actividad biológica, superyace una zona donde los elementos indican condiciones oxido-reductoras, luego, se restablece el ambiente y la actividad orgánica, pero un evento genera reducción de O, salinidad y disminución de la actividad biológica nuevamente (zona del límite K/Pg), y finaliza con una asociación siliciclástica.

*Tesis de maestría

**Facultad de Ciencias Físicoquímicas. Escuela de Geología. Director: M.Sc. Jorge Eduardo Pinto Valderrama. Codirector: M.Sc. Víctor Caballero

Abstract

Title: Criteria in the definition of the Cretaceous-Paleogene limit in the Umir contact-Lizama, North Sector, VMM-Colombia*

Author: Clara Inés Torres Vásquez**

Keywords: K/Pg Limit, Umir Formation, Lizama Formation, Chemostratigraphy Elementary, K/Pg limit indicators

Description:

The K / Pg limit represents the timeline of the last mass extinction 66 ± 0.5 M.a, identified in several parts of the world by a thin layer of clay containing evidence of such extinction. In the northern sector of the VMM, Colombia, the clay layer is not visualized and the limit is taken as the contact between the Umir Formations of the Cretaceous and Lizama of the Paleogene. Three sections are analyzed here (Lizama, Mata de Cacao and Rio Sucio), located NE of the road that leads from Bucaramanga to Barrancabermeja, in order to find stratigraphic criteria that allow defining the area where the K / Pg limit is located. Palynology is used as a relative dating tool, visualizing changes in palynomorphs, separating the Cretaceous from the Paleogene. From this range, petrographic analysis and DRX are made, being criteria that do not allow to establish an area of an important change in the Lizama section, due to the mineralogical homogeneity presented. Subsequently, a chemical analysis is performed, with X-ray fluorescence (FRX), determining major, minor and trace elements. Statistical analysis is done, method of pairs of elements (Fralick and Kronberg, 1997), the correlation coefficient is determined, establishing the mobility and immobility of elements, generating a correlation matrix. The immobile elements allow the analysis of chemical attributes and profiles to determine chemofacies and establish the K / Pg zone. In the three sections, an association of carbonates towards the base and biological activity is observed, an area where the elements indicate oxidizing-reducing conditions are superimposed. Then the environment and the organic activity are restored, but an event generates a reduction of O, salinity and decreased biological activity again (K / Pg boundary zone), and ends with a siliciclastic association.

*Master's Thesis

** Faculty of Physicochemical Sciences. School of Geology. Director: M.Sc. Jorge Eduardo Pinto Valderrama. Co-Director: M.Sc. Victor Caballero

Introducción

El límite K/T, desde 2008 K/Pg (Melendez, 2008), hace alusión a la línea de tiempo en la Tierra, durante la cual ocurre la última extinción en masa que se conoce a finales del Cretácico (Pardo, 2006; Molina, 2007; Meléndez & Molina, 2008; Pardo *et al.*, 2011). De acuerdo con la carta estratigráfica actual, dicha extinción en masa ocurrió hace aproximadamente 66.0 ± 0.5 M.a, dando inicio al periodo Paleógeno. En el límite K/Pg desaparece el 76% de las especies marinas y la de los grandes dinosaurios, permitiendo la aparición de nuevas especies (Alvarez & Alvarez, 1980; Pardo, Keller y Adatte, 2011; Villasantes, 2015).

Una de las evidencias encontradas alrededor del planeta, es una fina capa de arcilla oscura que separa el Cretácico del Paleógeno y sobre ella una serie de indicadores (picos de iridio, microtectitas, cuarzos de choque, espinelas de Ni), de un posible evento que pudo generar la extinción en masa. En Colombia el único caso registrado hasta hoy sobre el K/Pg, bajo el hallazgo de la delgada capa de arcilla con microkristitas, se ha llevado a cabo en la Isla Gorgonilla (Bermúdez *et al.*, 2015; Bermúdez *et al.*, 2019).

Para el resto del país, dicha capa de arcilla oscura, no se ha visualizado como tal, el sector Norte del Valle Medio del Magdalena, no es la excepción. En esta área se puede apreciar el contacto entre las Formaciones Umir (Cretácico Superior) y Lizama la primera del Paleógeno y se cuenta con estudios bioestratigráficos y palinológicos, que han permitido la datación relativa y la diferenciación de especies del Cretácico y del Paleógeno. Así, la distribución y selección de palinomorfos, foraminíferos, como los cambios litológicos, sedimentológicos, mineralógicos reportado para la cuenca del VMM por diversos autores (Duque-Caro, 1965; Tchegliakova &

Pérez, 1995; Etayo & Carrillo, 1996; Caballero, 2010; Sarmiento *et al.*, 2015; Montaña *et al.*, 2017; Gómez, 2019), a pesar de no definir una zona específica y clara para el límite K/Pg, brindan una serie de pautas iniciales en el conocimiento de la última unidad cretácica depositada (Formación Umir) y la primera del Paleógeno (Formación Lizama) y son el punto de partida de este trabajo.

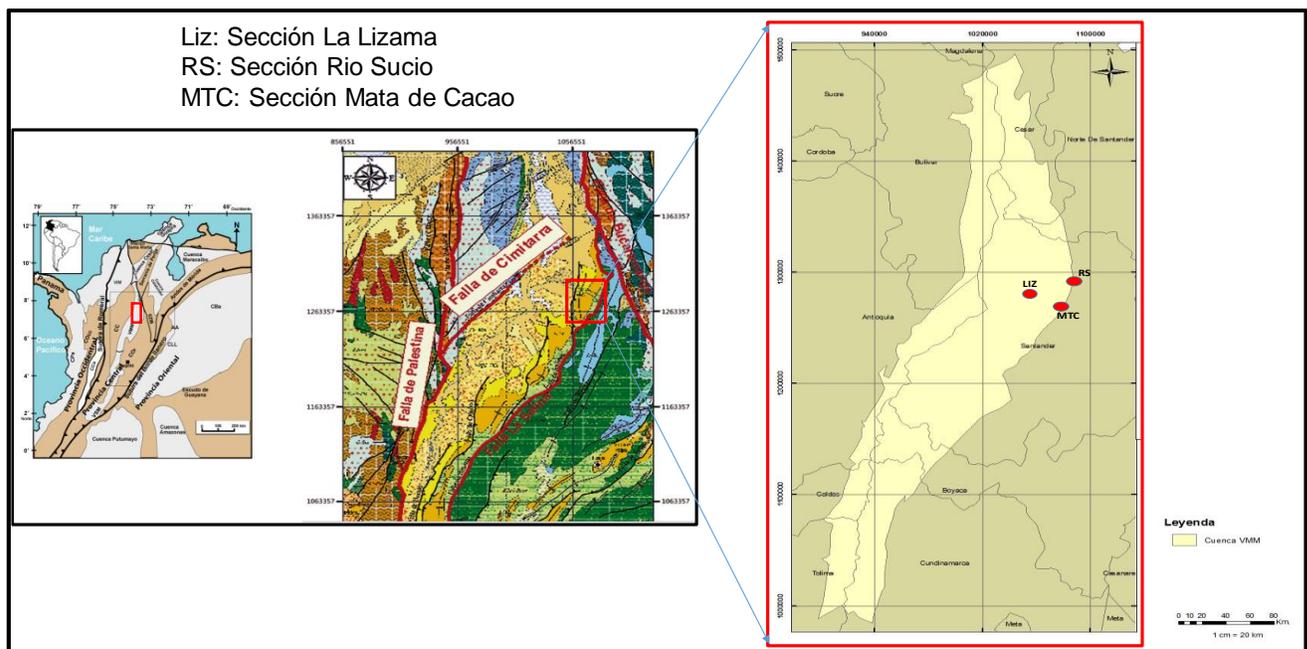
De acuerdo al análisis realizado durante la construcción del estado del arte para esta investigación surge la pregunta ¿cuáles son los criterios adecuados para diferenciar el Cretácico del Paleógeno en el sector Norte del VMM, teniendo en cuenta las características estratigráficas del área y poder definir una zona para el límite K/Pg? a partir de ahí se construye este trabajo.

El área de estudio corresponde al sector norte del VMM; el VMM es una cuenca intramontana, ubicada entre las cordilleras Central y Oriental y definida por el río Magdalena que va en dirección aproximada, norte sur. Dicha cuenca ha sido dividida por la industria del petróleo en Valle Superior (VSM), Valle Medio (VMM) e Inferior del Magdalena (VIM). “La Falla de Palestina separa la Cordillera Central del VMM sur, pero al norte son las rocas del Cretácico que afloran discordantemente sobre la Serranía de San Lucas, las que se constituyen el límite Geográfico – Geológico”. En el Oriente, rocas del Cretácico inferior de la Cordillera Oriental limitan el VMM a lo largo del trazo de la Falla de La Salina, la cual es fosilizada y plegada por el Sistema de Fallas de Bucaramanga, continuando hacia el Noreste a lo largo de dicho trazo con rocas jurásicas intrusivas y volcánicas (Sarmiento, *et al.*, 2015).

La definición del área de estudio se hace teniendo en cuenta las zonas reportadas con afloramientos donde está el contacto Umir-Lizama, seleccionando tres secciones a saber: sección Lizama, Mata de Cacao y Rio Sucio, ubicadas al NE de la vía que conduce de Bucaramanga a Barrancabermeja (figura 1); la sección Lizama ubicada cerca de la zona La Fortuna, sobre la actual ruta del Cacao, Mata de Cacao, en el talud del mismo nombre metros adelante del túnel vía

Bucaramanga – Barrancabermeja y Río Sucio, sobre la antigua vía a Sabana de Torres, en la zona del Puente Rojo sobre el río que tiene el mismo nombre.

De acuerdo a observaciones en campo y estudios existentes, en el sector Norte del VMM, el límite K/Pg infrayace al contacto litológico Umir-Lizama y para demostrarlo es necesario complementar y correlacionar información palinológica, petrográfica y DRX con análisis quimioestratigráfico elemental, mediante el cual se analizan los elementos inmóviles durante la sedimentación en cada sección por el método de pares (Fralick y Kronberg, 1997), donde se buscan elementos químicos que posean buena correlación gracias a su potencial iónico (Railsback, 2003; Sánchez & Rodríguez, 2016). Dichos elementos, son claves en el análisis e interpretación quimioestratigráfica ya que al ser inmóviles no tienen cambios y muestran el mismo comportamiento hidrodinámico a lo largo de todo el proceso de sedimentación (Sánchez & Rodríguez, 2016).



Con el presente trabajo, se da un aporte a la generación del conocimiento geológico, a la comunidad científica interesada en profundizar sobre el límite K/Pg, se emplean herramientas poco usadas en este tipo de estudios en Colombia, especialmente en áreas donde por la evolución geológica, la tectónica y los procesos y cambios medioambientales, no se logran evidenciar indicadores como la capa de arcilla oscura con picos de Ir, microesférulas, cuarzos de choque, espinelas de Ni, entre otros. Al definir la zona del K/Pg y establecer como cierta la hipótesis planteada, se propone profundizar en el tema con técnicas absolutas y de precisión, ya que los modelos estratigráficos del sector Norte del VMM, en el K/Pg, tendría ciertas variaciones.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Contribuir a la generación del conocimiento geológico con la determinación de criterios estratigráficos para la definición del límite K-P, mediante la caracterización del contacto en el tope de la formación Umir y la base de la formación Lizama en el sector norte del VMM.

1.2 Objetivos Específicos

Identificar trabajos realizados en las formaciones Umir-Lizama en el sector norte del VMM, mediante la búsqueda bibliográfica para realizar análisis de metodologías, secciones estratigráficas en campo, mapas y resultados de laboratorio que presenten criterios tenidos en cuenta en la definición del límite K-Pg.

Caracterizar mediante estudio de afloramientos y análisis de laboratorio (petrografía, palinología, DRx y quimioestratigrafía) la parte superior de la Formación Umir y la basal de Lizama en tres secciones definidas en el sector norte del VMM para establecer criterios en la determinación del límite K/P

Determinar los controles de cambio en el registro sedimentario entre las formaciones Umir-Lizama a través del análisis e interpretación de los diferentes parámetros estratigráficos utilizados en la definición del límite K/P, en el sector norte del VMM, con el fin de conocer las posibles causas de dicho límite.

3. Cuerpo del Trabajo

3.1 Marco Referencial

La historia de la Tierra ha estado enmarcada por una serie de eventos que le han permitido evolucionar junto con sus especies a través del tiempo. Su evolución ha sido producida por procesos propios de su dinámica como la tectónica, el vulcanismo, la eustasia, la orogenia, eventos catastróficos, como impactos meteoríticos, que han generado cambios abruptos y rápidos dentro del planeta. Estos procesos tanto terrestres como extraterrestres que han influido en los cambios del planeta han generado cinco grandes eventos durante los cuales, según los estudios, paleontológicos y estratigráficos, entre otros, muestran que las especies desaparecen generando las llamadas extinciones masivas, dando paso a nuevas que se adaptan al medio y a las condiciones de cambio dadas en el ambiente. La figura 2, es una representación gráfica de las cinco (5) principales extinciones en masa dadas a lo largo de la historia del planeta Tierra, identificadas por Jack Sepkoski y David M. Raup (1982); dichas extinciones corresponden al final del Ordovícico, Devónico, Pérmico, Triásico y Cretácico, siendo esta última la que cuenta con mayores evidencias y estudios y sobre la cual se encuentra el límite K/Pg (Alegret, 2002; Molina, 2007; Pardo *et al.*, 2011; Geosites, 2011; Villasante, 2015).

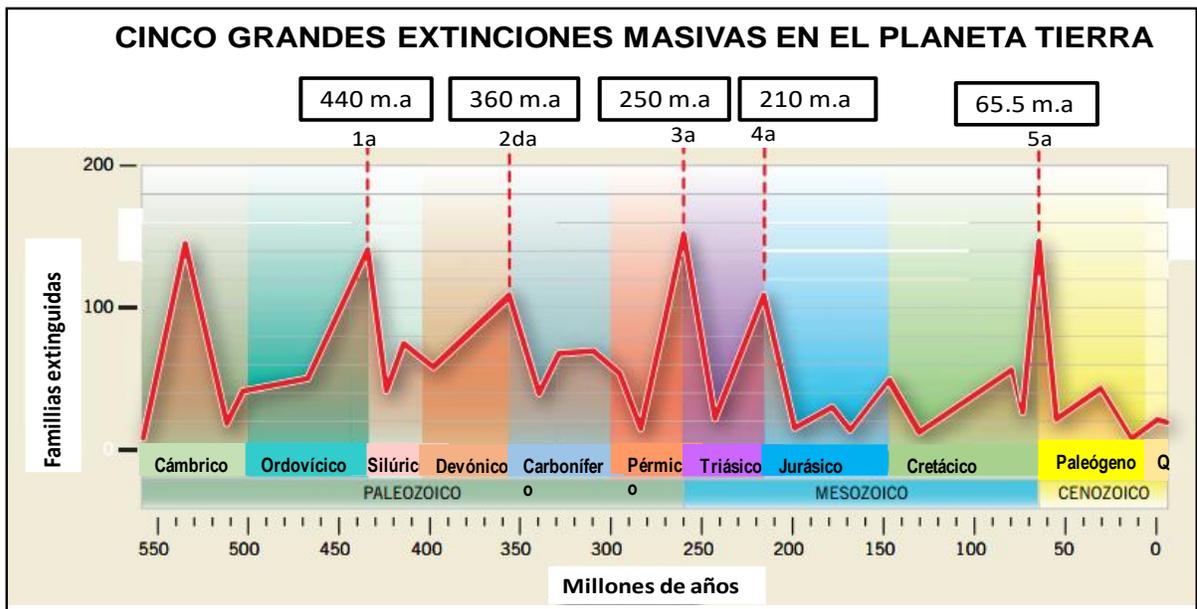


Figura 2. Representación de las extinciones en el planeta, adaptado y modificado de Proyecto Geosites, 2011.

Las teorías más relevantes sobre el límite K/Pg a nivel global, corresponden a la teoría impactista y la multicausal. La primera afirma que la extinción en el K/Pg obedeció a un impacto meteorítico (Álvarez & Álvarez, 1980) y la segunda, cree en el impacto meteorítico, pero no como la principal causa de la extinción en masa, por el contrario, afirma que, las variaciones en el planeta, ocurren por procesos graduales; para el caso, la atmósfera reflejaba cambios por la actividad volcánica y los organismos se estaban extinguiendo, el impacto se genera sobre una atmósfera ya débil (Keller et al., 2007; Pardo, Keller & Adatte, 2011).

El límite K/Pg es la evidencia de uno de los mayores fenómenos de extinción en masa sobre el planeta, se produjo la desaparición del 50% de los géneros y el 75% de las especies, dicha extinción fue probablemente, la consecuencia de diversos eventos, entre ellos, un impacto meteorítico en una atmósfera débil, lo que pudo producir una serie de cambios súbitos y violentos en las condiciones ambientales globales (Spalleti, 2006).

El límite K/Pg, está perfectamente documentado tanto en zonas cercanas al evento como en algunas costas alrededor del mundo, donde de acuerdo con la teoría del impacto meteorítico, se encuentra una capa de arcilla negra o rojiza con microtectitas como en España, Italia, Tunes, Centro América y recientemente en el Pacífico de Colombia (Bermúdez et al., 2015; Bermúdez et al., 2019), dicha capa separa el Cretácico del Paleógeno y puede presentar picos de Ir, una de los mayores indicadores del impacto y del cambio en el tiempo. En la figura tres (3), se presentan los sitios alrededor del mundo donde se han hallado los picos de Ir en el límite K/Pg.

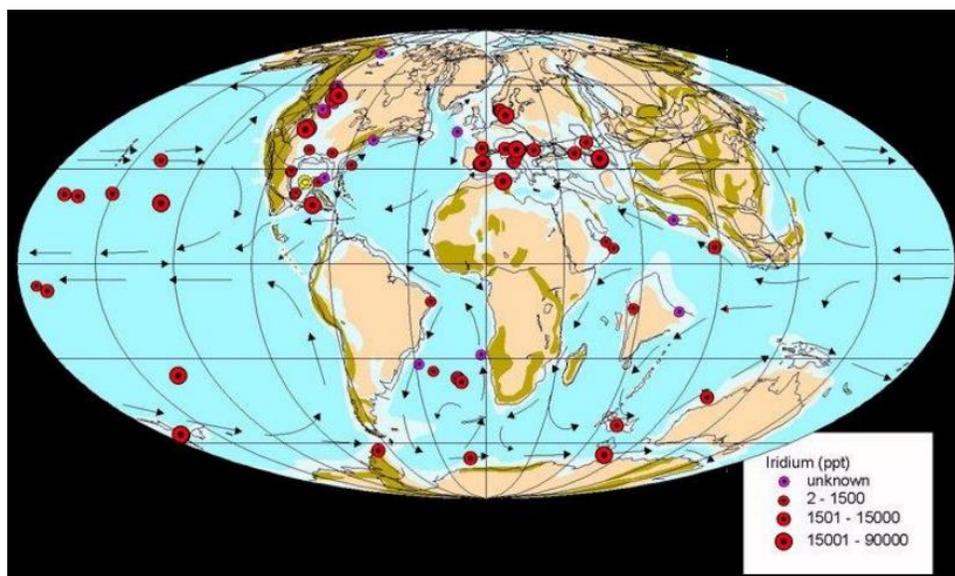


Figura 3. Evidencias de Ir sobre el K/Pg en el planeta. (Villasante, 2015)

El iridio, es un mineral escaso en la corteza terrestre y de los más densos, el cual, junto a los demás minerales pesados, durante el proceso de diferenciación planetaria, se hundió para formar el núcleo. Por lo tanto, la presencia de altas concentraciones sobre la capa de arcilla encontrada en las distintas secciones a nivel mundial, no es algo normal. El Ir, se encuentra en meteoritos condríticos, por eso surge la teoría del impacto meteorítico quien al parecer fue quien dejó sus huellas y pudo causar la extinción masiva, este meteorito, debió tener el tamaño suficiente para dejar en la corteza esas grandes cantidades del mineral (Alvarez & Alvarez, 1980; Arz, Arenillas

& Molina, 2000; Pardo, 2006; Arz *et al.*, 2012, Villasante, 2015). El límite K/Pg se ha identificado en más de 190 secciones alrededor del mundo (figura 4), dicha identificación se caracteriza por encontrar una delgada capa de arcilla oscura o rojiza sobre la cual se pueden observar indicadores como microesférulas de vidrio, cuarzos de choque, espinelas de Ni y grandes cantidades de Ir, 30 veces más del encontrado en rocas cretácicas y paleógenas (Alvarez & Alvarez, 1980, Meléndez, 2008; Pardo, Keller & Adatte, 2011, Bermúdez *et al.*; 2019).

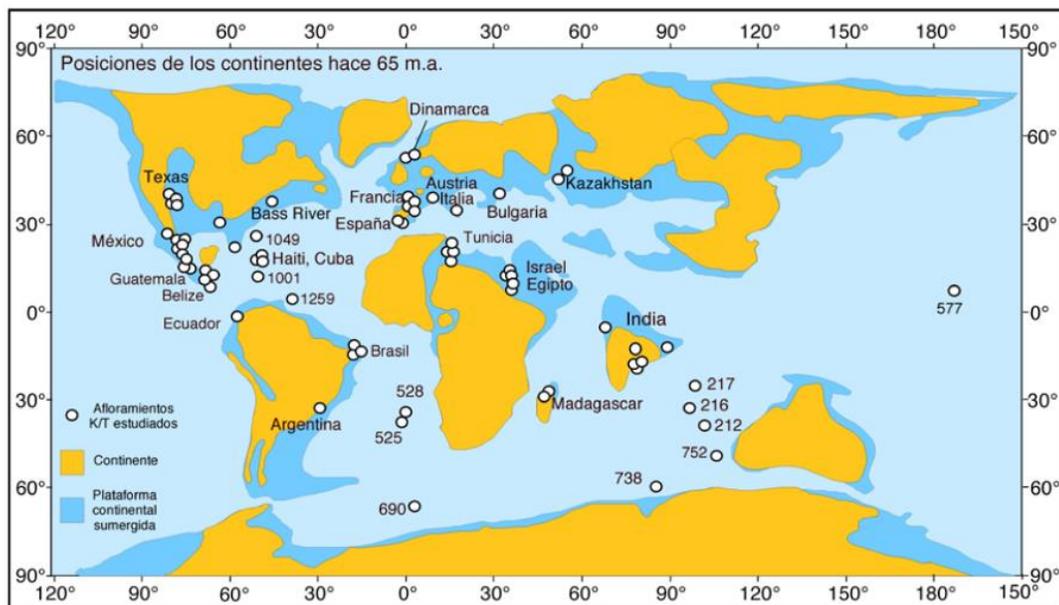


Figura 4. El límite K/Pg alrededor del mundo. (Pardo, Keller & Adatte, 2011)

Otras teorías que apoyan la impactista, tratan de explicar eventos que pudieron suceder como producto de la eyecta, tal es el caso de la teoría impactista-megatsunami, propuesta por Jan Smith. Esta teoría busca explicar ciertas evidencias en zonas cercanas al impacto en México, donde se pueden apreciar por encima de las microtectitas del impacto, una capa de caliza y sobre ella depositada una gruesa capa de arenisca laminada y posteriormente la capa de arcilla con Ir. Para Jan Smith, es claro que al momento del impacto se produce un tsunami, lo que haría que los sedimentos de arena se depositen por encima de las microesférulas, así como la arcilla con Ir. La

extinción se dio en un tiempo corto y de hecho todo lo que ocasionó el impacto, fue una serie de causas proximales que generaron una crisis biológica inmediata y en ningún momento las especies extinguidas lo hicieron de manera gradual, el impacto condujo a los cambios medioambientales, a la crisis biológica y por lo tanto a la extinción en masa y el megatsunami ocasionado por el mismo, ayudó en todo este evento que repercutió a nivel global (Pardo, Keller y Adatte, 2011)

En Sur América el hallazgo del límite K/Pg con los indicadores de alguna teoría antes mencionadas, solo se ha logrado en la zona de la Isla Gorgonilla, en el Pacífico Colombiano, (Bermúdez et al., 2015; Bermúdez et al., 2019), como se observa en la figura 5. El hallazgo está asociado a la teoría impactista, donde se halló la delgada capa de arcillas de 20 mm de espesor, con una acumulación de esferulitas de vidrio, correspondientes a microtectitas y microkristitas bien preservadas, de 1.1 mm de diámetro. De acuerdo con los análisis estas esférulas fueron depositadas en un ambiente marino de aguas profundas, con ausencia de evidencias de bioturbación o de transporte (Bermúdez et al., 2019).

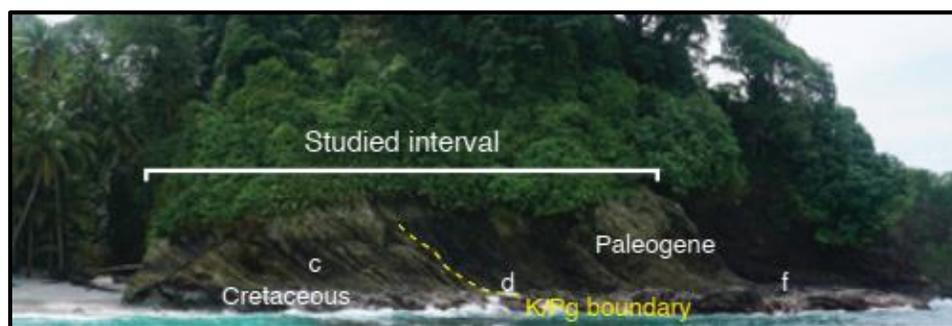


Figura 5. Límite K/Pg Isla Gorgonilla-Colombia. Tomado de Bermúdez et al., 2019

Para las esferulitas tipo microkristitas, determinadas en una capa turbidítica de 2 cm, asociada a la eyecta de Chicxulub en México, se hizo un análisis por XRF, donde se reveló un aumento en los elementos litófilos (Ca, Rb, Sr, Zr) en comparación con las capas infrayacentes y suprayacentes. La capa suprayacente corresponde a limolitas y presenta enriquecimiento de

elementos calcófilos (Cu, Zn) y siderófilos (Mn, Fe y Co) (Bermúdez, 2015). En la figura 6 se observan, en general, las evidencias de tipo petrológico y mineralógico en el límite K/Pg, como son las microesférulas, los cuarzos de choque y las espinelas de níquel (Ni)

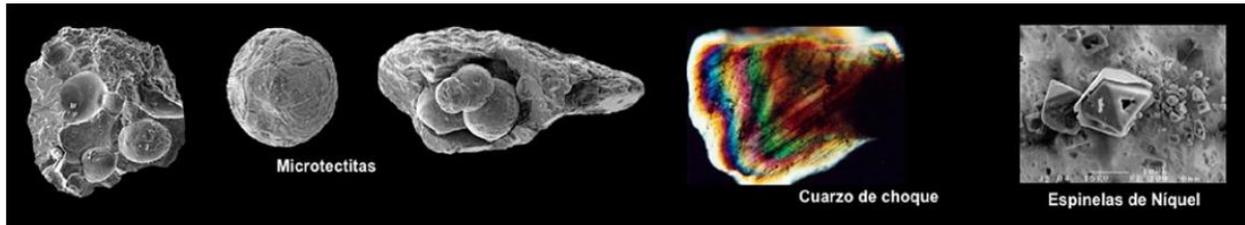


Figura 6. Evidencias petrológicas y mineralógicas en el límite K/Pg. Tomado de Arz et al., 2012

En el resto del país, no se ha contado con igual suerte, lo que hace que el límite se siga tomando basado en análisis palinológico o bioestratigráfico, junto con características sedimentológicas y/o litológicas, teniendo en cuenta la unidad que se deposita a finales del Cretácico y la primera del Paleógeno, (figura 6). Como ya se mencionó, el estudio se realizó en el sector norte del Valle Medio del Magdalena y las unidades geológicas analizadas corresponden a la Formación Umir (Cretácico) y la Formación Lizama (Paleógeno). Cabe aclarar que la primera sección trabajada lleva el mismo nombre la sección del Paleógeno, ya que se ubica en el sitio donde está la sección tipo de esta unidad, cerca de la quebrada La Lizama.

La Formación Umir es una unidad compuesta principalmente por litologías finas de lodolitas y arcillolitas con presencia de carbones que se extiende en el Valle Medio del Magdalena (VMM) (Ward *et al.*, 1973). La Formación Lizama suprayace concordantemente a la Formación Umir y se identifica por el incremento de los niveles de areniscas (Ward *et al.*, 1973). Para el límite Cretácico-Cenozoico se ha documentado la transición entre ambientes marinos a ambientes continentales (Moreno *et al.*, 2011) y se establece que se presentan el cambio del ciclo final

sedimentario marino - transicional para la Formación Umir a un ambiente continental en la Formación Lizama (Tchegliakova, 1993 en Montaña et al., 2016).

Los estratos de la Formación Umir fueron depositados en un ambiente transicional (Tchegliakova, 1993) con influencia marina (Prince *et al.*, 2011). Esta unidad se correlaciona con la Formación Colón-Mito Juan de la cuenca de Catatumbo-Maracaibo (Royero y Clavijo, 2001 en Montaña et al., 2016)

La Formación Lizama fue descrita por Link (Morales, 1958) con un espesor de 1.090 m a 1.225 m sobre la quebrada Lizama, afluente del río Sogamoso, y en el Sinclinal de Nuevo Mundo un espesor de 530 m (Caballero *et al.*, 2010). Esta unidad está compuesta por limolitas abigarradas con intercalaciones de areniscas verdes y pardas, hacia el tope presenta algunas capas delgadas de carbón (Royero y Clavijo, 2001; Caballero *et al.*, 2010). Según Moreno *et al.* (2011) la base está compuesta por areniscas de color café, con lodolitas a arcillolitas y limolitas, y hacia el tope incluye areniscas en capas gruesas con intercalaciones de lodolitas. La unidad presenta un contacto normal y transicional con la Formación Umir que la infrayace; la edad es Paleoceno de acuerdo con análisis palinológicos (Van der Hammen, 1958). La Formación Lizama se ha interpretado como el producto de depósitos continentales, deltaicos (Moreno *et al.*, 2011) y aluviales (Caballero *et al.*, 2010). En la figura 7, se aprecia una columna estratigráfica del Valle Medio del Magdalena (VMM), donde se evidencia el cambio del Cretácico al Paleógeno, en el contacto entre las Formaciones Umir-Lizama.

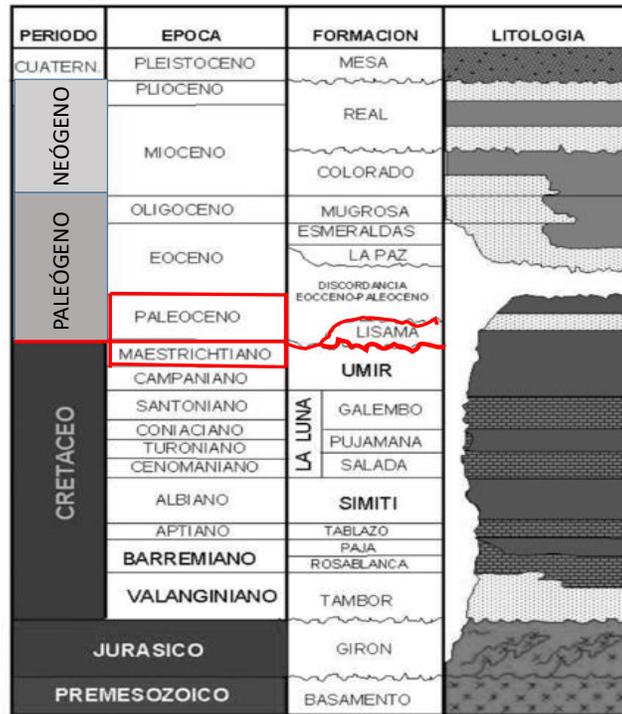


Figura 7. Columna Generalizada Valle Medio del Magdalena (VMM). Modificada de Sarmiento, 2015

Con base en el conocimiento y hallazgo de los indicadores que presenta cada teoría, en el conocimiento de cada Unidad Geológica del área de estudio involucrada en la determinación del límite, en los estudios previos, entre otros, se analizan los métodos a seguir para determinar los criterios estratigráficos más pertinentes en la definición de un rango para el límite K/Pg en el área de estudio. Poder determinar si hay una capa de arcilla, picos de Ir, microtectitas u otro indicador, implica la definición de secciones donde se encuentre el contacto Umir-Lizama y se pueda realizar un muestreo, un trabajo en campo. La no presencia de la delgada capa de arcilla, conduce definir los métodos a seguir en busca de evidencias semejantes a las halladas en otras partes del mundo o aplicando nuevos conocimientos y análisis.

3.1.1 Método. Se parte de la identificación de secciones donde se visualiza el contacto entre las Formaciones Umir-Lizama, para dar inicio a la búsqueda de métodos que aporten información necesaria y oportuna en la determinación del límite K/Pg que, para el área de estudio, no se presenta como en las poblaciones donde se identifica la capa de arcilla con una serie de indicadores de impacto o de vulcanismo. Para ello se considera una metodología distribuida en tres fases y en cada una de estas fases, se escogen los métodos adecuados para la investigación en curso.

3.1.1.1 Construcción del Estado del Arte. La primera fase, hace referencia al análisis temático y especificaciones, se considera inicialmente la búsqueda de información sobre el límite K/Pg, tanto a nivel global como en Colombia, en reportes, informes, artículos, libros, entre otros disponibles al público en general. Para el caso se analizan 65 referencias bibliográficas y dicho análisis permite la construcción del Estado del Arte, teniendo en cuenta básicamente las teorías impactista y multicausal y la evolución de la información al respecto desde los años 70 a nivel global. Es una primera acción que va a permitir el adecuado desarrollo de la investigación. El estado del arte, permite visualizar los métodos que se van a emplear en la obtención de resultados para el análisis e interpretación de dicha información, en la determinación del límite K/Pg. Teniendo clara la información y temática a trabajar, se determina el área de estudio, escogiendo tres secciones para el trabajo en campo y la toma de muestras, como se observa en la figura 1.

3.1.1.2 Trabajo de Campo. Se realizan cuatro (4) visitas a campo, donde se levantan las columnas estratigráficas correspondientes a las secciones de Lizama y Mata de Cacao (Apéndices A), mediante el método de bastoneo, se hace a la par un muestreo sistematizado, se dan descripciones generales de cada muestra y se seleccionan aquellas de interés para aplicar métodos que permitan una mejor comprensión del área de estudio.

3.1.1.3 Palinología. Se seleccionaron siete (7) muestras de la sección Lizama, para análisis palinológico, con el fin de identificar palinomorfos del Cretácico y/o del Paleógeno y obtener un primer rango en la columna estratigráfica, a partir de la datación relativa. Para la sección Mata de Cacao y Rio Sucio, se tomaron los análisis palinológicos desarrollados en Gómez, 2019. La selección de muestras se realiza teniendo en cuenta aquellas muestras que tienen una apariencia oscura o negra, cuyo contenido de materia orgánica (m.o) es apreciable a simple vista.

3.1.1.4 Petrografía. Se lleva a cabo la elaboración de 8 secciones delgadas para análisis petrográfico correspondientes a la sección Lizama. Las ocho secciones delgadas son analizadas con microscopio petrográfico, con el fin de identificar los minerales que pueden estar presentando cambios o alteraciones. Varias de las secciones corresponden a paleosuelos y la presencia de materia orgánica, arcillas, óxidos, sulfuros, sales, entre otros, permiten un análisis sobre la exposición a procesos de meteorización y/o cambios medioambientales asociados quizás a algún evento que haya generado dichos cambios. El informe correspondiente se presenta en Apéndices B. Para las Formaciones Mata de Cacao y Rio Sucio, se toman los resultados de la petrografía realizada por Gómez, 2019.

3.1.1.5 Análisis DRX. Esta técnica es utilizada para combinar y complementar con los estudios de microscopía óptica; es una técnica analítica de alta resolución (Raith et al., 2012) y precisa para la identificación de minerales y/o compuestos cristalinos; permite conocer la composición en términos de fases cristalinas y se realiza de dos formas:

- Roca total o bulk donde se obtiene una descripción global de la mineralogía de la muestra.
- Fracción arcillosa: se refiere al análisis que se hace de la fracción menor de 2 micras, que corresponde a filosilicatos presentes en la muestra (esmectita, illita, caolinita). Se hace un

análisis con 14 muestras que corresponden a paleosuelos en su mayoría con presencia de arcillas, asociadas a procesos de meteorización y cambios medioambientales, de la Sección Lizama. Las muestras se prepararon y analizaron en el laboratorio de Rayos X de la sede Guatiguará de la Universidad Industrial de Santander.

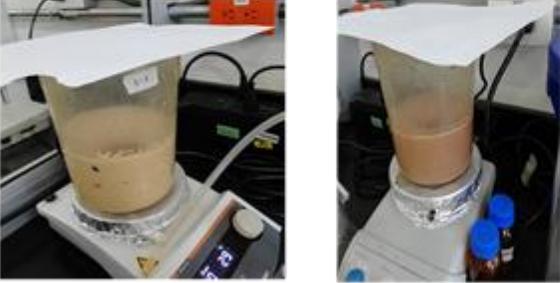
PROCESO EN LA PREPARACIÓN DE MUESTRAS PARA DRX	
<p>1. Se trituraron las muestras de roca en un mortero de acero</p> 	<p>2. Se empaca la muestra triturada. Se seleccionan 100 gramos de cada una para realizar el proceso para DRx.</p> 
<p>3. Los 100 g se depositan en una vasija y se llena de agua hasta aproximadamente 500 ml (vasija marcada) y se lleva a la mezcladora. Se debe cubrir, mientras se hace el proceso para evitar se contamine o se introduzcan impurezas.</p> 	<p>4. Se miden 0,15 gramos aproximadamente de pirofosfato por muestra, se deshace en agua destilada y luego se adiciona a la mezcla anterior.</p> 
<p>5. Durante 40 minutos se mezcla y luego se retira del equipo, se empaca en una probeta, dejando 1000 ml de la muestra. Se agita y se deja en reposo durante 14 horas. Posteriormente se sacan 200 ml en otro empaque para continuar con el proceso.</p>	<p>6. Finalmente, de las muestras trituradas que quedan, se pasa 1-2 gr por tamiz 400 gr para análisis bulk y con la muestra empacada en botellas, se montan las secciones para el segundo tipo de análisis bulk de igual manera:</p>

Figura 8. Preparación de muestras para análisis DRX Guatiguará- UIS.

3.1.1.6 Quimioestratigrafía. La quimioestratigrafía es una rama de la Estratigrafía enmarcada en el ámbito de la geoquímica de rocas sedimentarias en una secuencia estratigráfica, por tanto, implica evaluar las variaciones temporales de las concentraciones de especies químicas y relacionarlas con las condiciones que imperaban en el ambiente de depositación. Estudia las variaciones en una secuencia estratigráfica a partir de atributos químicos tales como: las variaciones en las concentraciones de los elementos mayoritarios, minoritarios y traza, y algunas relaciones interelementales (Pearce et al., 1999). En la figura 9 se observan la clasificación de elementos mayores, menores y trazas.

Elementos mayores: > 1%	SiO ₂ Al ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃ FeO MgO CaO Na ₂ O K ₂ O H ₂ O
Elementos menores: 0.1 - 1% (Usualmente se incluyen con los elementos mayores)	TiO ₂ MnO P ₂ O ₅ CO ₂
Elementos traza: <0.1% Se expresan en ppm (1% = 10,000 ppm)	Rb, Nb, Li, Be, La, Ce, Th, U, etc.

Figura 9 Clasificación de elementos químicos: mayores, menores y trazas. Tomado de Morgado y Bucchi, 2011.

Cada elemento o la relación entre éstos suministran información de algún aspecto en particular sobre las condiciones de sedimentación como, condiciones rédox (Fe, Mn, Ni, S, U, V, Co, entre otros) y cambios de condiciones climáticas (Al, K, Na y Si), así como las quimiofacies que puedan estar presentes en una secuencia estratigráfica (Nieves, 2011).

La quimiofacies se define como el intervalo de la secuencia sedimentaria donde los cambios dentro de un conjunto de atributos químicos evaluados permanecen constantes (Pearce et al.,

1999). Los límites entre dos quimiofacies se encuentran donde ocurran cambios significativos del conjunto de dichos atributos. Estos cambios se basan principalmente en la concentración absoluta de elementos mayoritarios y traza, relaciones interelementales y tendencias geoquímicas sistemáticas que pueden variar a lo largo de la columna estratigráfica y son representadas usando herramientas gráficas. Los atributos químicos mencionados son denominados marcadores quimioestratigráficos, y proporcionan información sobre los cambios notables en los controles geoquímicos, ya sean climáticos, de cambio de fuente de sedimentos, de condiciones rédox, entre otros (Nieves, 2011)

La quimioestratigrafía tiene aplicación en distintas situaciones como:

Análisis de condiciones rédox (óxicos, sub-óxicos y anóxicos): A partir del análisis de los elementos químicos cuya movilidad dependan del potencial óxico-reductor del ambiente de sedimentación, es posible la determinación de las condiciones rédox que prevalecieron durante la depositación del sedimento (Mason y Moore, 1984; Nieves, 2011).

Análisis de procedencia sedimentaria: Para la determinación de la fuente de una roca sedimentaria detrítica, son utilizados los atributos químicos menos afectados por los procesos de meteorización, así como también los menos afectados por los procesos diagenéticos, representando la composición de la roca fuente. Tales elementos son denominados como “inmóviles” e incluyen a los patrones de los elementos de tierras raras. (Piovano et al., 1999; Nieves, 2011).

Análisis de cambios climáticos: Los cambios climáticos durante la depositación, son determinados con el grado de alteración química porcentual en las rocas, denominado Índice de Alteración Química (CIA), el cual permite inferir la intensidad en los procesos de meteorización (Nesbitt y Young 1982). Para ello, los elementos Al, K, Na y Ca son empleados (Nieves, 2011)

El análisis mediante la quimioestratigrafía comprende una correlación quimioestratigráfica, la cual se desarrolla aplicando estadística para establecer los elementos móviles e inmóviles (Fralick y Kronberg, 1997). Se utiliza el método de pares mediante la construcción de una matriz de correlación, al comparar elementos mayores como el SiO_2 , con otros elementos mayores, menores o traza identificados mediante un analizador de Fluorescencia de Rayos X (XRF) (Nieves, 2011; Sánchez y Rodríguez, 2016).

3.1.1.7 Método de Fralick y Kronberg (1997). En el estudio realizado por Fralick y Kronberg, se aplica una propuesta empírica para el análisis de proveniencia de muestras de rocas clásticas sedimentarias de la Provincia Superior de Canadá, usando elementos mayoritarios y traza. Mediante una serie de gráficos llevaron a cabo la prueba de inmovilidad de los elementos químicos, determinando que Al_2O_3 , TiO_2 y Nb son inmóviles y se comportan similarmente al fraccionamiento hidráulico en la que es sometida la fase mineral que lo contiene. Posteriormente, trazaron estos elementos contra las concentraciones de SiO_2 y sugirieron que Al, Ti y Nb son concentrados en la fracción fina. Los autores concluyeron que la construcción de relaciones usando estos elementos químicos inmóviles sirve para determinar proveniencia, ya que debería ser los mismos valores reportados en los sedimentos del material fuente (Nieves, 2011, Sánchez & Rodríguez, 2016).

Para la determinación de los elementos inmóviles se buscan los elementos químicos que posean buena correlación entre ellos debido a su potencial iónico (Railsback, 2003 en Sánchez & Rodríguez, 2016).

3.1.1.8 Analizador de Fluorescencia de Rayos X (XRF). Corresponde a una herramienta analítica no destructiva de rápida adquisición y manejo de datos sobre cortes, núcleos, muestras de mano o afloramientos, brindando información en tiempo real y con una precisión cercana a la brindada por técnicas convencionales destructivas como el ICP-MS. Mediante esta técnica, el equipo detecta hasta 32 elementos mayores (Al, Ca, Fe, K, Mg, Mn, P, Si y Ti) así como elementos menores y trazas (Ag, Ba, Be, Bi, Cd, Ce, Co, Cr, V, Cu, Mo, Nb, Pb, Rb, Sr, U, Y, Zn, Zr), como se observa en la figura 8. (Gems, 2014; Smith, 2010; Minerlab, 2019).

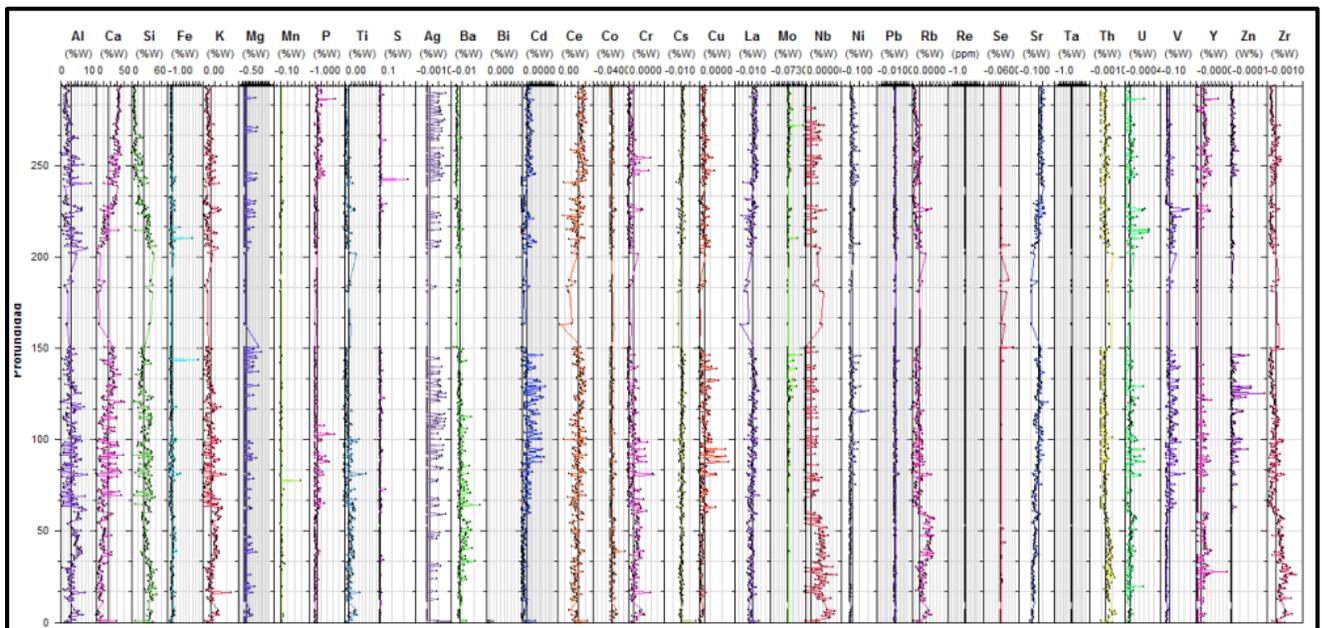


Figura 10. Distribución de elementos mayores, menores y trazas. Tomado de Gems, 2014

Una vez se tiene la composición elemental, se puede cuantificar estequiométricamente la concentración de los principales óxidos presentes en cada una de las muestras analizadas, pudiendo obtener, por ejemplo, porcentajes de MgO, Al₂O₃, SiO₂, K₂O, CaO, TiO₂, Cr₂O₃, MnO, Mn₃O₄, Fe₂O₃, NiO, CuO, ZnO, PbO, entre otros.

El analizador de Fluorescencia de rayos X, tiene diversas aplicaciones de uso, puede detectar igualmente indicadores geoquímicos relacionados con la presencia de elementos rédox sensibles

como son, V, Cr, U, Th, Mo, Re, Ti, K y Mn. Al determinar las concentraciones de U, Th y K, se pueden estimar los índices de radiactividad de la roca o suelo. Para esta investigación, se determinan los elementos mayores, menores y trazas y se aplican los métodos descritos en el anterior numeral (Gems, 2014; Smith, 2010; Minerlab, 2019).

3.1.2 Resultados. A continuación, se presentan los resultados obtenidos de acuerdo a la metodología y métodos planteados y especificados anteriormente. Se sigue el mismo orden en que se presentó anteriormente. Dichos resultados se presentan a través de figuras, gráficos, fotografías, dibujos, tablas, estadística, entre otros. Dentro de los resultados no se incluyen todos los análisis realizados, especialmente en la parte de quimioestratigrafía, esta parte va en los apéndices.

3.1.2.1 Construcción del Estado del Arte. Este primer paso se hace en dos etapas, una relacionada con la información existente sobre el límite K/Pg a nivel global y la segunda, el análisis de la información existente para el VMM en cuanto al límite se refiere de igual manera.

Para el análisis de información a nivel global, se construye un artículo de Estado del Arte, de igual manera parte de la información ha sido puesta en este documento con sus respectivas referencias.

A nivel local, para el área de estudio se tienen los principales estudios:

Tchegliakova, N., 1993 realiza un estudio de la sección Umir en la Quebrada La Julia, con un espesor de 255 m, en el anticlinal de la Tigra, VMM. La estructura física predominante en la sección es laminación ondulada y flasher. Se toman 20 muestras en campo para análisis microfaunística, especialmente, foraminíferos y minerales autigénicos. Al realizar la observación de las muestras, 8 de ellas no presentan microfauna, por lo tanto, el trabajo se realiza con las 12 muestras restantes.

Se hizo recuperación de microfauna por el método varsol-agua y estimación de minerales autigénicos, analizando los restos de muestras, para ello se hizo conteo de granos de cada uno de los principales tipos de minerales autigénicos presentes, posteriormente se calculó el porcentaje correspondiente a cada uno.

En el análisis de foraminíferos se encontraron 1918 ejemplares de foraminíferos, correspondientes a 17 especies, de las cuales el 99% correspondían a formas aglutinadas, de igual forma, se observó presencia de algas calcáreas a la base.

Dentro de los minerales autigénicos encontrados está la siderita, presente en toda la sección, agregados no muy compactos de granos elongados de carbonatos sin orientación y con un tamaño entre 0.09 y 0.25 mm.

La pirita se observa en las 7 primeras muestras entre un 18% y 30%, en las siguientes 5 muestras no se observó, por el contrario, hacia la parte terminal de la sección, aumenta la presencia de siderita y m.o. Este estudio, el análisis de la microfauna y la asociación de minerales autigénicos, permite reconstruir o conocer el ambiente donde probablemente vivieron las asociaciones de microfósiles recuperados.

La abundante presencia de pirita en buena parte de la sección sugiere una gran biomasa bacterial en el ecosistema capaz de degradar la m.o., soportando la idea del alto dinamismo en la productividad orgánica primaria y observando que los ambientes en que hoy están bajo estas condiciones, es propio de ambientes transicionales como lagunas costeras y estuarios. Este trabajo nota la presencia conjunta de materia orgánica (m.o) y explica el conjunto de m.o y pirita.

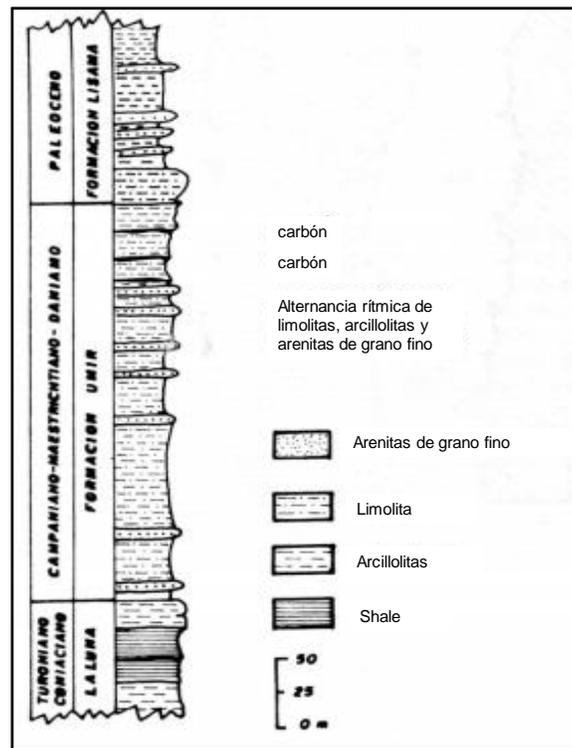


Figura 11. Secuencia parcial del Cretácico, Quebrada la Julia. Edades tomadas de Ward et al., 1973; Morales, 1958; Van der Hammen, 1990 en Tchegliakova, 1993.

En el documento desarrollada por Lozano y Zamora, 2014 para el Servicio Geológico, se presenta una compilación de la información geológica en general (estratigrafía, tectónica, elementos estructurales, geofísica y sistema petrolífero), presentando los rasgos más importantes desarrollados por diferentes autores. Aquí se presenta una síntesis de la evolución estratigráfica y tectónica de la cuenca. Afirma que la cuenca ha pasado por una “evolución intra-arco con el levantamiento de la cordillera central, una cuenca ante-arco con la finalización del levantamiento de la misma cordillera y una cuenca intra-montana con el levantamiento de la cordillera Oriental”. De acuerdo son Sarmiento, 2011, los diferentes procesos tectónicos la han afectado, dando origen a los sistemas de fallas de La Salina, Guaicaramo y Soapaga.

De acuerdo con este informe y basado en Gómez, 2001, en el Cretácico Tardío y al oeste de Colombia, se produce un choque de la corteza oceánica con el continente, lo que trae como

consecuencia unos esfuerzos compresionales que ayudan al levantamiento de la cordillera central y dan origen a una megasecuencia ante-arco. Dichos esfuerzos migran hasta la cuenca del VMM invirtiendo las fallas normales existentes, dividen la megacuenca de ante-arco en Llanos Orientales y la cordillera Oriental y al final del Cenozoico se consolida la cuenca intramontana del VMM.

En cuanto a la sedimentación y basado en Sarmiento, 2001, se afirma aquí que, la depositación de las formaciones se inician en la cuenca, al final de la primera parte del Mesozoico, con ambientes continentales, luego pasa a marinos en la segunda parte del Mesozoico y finaliza con sedimentos continentales en el Cenozoico. La secuencia depositada en el Campaniano al Maastrichtiano corresponde a la Formación Umir y la que corresponde al Paleoceno Temprano es la Formación Lizama, pasando de un ambiente marino a uno continental.

En Sarmiento, Puentes & Sierra, 2015, trabajo denominado Evolución Geológica y Estratigrafía del Sector Norte del Valle Medio del Magdalena, se aclara la separación del Valle Medio del Magdalena en sector norte y sector sur, de acuerdo a las características geológicas que se presentan. El sector norte a su vez se divide en dos áreas de estudio bien definidas, especificando que el sistema de fallas de la Palestina es quien define el límite occidental de la zona norte, teniendo en cuenta la Serranía de San Lucas con unos rasgos estratigráficos particulares, siendo esta parte la más occidental de la Cordillera Oriental, sobre la cual se acumulan discordantemente los sedimentos cretácicos del VMM. Se puede entonces, tomar el sector norte, como la Serranía de San Lucas y la zona del Sinclinal de Nuevo Mundo (SNM). Es en el sector norte del VMM donde se inicia la sedimentación cretácica al Barremiano más inferior y la actividad ígnea desaparece, migrando esta hacia el occidente. La parte del SNM, es donde se va a identificar la exposición clara de las rocas del Cretácico y Cenozoico, se pueden apreciar contactos y sus efectos. En este

sinclinal se pueden apreciar rocas desde el basamento y en él se puede caracterizar la estratigrafía del Cretácico al Neógeno, en el flanco E de la cuenca.

En cuencas como el VMM, las evidencias del límite cambian y puede obedecer a causas generadas por el mismo impacto representadas en cambios climáticos y eustáticos, erupciones volcánicas y causas tectónicas. Se debe tener en cuenta la compleja evolución de la cuenca (Caballero, 2010; Lozano y Zamora, 2014; Sarmiento, Puentes & Sierra, 2015), por lo tanto, las variaciones que se han podido presentar a partir del fin del Cretácico, con cambios marcados en las paleocorrientes, indicando variación en el área de aporte de sedimentos por el levantamiento de la Cordillera Central y una transición de sistemas de depósito marinos a no marinos, observados en la formación Lizama (Moreno et al, 2011). Se afirma que la formación Umir es de edad Maastrichtiano para la parte media y superior con base en la asociación palinológica. Ya para la Estratigrafía del Paleógeno, se afirma que la formación Umir es la última unidad cretácica del VMM y es la formación Lizama que suprayace a Umir será la base del Paleógeno (Gómez, 2001; Lozano & Zamora, 2014; Sarmiento, Puentes & Sierra, 2015)

Montaño et al, 2016, con su trabajo, análisis de secuencias y procedencia en sucesiones sedimentarias de grano fino: un ejemplo de la Formación Umir y base de la formación Lizama, en el sector de Simacota, hace un estudio en el contacto de Umir Lizama, buscando definir parámetros que permitan identificar el Cretácico del Paleógeno.

Se hace un análisis con estratigrafía de secuencias, palinología y procedencia, realizando la correlación estratigráfica de cuatro pozos perforados en el área de Simacota en el VMM, identificando 5 superficies de inundación en la formación Umir y una a la base de la formación Lizama. Se afirma aquí que la base de la formación Lizama registra el desarrollo de Paleosuelos y sucesiones de relleno de canal interrumpido por un intervalo de sucesión marina, cuyo origen

puede obedecer a eventos catastróficos. Estos estudios, las metodologías y análisis serán tenidos en cuenta para esta propuesta, donde se involucran técnicas que en los anteriores no se han realizado como la Quimioestratigrafía.

Rodríguez J, 2018, de la Universidad Nacional, hace un análisis de procedencia a los líticos presentes en la formación Umir y Lizama, en la zona de Río Sucio en el norte del VMM, mediante petrografía a 25 secciones delgadas. Se hace revisión a la procedencia de líticos, siendo más metamórficos en la formación Lizama y hacia el contacto Umir Lizama, más volcánicos.

Gómez, J., 2019, desarrolla su tesis de grado denominada, caracterización geoquímica y mineralógica del límite Cretácico-Paleógeno en el flanco Oriental del SNM, Lebrija, Santander. Es un trabajo de investigación en el límite Cretácico-Paleógeno en el sector norte del VMM, con análisis de campo y laboratorio. Se trabajó en dos secciones, el contacto definido en el sector de Río Sucio y en la zona denominada Mata de Cacao. Es una tesis trabajada en colaboración con Ecopetrol, donde se levantaron columnas en campo, se describieron muestras, se analizaron 16 secciones en petrografía, se hizo DRx y con los resultados de este último proceso, se determinó una quimioestratigrafía general, respecto al límite K-T. De igual forma, se trabajó palinología, con el fin de complementar los resultados de petrografía y DRx, y tener una mayor claridad del tope Umir-Lizama, en el límite K-T.

3.1.2.2. Trabajo de Campo. Se realizaron 4 salidas de campo con el fin de reconocer en primera instancia las secciones a levantar y analizar, posteriormente a desarrollar como tal el trabajo de levantamiento y muestreo. Se visitaron tres secciones como ya se mencionaron, sección Lizama, sección Mata de Cacao y sección Río Sucio. Se levantó columna estratigráfica y se hizo muestreo en la primera y segunda sección, para la tercera se hizo el reconocimiento y se trabajó sobre la columna y muestras recolectadas en el trabajo de Gómez, 2019. Las columnas se presentan de manera completa, junto con el registro fotográfico en el Apéndice A. A continuación, se presenta en síntesis las apreciaciones en campo, fotografías y columnas levantadas.

3.1.2.2.1 Sección La Lizama. Se hace levantamiento de columna estratigráfica (figura 13).

Coordenadas: X: 1.059.379 Y: 1.281.100

Z: 161,77m

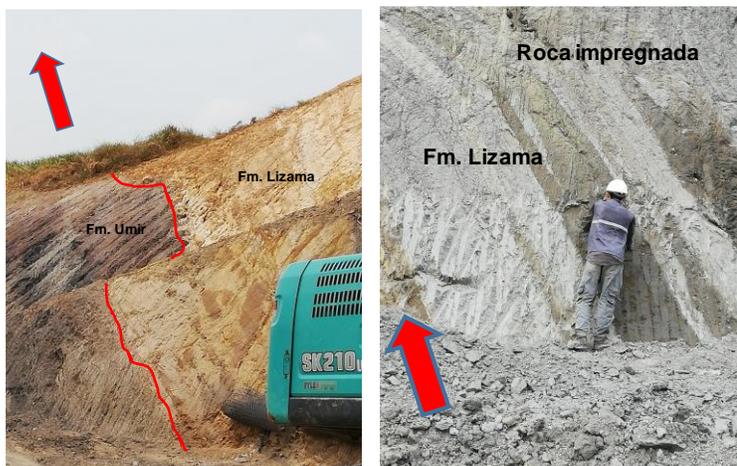


Figura 12. Sección Lizama. Ruta del Cacao, zona de La Lizama entre Bucaramanga- Barrancabermeja

Se visualiza el contacto entre las Formaciones Umir-Lizama, en la zona de estudio sobre talud de trabajos en la ruta del Cacao. Se pueden observar paleosuelos, presencia de arcillas, areniscas muy finas y lodolitas. Los colores varían entre blanco, tonos grises, morados y rojizos. En la parte superior de la Formación Umir los paleosuelos se encuentran mezclados

con m.o, esta es la zona de contacto con la Formación Lizama. En esta última se encuentran arenas con bitumen y vertederos de hidrocarburo (fig.10)



Figura 13. Contacto Umir-Lizama. Presencia de paleosuelos, arcillas abigarradas y m.o (A). Arenas con impregnación de hidrocarburo (B)

Los paleosuelos son abundantes hacia la zona del contacto entre las Formaciones Umir-Lizama, lo que hace difícil observar alguna delgada capa de arcilla como en gran parte de las secciones del planeta para el límite K/Pg, ya que allí hay una mezcla de arcillas abigarradas con m.o y presencia de hidrocarburo (hc).

Para el levantamiento de columna estratigráfica, se tomaron los datos de rumbo y buzamiento al inicio del afloramiento en el punto con coordenadas:

X: 1.059.379 Y:1.281.100 Z:161.77msnm

Rumbo/buzamiento: N5W/37SW

El levantamiento de la columna estratigráfica se realizó con el bastón de Jacob. Se hicieron 43 medidas cada 1.5 m, para un espesor total de la columna de 64,5 m. En la figura 11, se aprecia marcado en color rojo la evidencia de alguno de los bastones que se llevaron a cabo. De igual manera, se tomaron 14 muestras para análisis de laboratorio.



Figura 14. Método de bastoneo para levantamiento de columna estratigráfica.

El último punto de bastoneo, punto 43, equivalente a 64,5 m, en la zona de la Formación Lizama, allí se aprecian arenas de grano medio, con laminación plana e impregnadas de bitumen. A continuación en la figura 11 se aprecia la columna levantada y en el Apéndice A, se encuentra como tal dicha columna y sección fotográfica de la sección, aquí se hizo un análisis del límite K/Pg desde el punto de vista litológico, como se aprecia en la figura 14, donde se aprecia que el límite correspondería a los 31,5 m de columna levantada, donde se da el contacto entre Umir y Lizama. Este sería la primera determinación, con las observaciones hechas en campo, la descripción de muestras la caracterización existente para cada Formación.

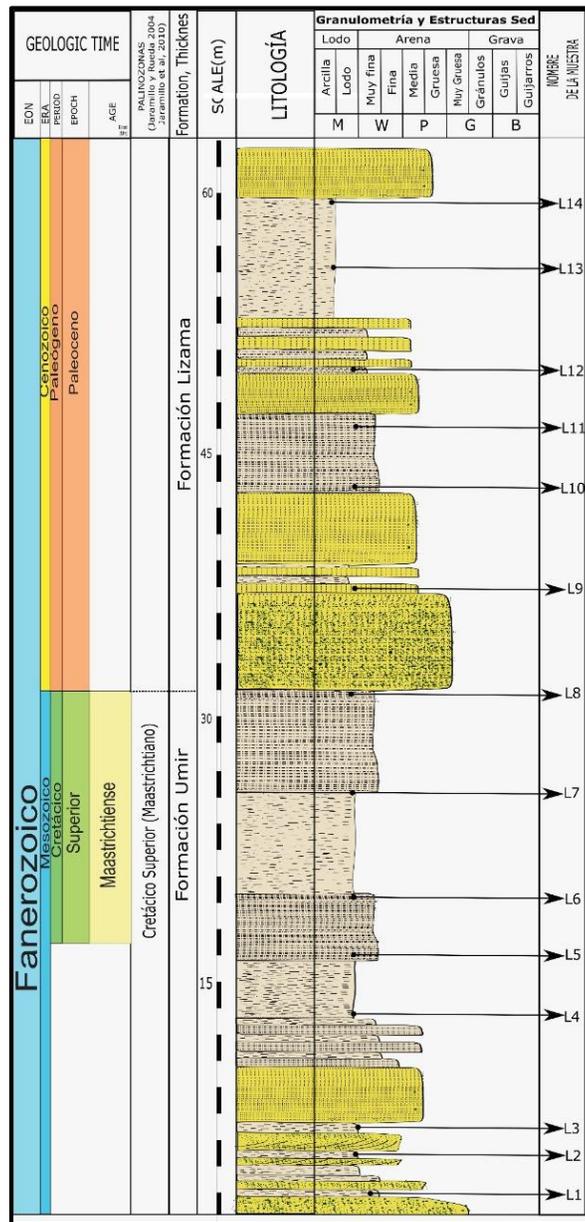


Figura 15. Columna Estratigráfica de la Sección La Lizama.

En la tabla 1, se presenta el resumen del trabajo de selección de muestras que se realizó para esta sección, presentando las muestras seleccionadas para el análisis por cada método. Para la determinación de elementos por Fluorescencia de Rayos X, se realizaron dos lecturas, la primera se hizo a todas las muestras y la segunda solo a las seleccionadas teniendo en cuenta el análisis realizado para establecer el rango del K/Pg.

Tabla 1. Selección de muestras para análisis en laboratorio, Sección La Lizama.

MTRA	PALINOLOGÍA	PETROGRAFÍA	DRX	XRF		DESCRIPCIÓN
				1A LECTURA	2DA LECTURA	
L1		X	X			Areniscas gruesas a finas de color gris
L2		X	X			Lodolita con presencia de granos gruesos hacia los bordes
L3		X	X			Lodolita con laminación cruzada
L4			X		X	Paleosuelo: moteado, abigarrado
L5	X		X	X	X	Lodolita carbonosa
L6	ESTERIL	X	X	X	X	Lodolita carbonosa
L7	ESTERIL		X	X	X	Arcilla moteada, con óxidos de hierro
L8	X	X	X	X	X	Lodolita carbonosa con huellas de raíces
L9	X	X	X	X	X	Arenisca de grano fino con arcilla
L10			X		X	Paleosuelo: agradacional
L11	X	X	X	X		Paleosuelo: agradacional
L12	X		X	X		Lodolita de color gris
L13	X		X	X		Arcilla orgánica pedogenizada
L14	X	X	X	X		Arcilla orgánica pedogenizada

Nota: El número total de muestras para esta sección fue de 14, inicialmente se tomaron 9 para palinología, sin embargo, dos de ellas (L6 y L7) fueron estériles para este análisis. 8 secciones para petrografía, a todas se les realiza DRX, la primera lectura de XRF se hace a 9 muestras y en la segunda a 7 muestras. De igual manera se presenta una breve descripción de cada una de las muestras.

A partir de los datos de campo, se hace la primera ubicación del límite K/Pg, de acuerdo a las características litológicas, lo que se aprecia en las columnas estratigráficas, donde se toma, el cambio de Mesozoico a Cenozoico (Cretácico a Paleógeno), por variación litológica, características sedimentológicas observadas en terreno. En la figura 14 se aprecia, la división, ubicando a los 31, 5 m de columna levantada el cambio de Formación, el contacto entre las Formaciones Umir-Lizama.

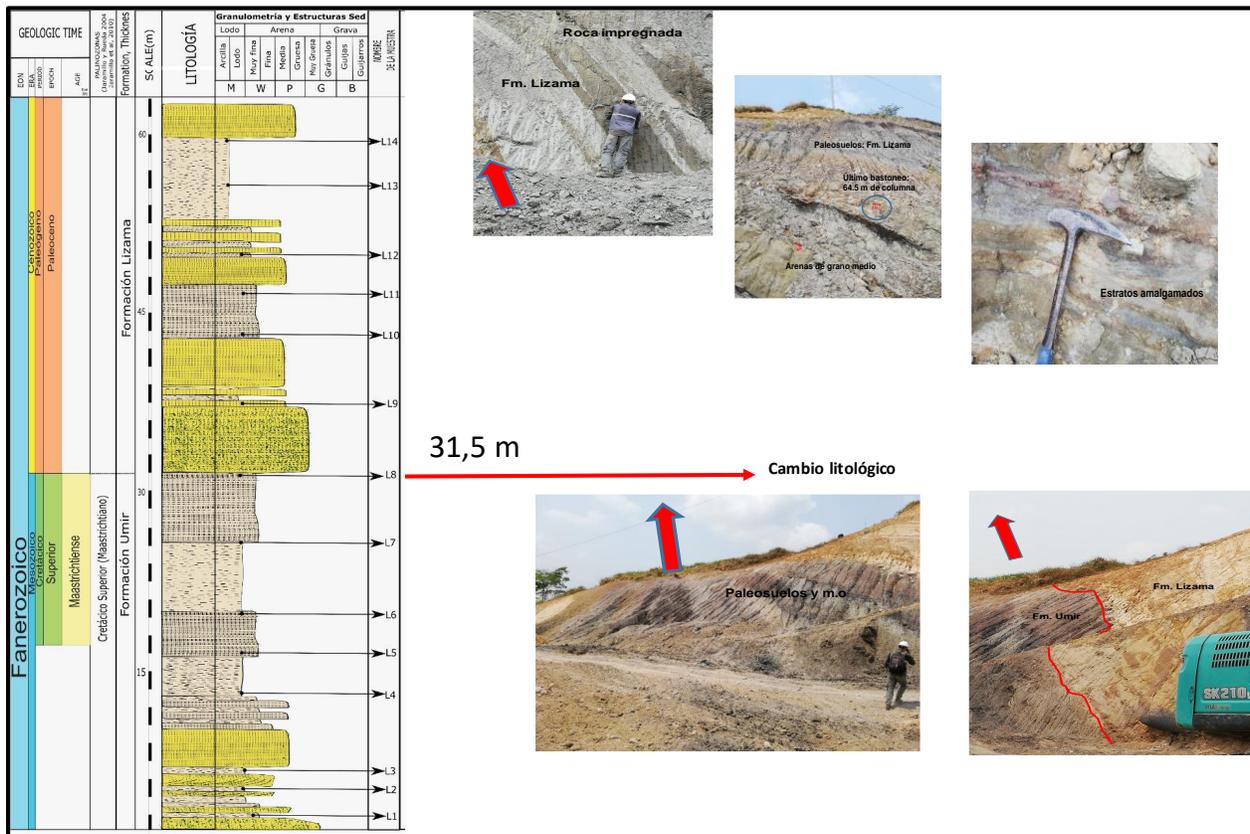


Figura 16. Ubicación del Límite K/Pg en la Sección Lizama, según análisis de campo.

3.1.2.2.2 Sección Mata de Cacao (MTC). Se tomaron 46 muestras en campo para análisis con XRF. La petrografía, Drx y palinología se tomó de Gómez, 2019. En una primera lectura se determinaron elementos mayores, menores y traza a las 46 muestras y en la segunda lectura se escogieron 13 a las cuales se les repitió el análisis, verificando y comparando datos para una mayor precisión en los resultados. Las muestras se organizan de base a techo de acuerdo con la columna levantada, siendo la muestra MTC-46 la tomada en la Formación Umir (base) y MTC-1 en el techo, Formación Lizama, como se observa en la tabla 2. De igual manera, la columna se levanta mediante bastoneo.

Coordenadas para levantamiento de columna:

Inicial: X: 1.078.275,546 Y: 1.278.576,295 Z: 738 msnm

Final: X: 1.078.436,235 Y: 1.278.783,294



Figura 17. Sección Mata de Cacao sobre la vía a Barrancabermeja

Cabe destacar la presencia de mantos de carbón en esta sección, tanto para la Formación Umir como para Lizama. El muestreo para este estudio se inicia a los 191,5 m (basados en la columna que levantó Gómez, 2019). Se inicia con estratos de areniscas de grano fino con materia orgánica, moscovita y sulfuros; se toman 46 muestras en puntos que no habían sido muestreados.



Figura 18. Paleosuelos en la sección Mata de Cacao.

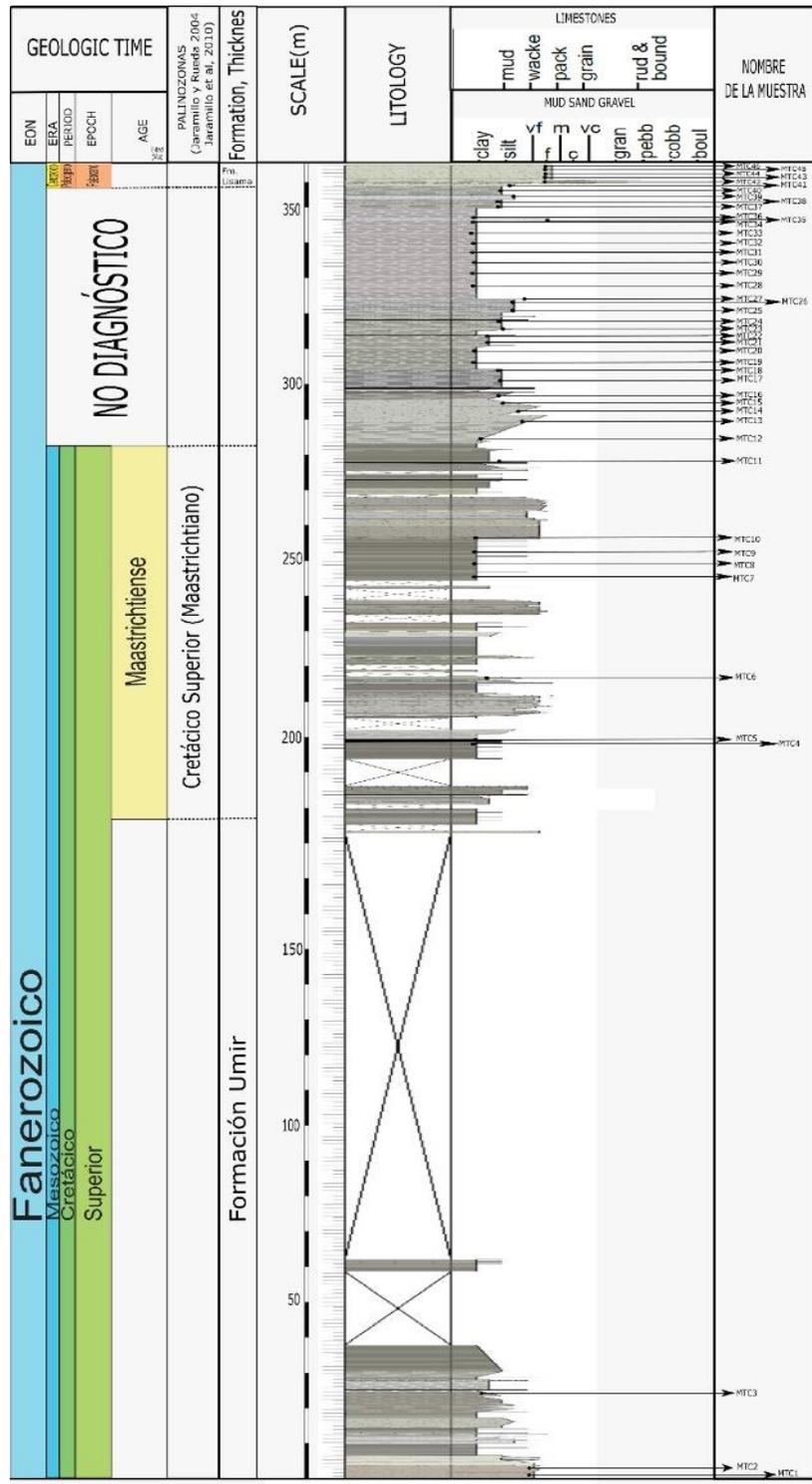


Figura 19. Columna Estratigráfica de la sección Mata de Cacao. Vía Bucaramanga-Barrancabermeja.

Tabla 2. Selección de muestras para análisis en laboratorio, sección Mata de Cacao

MTRA	XRF		DESCRIPCIÓN GENERAL
	1A LECTURA	2DA LECTURA	
MTC-46	X		Arenisca de grano fino con láminas de lodolita rica en m.o
MTC-45	X		Arenisca de grano fino con lentes de carbón
MTC-44	X		Lodolita arcillosa gris
MTC-43	X	X	Arcillolitas ricas en m.o y presencia de carbón
MTC-42	X	X	Shale gris con laminación plano paralela
MTC-41	X	X	Arenisca muy fina en matriz lodosa
MTC-40	X	X	Shale gris con laminación plano paralela y lentes de arenisca fina
MTC-39	X	X	Shale gris con laminación plano paralela
MTC-38	X		Shale gris con laminación plano paralela y lentes de arena fina
MTC-37	X	X	Lodolita con intraclastos de arenisca fina
MTC-36	X		Lodolita gris con m.o
MTC-35	X	X	Lodolita gris grano creciente a arenisca fina
MTC-34	X		Lodolita gris laminación plana paralela granocreciente a arenisca fina
MTC-33	X		Arenisca gris verdosa con moscovita
MTC-32	X		Arenisca con laminación lenticular en matriz de arenisca lodosa
MTC-31	X		Lodolita gris con m.o y laminación plano paralela
MTC-30	X		Lodolitas oscuras con m.o
MTC-29	X		Lodolita negra grisácea con presencia de m.o
MTC-28	X		Paleosuelo de color gris
MTC-27	X	X	Paleosuelo de color gris
MTC-26	X		Paleosuelo de color gris y con m.o
MTC-25	X		Manto de carbón con presencia de azufre
MTC-24	X		Lodolita abigarrada y presencia de arcilla
MTC-23	X		Paleosuelo grisáceo y rojizo con m.o
MTC-22	X	X	Lodolita grisácea con m.o
MTC-21	X		Paleosuelo gris a rojizo
MTC-20	X		Arenisca calcárea de grano fino
MTC-19	X		Paleosuelo abigarrado
MTC-18	X	X	Paleosuelo gris a rojizo
MTC-17	X		Paleosuelo abigarrado
MTC-16	X		Paleosuelo abigarrado
MTC-15	X	X	Paleosuelo abigarrado
MTC-14	X		Paleosuelo rojo, blanco y púrpura
MTC-13	X		Paleosuelo abigarrado
MTC-12	X	X	Arenisca de grano fino a medio calcárea, con glauconita
MTC-11	X	X	Paleosuelo abigarrado
MTC-10	X		Lodolita gris oliva con óxidos
MTC-9	X		Lodolita gris oliva con óxidos
MTC-8	X		Arenisca de grano fino con pirita
MTC-7	X		Lodolita gris oliva con óxidos
MTC-6	X		Arenisca grano fino con pirita
MTC-5	X		Conglomerado en matriz de arena media a gruesa, con moscovita
MTC-4	X		Arenisca de grano medio con moscovita
MTC-3	X		Arenisca de grano medio con moscovita
MTC-2	X		Arenisca de grano medio con moscovita
MTC-1	X		Arenisca de grano medio

Nota: Se toman 46 muestras para análisis, sin embargo, se eligen las muestras de acuerdo a las observaciones hechas, se eligen 13 muestras que pueden estar en el rango del K/Pg en la sección.

A continuación, se presenta el análisis de campo y la ubicación del límite en la columna levantada de acuerdo a la litología y características sedimentológicas, al igual que en la sección Lizama.

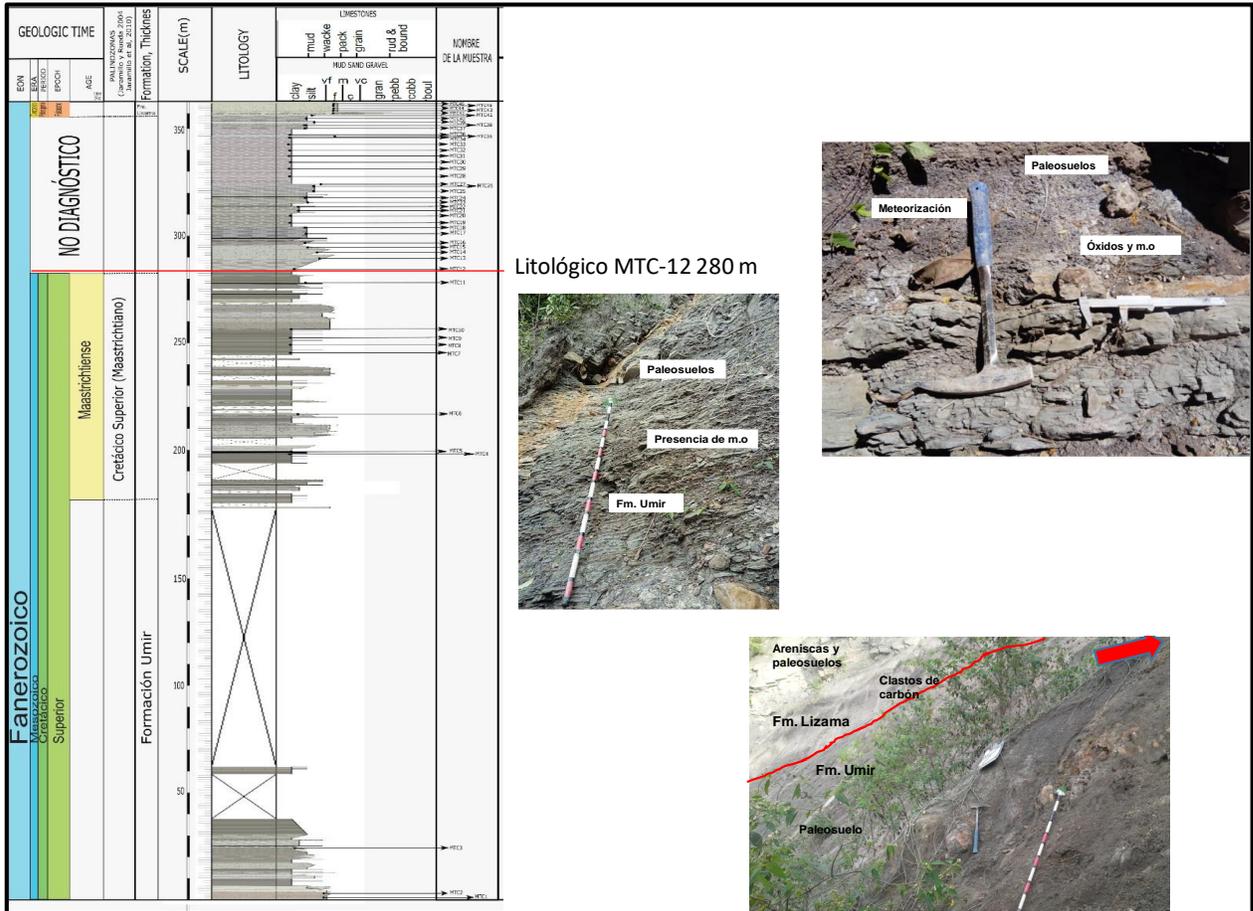


Figura 20. Ubicación del Límite K/Pg en Mata de Cacao según análisis de campo.

3.1.2.2.3 Sección Rio Sucio (RS). Se visitó la zona para la verificación de coordenadas y revisión del sitio de muestreo lo que permitió decidir trabajar sobre las muestras existentes de la zona, el análisis petrográfico, DRX y palinológico, realizado por Gómez, 2019, resaltando que, a 10 muestras de dicho trabajo, se les aplica el método XRF, para análisis elemental y quimioestratigráfico.

Las coordenadas de esta sección son:

X: 1.082.473,063 X: 1.290.272,810 Z: 390 msnm

Se toma la columna levantada por Gómez, 2019, vista como anexo No. 1 a este trabajo.

Tabla 3. Selección de muestras para XRF en la sección Rio Sucio

MTRA	QUMIOESTRATIGRAFÍA
	UNA LECTURA
MT-E9.3	X
MT-E9.4	X
MT-E9.5	X
MT-E9.6	X
MT-E9.7	X
MT-E10.1	X
MU-E4	X
MU-E5	X
MU-E6	X
MU-E7	X

Nota: Se seleccionan 10 muestras teniendo en cuenta observaciones y descripciones de las mismas, así como se analiza el contacto Umir – Lizama para determinar el límite K/Pg con criterios litológicos y sedimentológicos.

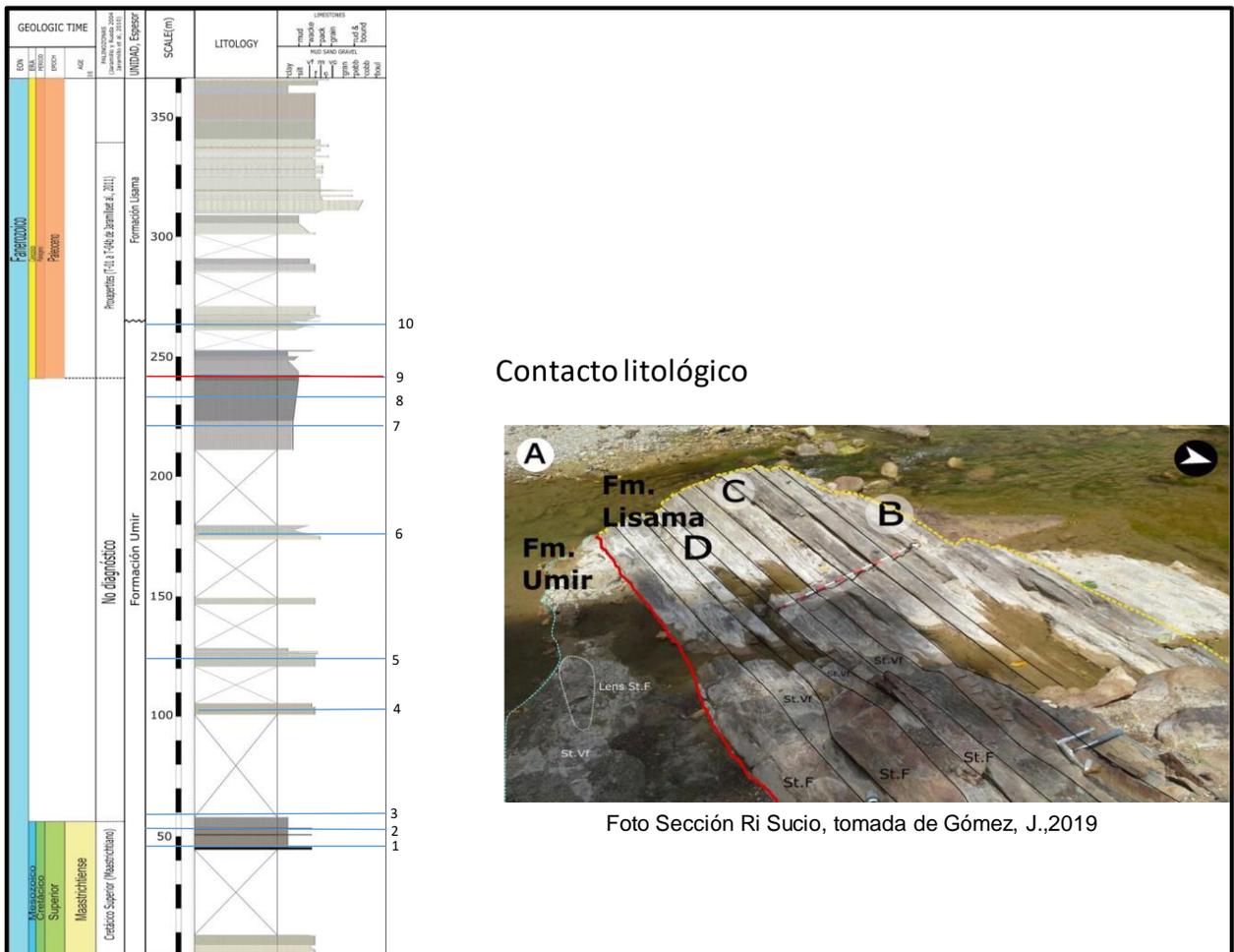


Figura 21. Ubicación del límite K/Pg, sección Rio Sucio según análisis de campo. Modificada de Gómez, 2019

De acuerdo con el análisis establecido, se toma el contacto litológico Umir – Lizama a los 250 m de columna levantada aproximadamente, teniendo en cuenta el contacto entre las Formaciones Umir y Lizama.

3.1.2.3 Palinología. A continuación, se presentan los análisis generales de la palinología realizada a las muestras de la Sección Lizama, teniendo en cuenta los palinomorfos encontrados, como se indica en la figura 20.

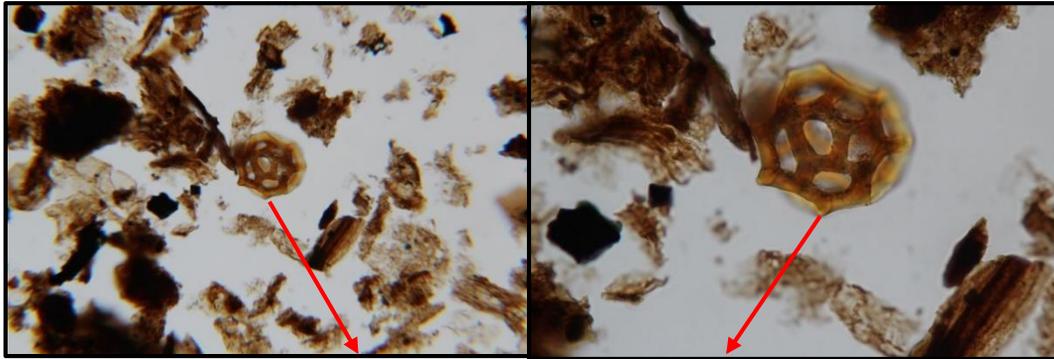


Figura 22. Palinomorfo del Cretácico- Maastrichtiense, *Buttinia Andreevi*.

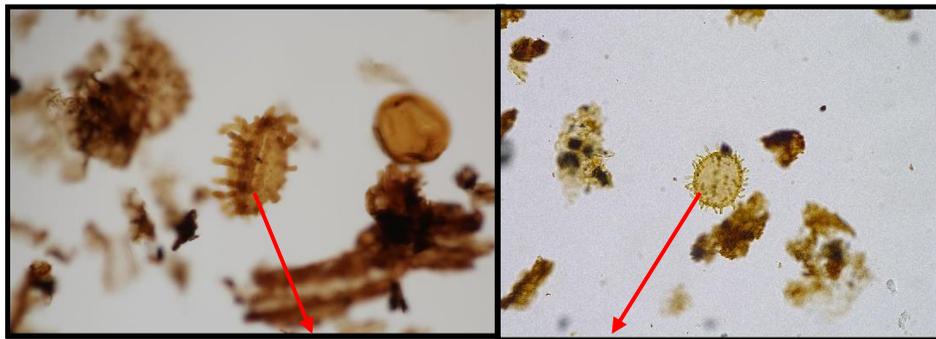


Figura 23. *Especies monoporites annulatus*, esporas del Daniense. Muestra L11

Teniendo en cuenta el análisis palinológico para esta sección, se define la zona de transición K/Pg, de acuerdo al cambio de palinomorfos del Cretácico al Paleógeno, que corresponde a las muestras L10 y L11, a los 43,5 m de columna, 12 metros por encima del contacto litológico Umir-Lizama. En la muestra 11 que pertenece a un estrato caracterizado como un paleosuelo agradacional, es donde, aparece una variedad de espóra propia del Daniense, de acuerdo a la palinología del sector (muestras 10 y 11 pertenecen al mismo estrato), el análisis palinológico se hace a la muestra 11, sin embargo, por sus características similares, ya que la muestra 10 se toma a la base y la 11 al tope del mismo estrato de paleosuelo agradacional, la zona de transición se marca donde inicia dicho estrato, como se observa en la figura 24.

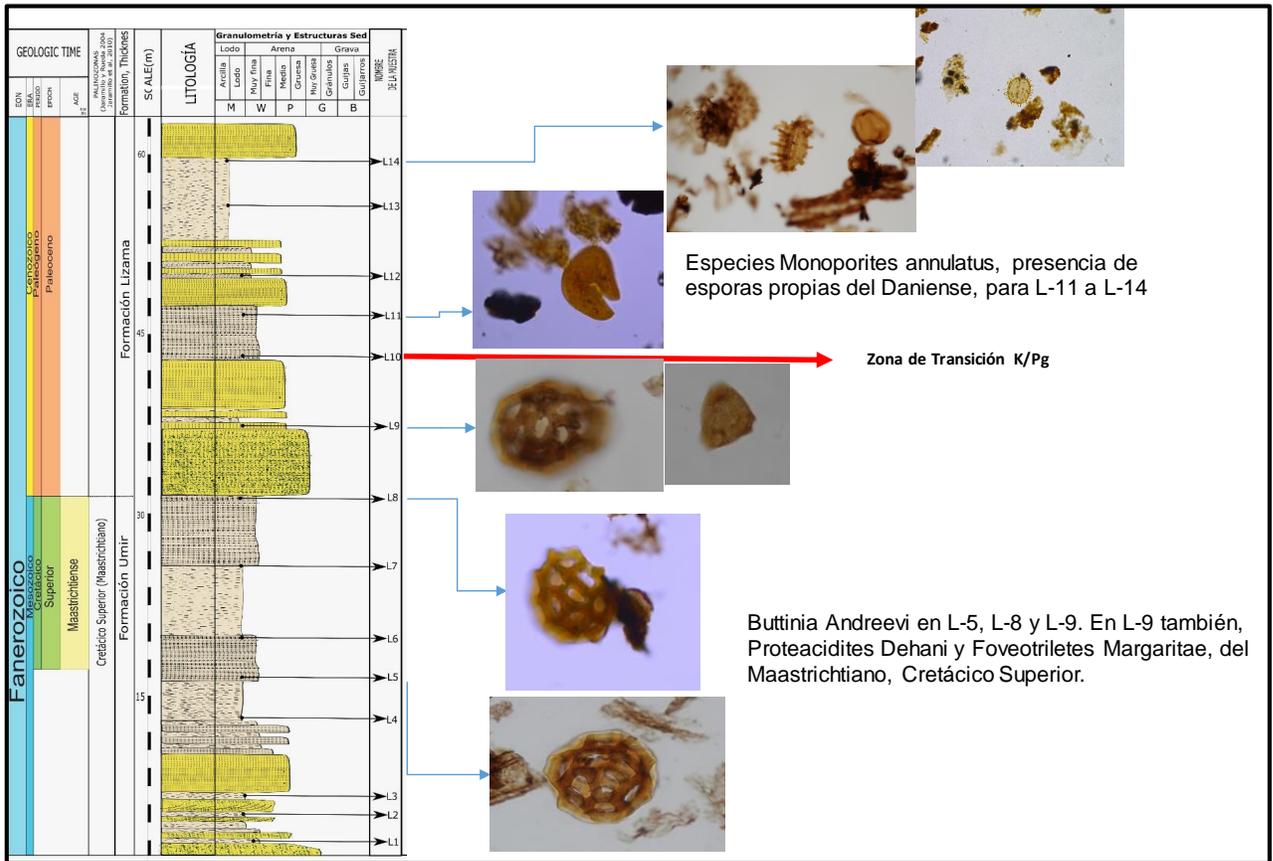


Figura 24. Ubicación zona K/Pg según análisis palinológico en la Sección Lizama.

3.1.2.4 Petrografía. Para la sección Lizama se realiza en la presente investigación un análisis petrográfico a 8 secciones delgadas, dicho análisis arroja una homogeneidad en toda la sección, sin notar cambios relevantes a través de ella desde el punto de vista mineralógico. En general, las secciones analizadas corresponden a paleosuelos fracturados y arcillosos, bioturbados y con presencia de materia orgánica, otros corresponden a lodolitas, de igual manera fracturadas y bioturbadas, como se observa en las figuras 25, 26 y 27.

PALEOSUELO ARCILLO-LIMOSO		
MUESTRA	FOTOGRAFÍAS	DESCRIPCIÓN
LIZAMA 1 L1		<p>Paleosuelo arcillo-limoso, con láminas de disposición plano paralela continua, intercaladas con limolita cuarzosa de granos sub-angulares a sub-redondeados en contacto flotante a tangencial, moderadamente seleccionada. Presenta matriz de minerales arcillosos de estructura laminar</p> <p>Se observan laminaciones de materia orgánica en superficies estiolíticas, mezclada con filosilicatos, formando barreras impermeables que disminuyen la permeabilidad de la roca. La porosidad es de tipo secundaria por disolución de material inestable de la matriz.</p>

Figura 25. Análisis petrográfico Sección Lizama. Muestra L1

LODOLITA EN MATRIZ ARCILLOSA		
MUESTRA	FOTOGRAFÍAS	DESCRIPCIÓN
LIZAMA 2 L2		<p>Lodolita con laminación plano paralela continua, con intercalaciones de limolita cuarzosa de granos sub-angulares a sub-redondeados en contacto flotante a tangencial, moderadamente seleccionada. Presenta matriz de minerales arcillosos de estructura laminar.</p>
LIZAMA 3 L3		<p>Se observan laminaciones de materia orgánica en superficies estilolíticas, mezclada con filamentos silíceos, formando barreras impermeables que disminuyen la permeabilidad de la roca. La porosidad es de tipo secundaria por disolución de material inestable de la matriz.</p>
LIZAMA 9 L9		<p>Lodolita laminada con láminas finas de limolita cuarzosa y láminas muy finas de arcillolita. La matriz es de minerales arcillosos con materia orgánica laminar. Las láminas de material detrítico están compuestas por cuarzo monocristalino de extinción recta, menos ondulosa, chert microcristalino y minerales dúctiles como moscovita.</p> <p>Se observan porosidad secundaria, por disolución de minerales arcillosos, en las láminas de material detrítico la porosidad es intergranular en cantidades bajas.</p>

Figura 26. Análisis Petrográfico de lodolitas en la Sección Lizama.

PALEOSUELO ARCILLOSO			
MUESTRA	FOTOGRAFÍAS	DESCRIPCIÓN	
LIZAMA 6 L6		<p>Arcillolita de estructura maciza, posiblemente paleosuelo, con bio-perturbación, materia orgánica amorfa de color rojizo, levemente oxidada. Presenta matriz de minerales arcillosos indiferenciados petrográficamente.</p>	
LIZAMA 8 L8			
LIZAMA 11 L11			<p>Se observan microfracturas abiertas que mejoran la permeabilidad de la roca. La porosidad es de tipo secundaria por disolución muy local de material inestable de la matriz y microfracturas.</p>
LIZAMA 14 L14			

Figura 27. Análisis petrográfico de muestras para la Sección La Lizama.

3.1.2.5 Análisis por DRX. Al igual que la petrografía el comportamiento de los minerales es muy homogéneo en la sección en general. Como ya se mencionó, el DRX se hizo a las 14 muestras. Todas las muestras presentan un contenido similar de cuarzo, mica y feldespatos principalmente a lo largo de la columna estratigráfica. De igual forma al revisar el contenido de arcillas, la presencia de Caolinita, Ilita y Smectita en el afloramiento es en general, homogénea y el comportamiento observado es el mismo. Para este trabajo se realiza un gráfico que representa la homogeneidad al igual que en la petrografía, lo que no permite desde la difracción de rayos X, afirmar que dicha homogeneidad encontrada, no es un buen indicio para la determinación de un rango de K/Pg.

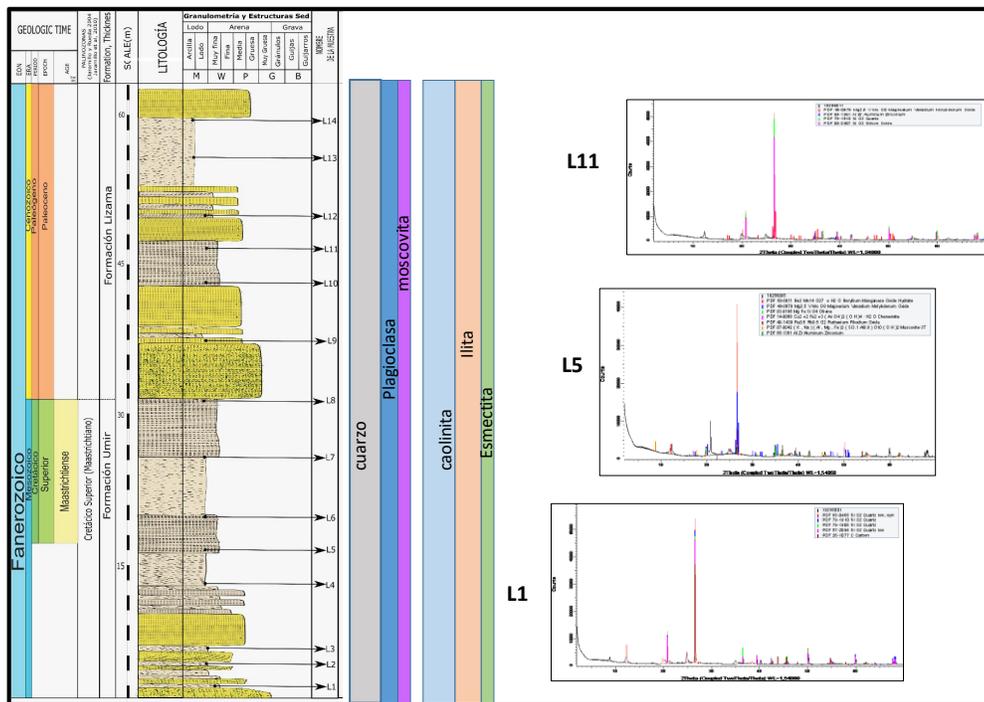


Figura 29. Análisis DRX para la Sección La Lizama.

3.2.1.6 Quimioestratigrafía. El análisis e interpretación se realizó a partir de los datos obtenidos del XRF. Los archivos se encuentran en el Apéndice C, sin embargo, a continuación, se presentan los resultados del análisis e interpretación de dichos datos. Se sigue el procedimiento descrito en la sección 3.1.1.6, sobre el método de Fralick y Kronberg y la estadística empleada. A través del análisis elemental, se estudian las variaciones en los atributos químicos para determinar las variaciones estratigráficas y poder establecer un rango para el límite K/Pg. Se analizan los perfiles de los elementos mayores, menores y trazas (descritos en la figura 24), de acuerdo al método de pares, teniendo en cuenta los elementos inmóviles en la cuenca, determinados a través del coeficiente de correlación positivo y mayor a 0.5. Para escoger estos elementos inmóviles, se ha construido en cada sección una matriz de correlación con todos y cada uno de los elementos corregidos y seleccionados para cada sección.

La asociación de elementos químicos en la quimioestratigrafía permite conocer las condiciones al momento de la sedimentación, como condiciones rédox, procedencia de los sedimentos o cambios climáticos.

Para el caso de condiciones rédox (óxicos, sub-óxicos y anóxicos), se analizan elementos químicos cuya movilidad van a depender del potencial óxico-reductor del ambiente de sedimentación, varía aquí, las concentraciones de los elementos que poseen diferentes estados de oxidación como Fe, Mn, U, Re, Cu, Co y As, donde los estados reducidos existen en condiciones de nivel bajo de oxígeno (Jarvis et al., 1998; Nieves, 2011). Para el caso del Mo y el V, los cambios en concentración están controlados por la especiación y para aquellos elementos metálicos con estado de oxidación estable en soluciones acuosas, como es el caso del Cd, Zn, Sb y Pb, pueden precipitar como sulfuros en ambientes sulfatoreductores (McKay et al., 2007; Nieves, 2011).

En la determinación de la fuente de los sedimentos, se utilizan atributos químicos que no hayan sido afectados por los procesos de meteorización y por los procesos diagenéticos, estos elementos que no han sido afectados, se les denomina inmóviles y se incluyen aquí los patrones de las tierras raras (Piovano et al., 1999, Nieves, 2011). Para tener en cuenta, se pueden mencionar los siguientes elementos: Cr, Ni, Sc, y Zn, se asocian a componentes máficos; Zr, Y, están asociados a fases de minerales pesados; el Sr y Ca se asocian a carbonatos, mientras que Na, Pb, Rb, Al y Si se asocian a componentes félsicos (Cullers, 2000; Do campo y Ribeiro, 2005, Lee, 2009 en Nieves, 2011).

Para la determinación de cambios climáticos durante la depositación, a través del análisis quimioestratigráfico, se analiza el grado de alteración química porcentual en las rocas, llamado índice de alteración química, este permite inferir la intensidad en los procesos de meteorización (Nesbitt y Young 1982). Para tal fin, se hace el análisis principalmente de los elementos Al, K, Na y Ca.

Para el caso de la zona de estudio, que corresponde al sector norte del VMM, se pueden realizar correlaciones, teniendo en cuenta los análisis de quimioestratigrafía, ya que, las variaciones significativas de los atributos químicos presentes en las secuencias estratigráficas del área, no se ven afectadas por los eventos de deformación que puedan ocurrir posterior a su formación (Nieves, 2011).

Los atributos químicos permiten determinar las condiciones fisicoquímicas al momento de la depositación en una cuenca sedimentaria y realizar correlaciones entre secuencias estratigráficas. Los atributos químicos empleados generalmente, son las concentraciones de los elementos mayoritarios, minoritarios y traza, relaciones interelementales, variaciones isotópicas, la concentración y relaciones de compuestos orgánicos, entre otros (Pearce, et al., 1999; McKay, et

al., 2007; Brilli, et al., 2010). En esta investigación, se ha tenido en cuenta los elementos mayores, menores y traza y sus relaciones interelementales.

En la tabla 4, se presentan ejemplos de atributos químicos que pueden ser empleados para inferir las condiciones que prevalecieron en el ambiente de sedimentación, determinados mediante quimioestratigrafía.

Tabla 4. Atributos químicos para inferir condiciones en el ambiente sedimentario. Tomado de Nieves, 2011

Atributo	Utilidad	Referencia
B	Indicador de paleosalinidad	Couch, 1970 en Martínez, 2001
La, Ce, Y, P	Inmóvil, con correlación positiva con TiO ₂ , controlado por la fracción de minerales pesados	Dinelli, <i>et al.</i> , 1999
U, V, Mo, Cr, Co	Condiciones redox	Tribovillard <i>et al.</i> , 2006
Fe/Mn	Condiciones redox	Toyoda, 1993 en Martínez, 2001
Fe ₂ O ₃ /TiO ₂ , MnO/TiO ₂	Condiciones redox	Sugitani y Mimura, 1998
Ni/Co, V/Cr	Condiciones redox	Rimmer, 2004
Ca/Sr	Grado de aporte marino	Calanchi, 1996 en Martínez, 2001
Ce/La	Composición de la fuente	Dayong <i>et al.</i> , 1999
Th/Sc	Composición de la fuente	Piovano <i>et al.</i> , 1999
Cr/V, Y/Ni	Composición de la fuente	Dinelli <i>et al.</i> , 1999
Cr/Sc	Composición de la fuente	Pearce, 1999
Th/Cr, La/Co, Th/Co	Proveniencia o fuente	Cullers, 2000
K/Al	Condiciones climáticas	Yarincik & Murray, 2000
Ti/Zr, La/Sc, La/Th	Ambiente tectónico	Do Campo y Ribeiro, 2005

Nota: Una vez se han determinado los elementos inmóviles y la estadística arroja los atributos químicos presentes en cada sección, se puede realizar un análisis para inferir condiciones en el ambiente sedimentario y realizar una interpretación válida, esto va a permitir, explicar la presencia o no de ciertos elementos inmóviles y su comportamiento al final del período Cretácico e inicios del Paleógeno.

Se elabora una matriz de correlación, utilizando como elemento patrón de inmovilidad, ya que, el Al₂O₃ permanece inmóvil durante diagénesis, intemperismo y metamorfismo (Cárdenas et al.,

1996, en Sánchez y Rodríguez, 2016). En la tabla 6, se resume los elementos mayores y trazas que se correlacionan de manera positiva con el Al_2O_3 , lo que indica que su comportamiento también es inmóvil, durante el proceso de sedimentación. Se determinó el coeficiente de correlación r y para aquellos valores mayores a 0,5, se establece el criterio de inmovilidad.

Para los elementos mayores el único inmóvil es el TiO_2 y los elementos traza, correlacionables con el Al_2O_3 son: Cr, V, Cu, Pb y Mo, no sufren cambios y pueden tener el mismo comportamiento hidrodinámico a lo largo de todo el proceso de sedimentación.

La relación con varios elementos negativa, como es el caso de Ca y el Zr. El Ca está asociado con carbonatos y yeso, minerales que podrían estar a lo largo de la secuencia estratigráfica. La relación negativa aquí, indica que, los elementos interpretados como fracción arcillosa y Ca, cambian a la vez, pero en sentido contrario.

Para ayudar a encontrar el límite K/Pg en el área de estudio, se analizan las características químicas de los sedimentos, estableciendo los controles geoquímicos que existen en las unidades en estudio (Formaciones Umir y Lizama), para esto se determina en primer lugar los elementos inmóviles, como se ha mencionado, empleando el método de Fralick y Kronberg. A continuación, se presentan sintetizados y normalizados los datos obtenidos por XRF para cada una de las secciones como se puede apreciar en las siguientes tablas y figuras.

Tabla 5. Porcentaje de elementos mayores para la sección Lizama por XRF

MUESTRA	Al2O3 %	CaO %	Fe2O3 %	K2O %	MgO %	MnO %	SiO2 %	TiO2 %
CTL4	23,898743	0,05569638	5,20040833	1,17518032	1,15128214	0,00395708	67,5558381	0,95889464
CTL5	25,9166135	0,3910245	1,87986461	0,98060956	0,69213313	0,00875669	69,0189344	1,11206363
CTL6	25,2806965	0,31264277	3,94117167	1,0383659	0,48393137	0,00812489	67,9875231	0,9475438
CTL7	25,6447202	0,31246997	3,87574351	1,0058295	1,12139486	0,00959672	67,0950951	0,93515011
CTLIZ 8	29,6981248	0,06683124	4,14286503	1,51102823	0,71603667	0,00727611	62,7290009	1,128837
CTLIZ 9	24,6949378	0,02488827	1,60345389	1,3941071	0,97898303	0,00464793	70,249236	1,04974606
CTLIZ 10	21,1943976	0,45378504	7,39201609	1,45617544	1,41573472	0,04705297	67,1306871	0,91015106

Nota: Datos normalizados de elementos mayores dados en porcentaje, donde se identifican los óxidos, tenidos en cuenta para realizar la matriz de correlación y encontrar los elementos inmóviles. Dentro de los elementos inmóviles pueden encontrarse también uno o más óxidos, diferentes al utilizado para la correlación.

Tabla 6. Matriz de correlación para identificar elementos inmóviles en la sección Lizama

MUESTRAS	Al2O3 %	TiO2 %	Cr	V	Cu	Pb	Mo
Al2O3 %	1						
TiO2 %	0,65	1					
Cr	0,8	0,38	1				
V	0,79	0,39	0,84	1			
Cu	0,51	0,47	0,73	0,686	1		
Pb	0,76	0,38	0,65	0,52	0,62	1	
Mo	0,78	0,645	0,69	0,89	0,71	0,55	1

Nota: Ejemplo de la matriz de correlación obteniendo los elementos inmóviles, aquellos cuyo coeficiente de correlación es mayor o igual a +0.5

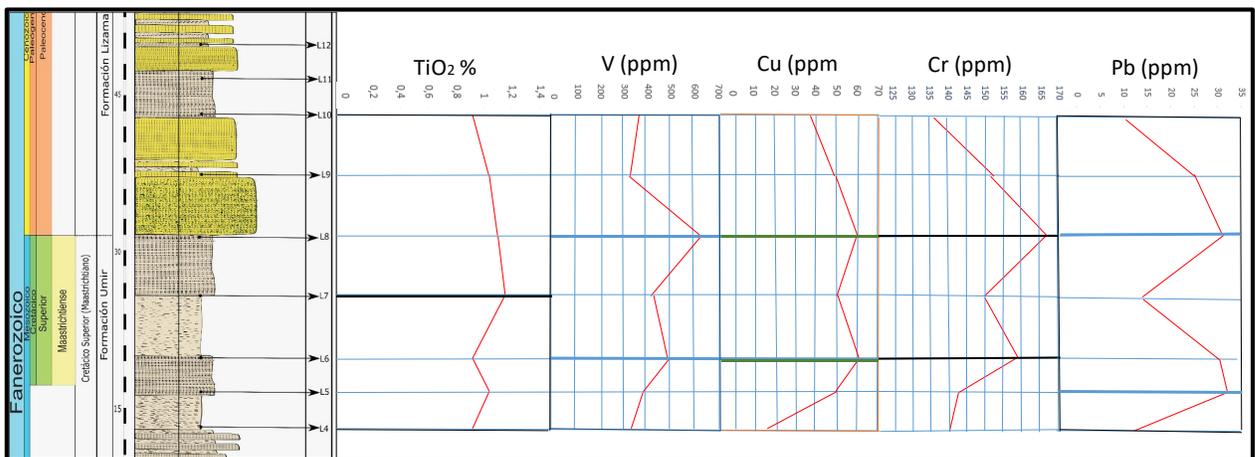


Figura 30. Comportamiento de elementos inmóviles en la Sección Lizama.

Los elementos inmóviles dentro de la sección Lizama corresponden a Vanadio (V), Cobre (Cu), Cromo (Cr) y Plomo (Pb), la correlación se establece con el TiO_2 , ya que con el Al, no se hallaron correlaciones positivas mayores a 0.5. En los Apéndices C, se encuentra el proceso estadístico. El TiO_2 en su comportamiento presenta dos fases, teniendo un cambio brusco en L7, dentro del rango establecido como K/Pg, según este estudio.

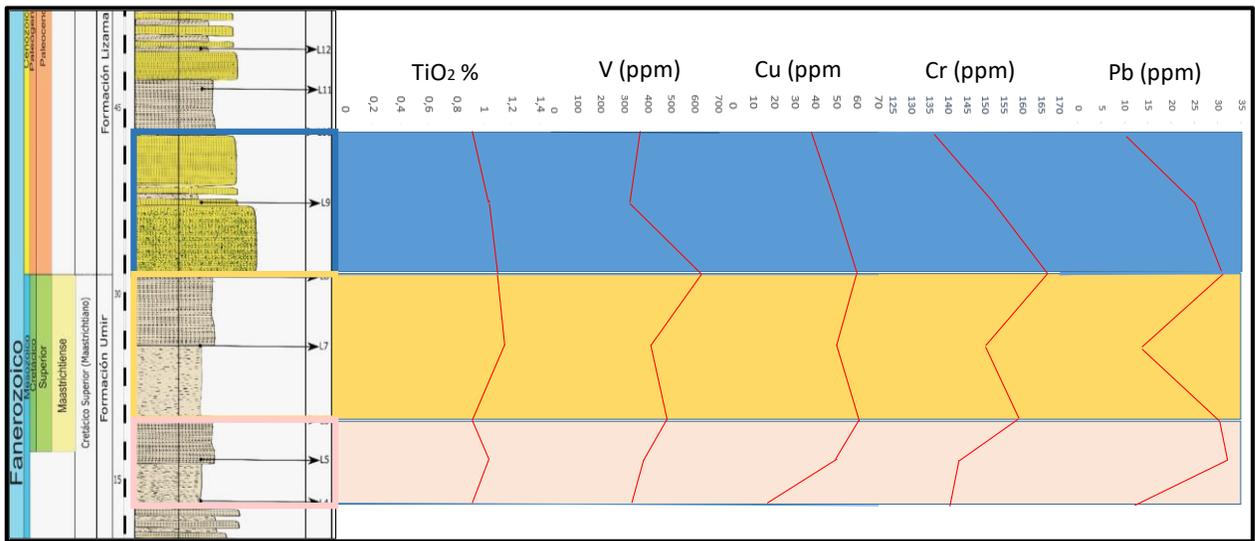


Figura 31. Quimiofacies según comportamiento de elementos inmóviles en la Sección Lizama

La franja rosada corresponde a una asociación carbonática, posteriormente viene una franja naranja de condiciones rédox y finaliza con una facies siliciclástica, donde ya ha ocurrido el evento masivo. El rango para el límite K/Pg correspondería aquí a la franja naranja.

Tabla 7. Elementos mayores para la sección Mata de Cacao por XRF

MUESTRA	Fe2O3 %	CaO %	MgO %	SiO2 %	Al2O3 %	K2O %	TiO2 %	MnO %
CT MC 4	5,11357497	0,29711311	2,92093044	67,2044327	22,5460896	0,96145039	0,91583054	0,04057829
CT MC 5	4,58682111	27,6714993	2,09799209	51,9045487	12,4516342	0,46817736	0,36412874	0,4551985
CT MC 6	4,34608569	0,51453501	2,65405513	68,7350892	22,4818786	0,74378463	0,48372285	0,04084883
CT MC 7	5,59837993	0,37013931	2,02493374	62,7111793	27,1849984	1,20131917	0,78422004	0,12483011
CT MC 8	3,72251731	1,72142861	2,02320265	68,5064876	21,9512221	1,18671153	0,86952071	0,01890955
CT MC 10	2,38029587	0,39281573	1,52462508	66,2830311	27,6471783	0,76637355	0,98835338	0,01732697
CT MC 12	6,40021103	12,7837197	1,42353283	59,6308861	18,2041062	0,56525211	0,52060934	0,47168276
CT MC 20	5,25376173	8,35743349	3,0035771	55,5528615	25,7327419	1,30220825	0,69088331	0,10653272
CT MC 25	5,41677077	1,97121841	0,79130995	69,4036006	19,8671457	1,48013176	1,05384113	0,01598163
CT MC 29	6,33694681	0,10631665	1,67648566	68,5816274	20,3151378	1,86030688	1,11259297	0,01058586
CT MC 32	7,31972598	1,10878495	2,55507445	67,6457009	18,9858862	1,24134388	1,01460104	0,12888257
CT MC 35	3,27049847	3,93626374	1,72173365	63,9587007	24,7471007	1,37329748	0,88303022	0,10937507
CT MC 36	4,58675228	1,60626804	1,64296889	68,4508813	21,029073	1,69030453	0,97386771	0,01988419

Nota: Presentación de datos organizados y normalizados para elementos mayores en porcentaje de acuerdo con los datos del análisis XRF.

Tabla 8. Elementos traza para la sección Mata de Cacao por XRF

MUESTRA	Ni	Co	Fe	Mn	Cr	V	Ti	Ca	K	S	Ba
CT MC 4	60,952	114,7	39273,402	345,477	103,62	298,629	6022,942	2330,795	8726,729	1791,329	551,351
CT MC 5	67,086		29021,393	3192,667	113,036	192,818	1972,789	178832,781	3500,801	8513,418	401,78
CT MC 6	168,911	99,221	29954,104	312,095	69,042	180,031	2854,791	3622,268	6058,373	7864,768	960,724
CT MC 7	103,792	157,429	42568,59	1052,184	132,981	342,755	5106,04	2874,748	10795,331	1406,258	1281,52
CT MC 8	72,971	96,59	27441,881	154,529	139,135	296,444	5488,792	12962,067	10338,864	28042,918	767,602
CT MC 10	64,536	50,781	18137,361	146,356	159,512	365,649	6448,74	3057,317	6901,358	492,498	590,314
CT MC 12	101,358		53869,156	4400,903	86,432	136,992	3752,127	109903,391	5622,619	20431,299	362,853
CT MC 20	139,086	88,875	45093,746	1013,617	136,364	299,803	5077,735	73270,109	13209,213	6579,792	761,653
CT MC 25	64,453	83,861	32412,357	106,007	97,225	291,788	5399,644	12047,944	10466,975	46897,074	545,229
CT MC 29	49,914	0	32120,553	59,478	175,6	662,898	4829,021	550,44	11143,927	22849,24	508,155
CT MC 32	96,862	103,156	52379,332	1022,364	113,246	257,306	6216,988	8104,391	10498,031	15322,102	566,224
CT MC 35	112,903	79,972	25346,801	939,666	131,938	549,682	5860,089	31160,275	12578,369	9383,967	840,912
CT MC 36	51,453	76,454	28106,66	135,068	156,614	270,838	5110,028	10053,79	12241,077	35016,246	664,421

Nota: Ejemplo de algunos elementos trazas obtenidos en el análisis XRF a las muestras seleccionadas para la sección Mata de Cacao. Las unidades correspondientes son ppm. Dichos elementos valores son los que se utilizan para realizar la estadística descriptiva y variable en el análisis y búsqueda de elementos inmóviles.

Tabla 9. Matriz de correlación para los elementos de la sección Mata de Cacao

	Al ₂ O ₃ %	Rb	Ti	Ba	Ag	Bi	Al	Si
Al ₂ O ₃ %	1							
Rb	0,55103112	1						
Ti	0,61107727	0,49099846	1					
Ba	0,66746904	0,52327021	0,49099846	1				
Ag	0,08332397	-0,45777299	-0,83185988	0,16461814	1			
Bi	0,63862712	0,5726565	0,15517819	0,28665482	0,03466577	1		
Al	0,89761768	0,29376023	0,50285393	0,56882304	0,30329408	0,4745032	1	
Si	0,62101738	0,02931267	0,53237355	0,32889124	0,07404897	-0,00391449	0,78842298	1

Nota: Elementos inmóviles en la sección Mata de Cacao, a través de ellos se puede analizar su comportamiento a lo largo de la sección para estimar un rango del límite K/Pg.

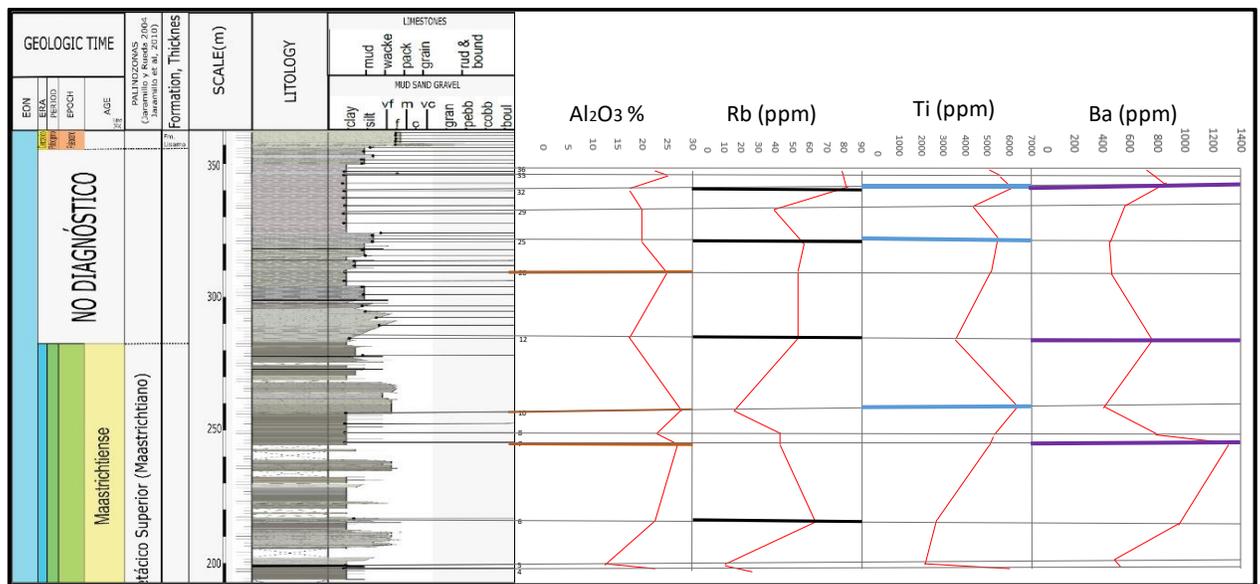


Figura 32. Comportamiento de los elementos inmóviles en la sección Mata de Cacao.

La correlación en la sección Mata de Cacao se establece con el elemento Al₂O₃, el cual tiene un comportamiento inmóvil, especialmente en medios de sedimentos finos como las arcillas. Los elementos inmóviles en la sección corresponden a Rubidio (Rb), Titanio (Ti) y Bario (Ba).

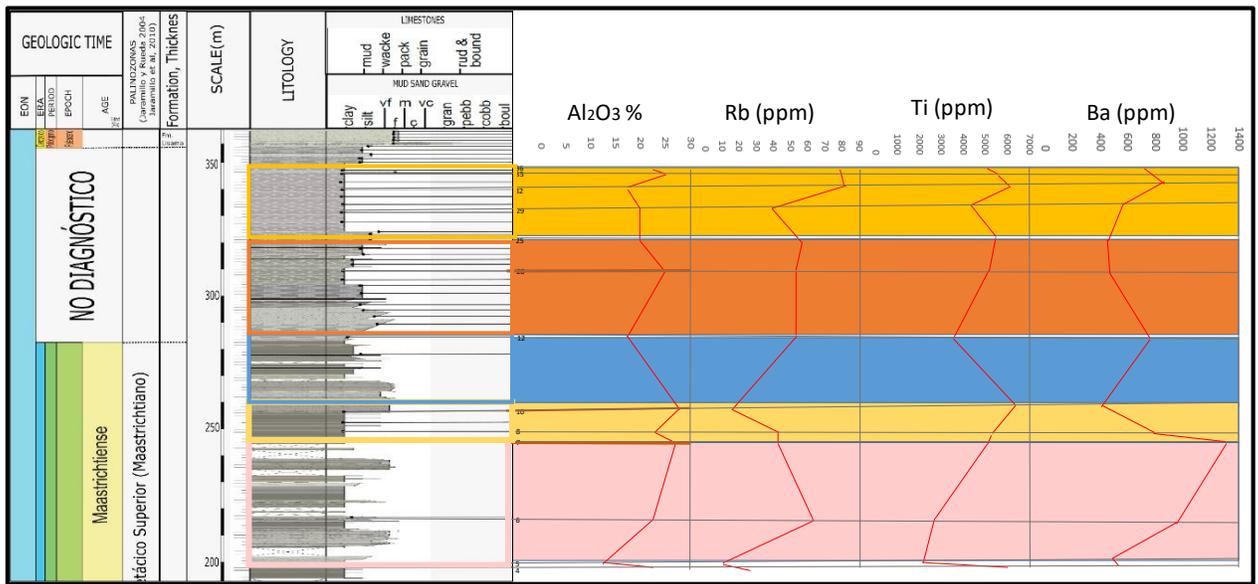


Figura 33. Quimiofacies según elementos inmóviles en la Sección Mata de Cacao.

El bario representa el elemento indicador de actividad biológica, lo que quiere decir que en la primera facies determinada de color rosado, el Bario tiene un incremento, sugiriendo la presencia de organismos vivos, luego viene un descenso en una etapa de óxido-reducción, pero vuelve a incrementar, cuando el incrementa, el Ti disminuye, lo que indica que hay actividad biológica nuevamente y posteriormente el Ba, cae hasta casi el final de la columna indicando la desaparición rápida y determinante de organismos vivos.

Tabla 10. Elementos mayores para la sección Rio Sucio por XRF.

SAMPLE	Fe2O3 %	CaO %	MgO %	SiO2 %	Al2O3 %	K2O %	TiO2 %	MnO %
CT RS 1	3,55831207	3,76722558	0,69141246	66,0028779	23,4624506	1,56857909	0,92077543	0,02836683
CT RS 2	13,3994573	0,74935398	0	65,0627069	17,6289481	1,71142876	1,44810484	0
CT RS 3	4,80433775	0,53655789	3,14361579	66,8248677	22,731701	1,17548197	0,74782543	0,03561249
CT RS 4	3,9502846	0,3631181	2,28890538	75,4480105	16,6812185	0,66585254	0,56137934	0,04123096
CT RS 5	4,06163168	0,22235169	2,24762973	72,8107054	19,0287331	0,78071557	0,81176971	0,0364631
CT RS 6	3,80357835	0,06982128	0,87259872	72,9878551	20,1510267	0,89416874	1,19744372	0,02350734
CT RS 7	3,16099475	1,36362432	1,26745747	65,6057837	26,9872831	0,79251188	0,80892634	0,01341847
CT RS 8	5,23495782	0,30894934	1,28849899	65,6770495	25,7081876	0,94444773	0,81917925	0,01872985
CT RS 9	2,40226995	1,04953846	0	63,9013078	30,2864021	1,44673044	0,89645374	0,01729757
CT RS 10	5,80248848	0,34465754	1,55233125	60,8248505	29,211673	1,44644299	0,79664753	0,02090864

Nota: Porcentaje de elementos mayores normalizados de acuerdo con los análisis XRF para determinar correlaciones entre sí y con elementos trazas.

Tabla 11. Elementos traza para la sección Río Sucio por XRF.

MUESTRA	Ni	Co	Fe	Mn	Cr	V	Ti	Ca	K	S	Ba
RS											
RS1	66,648	90,685	22625,55	199,943	92,828	292,837	5013,35	24467,2	11787,2	53835,7	607,8
RS2	0	149,004	30751,42	0	121,197	187,902	2845,76	1756,6	4641,81	55547,3	0
RS3	95,063	140,787	39996,31	328,653	132,478	290,906	5330,97	4562,59	11565,2	2657,79	688,98
RS4	76,995	109,849	34219,11	395,923	110,448	247,841	4164,05	3212,89	6816,62	3221,55	544,59
RS5	74,181	89,014	33402,26	332,413	115,204	303,749	5716,47	1867,77	7587,85	1915,25	641,83
RS6	71,369	56,853	21939,7	150,308	218,923	755,045	5914,43	411,371	6095,49	11370,3	656,41
RS7	85,714	132,718	25240,64	118,776	147,025	466,948	5531,02	11121,9	7478,82	30182,3	562,99
RS8	76,553	88,054	42045,91	166,757	157,015	463,719	5633,9	2534,58	8964,77	1007,88	792,83
RS9	57,156	0	44736,72	117,626	130,202	406,99	4708,98	6576,35	10488,6	32375,4	842,87
RS10	101,408	83,519	49112,63	196,18	188,573	475,427	5773,84	2979,71	14468,7	4680,09	873,81

Nota: Algunos elementos de los detectados por el analizador XRF, en la determinación de elementos trazas, para la correlación y búsqueda de elementos inmóviles en la sección.

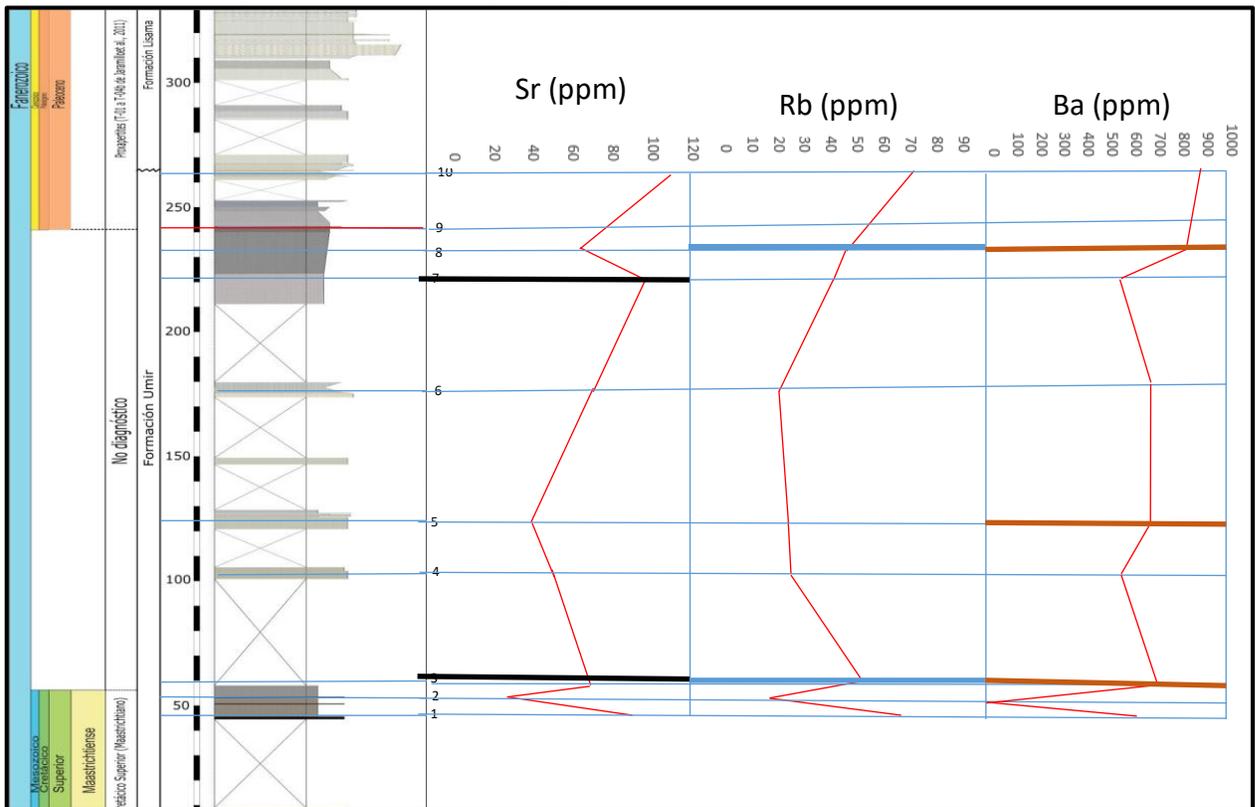


Figura 34. Comportamiento de los elementos inmóviles en la sección Río Sucio.

En los primeros 60 metros de la columna el comportamiento de los elementos es similar, hay una disminución de estos, quizás apenas se estaban depositando, posteriormente el Rb, es quien muestra un descenso entre los 60 m y los 180 m de la columna, no es clara la asociación

carbonática, al parecer es muy pequeña en la columna; la falta de información no permite tener buenos datos para revisar los cambios elementales.

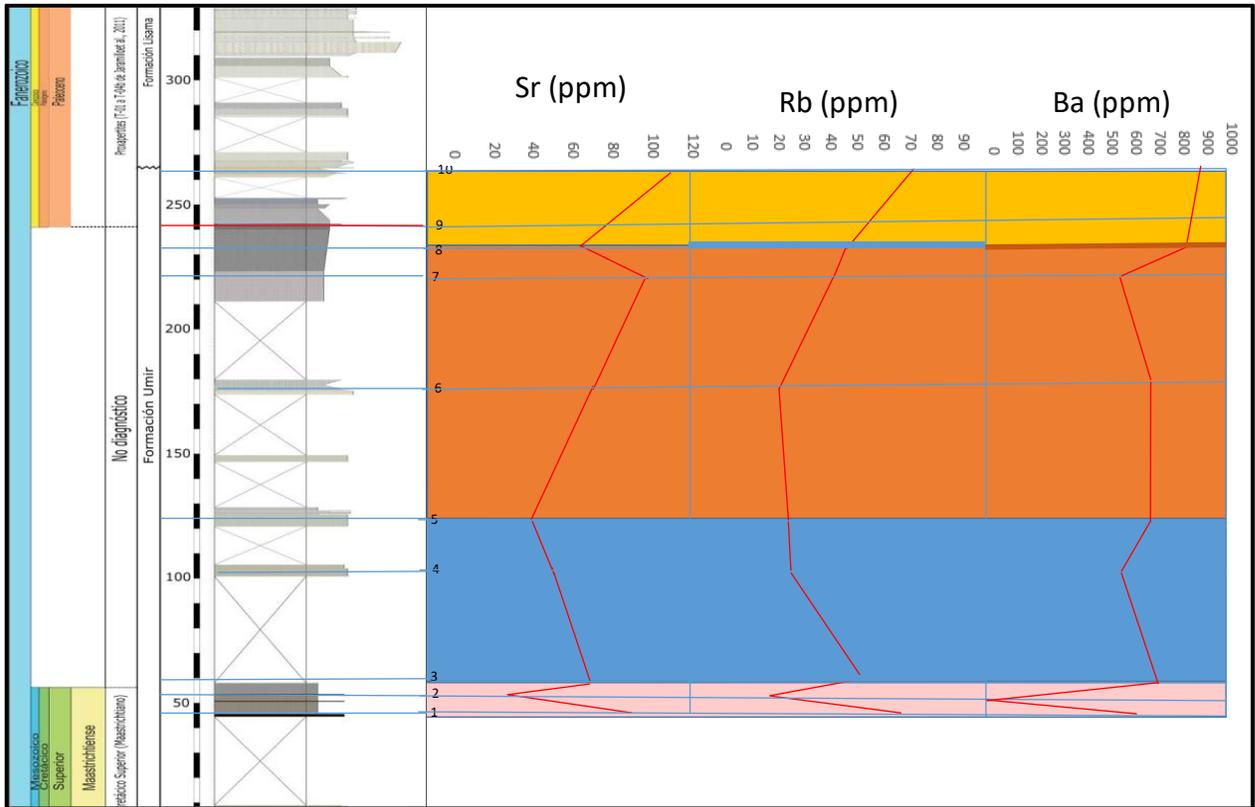


Figura 35. Quimiofacies según elementos inmóviles en la Sección Rio Sucio.

Se aclara que hay varias zonas marcadas sin registro de información, lo cual podría cambiar los resultados a la hora de tener un mayor y mejor número de datos al respecto.

3.1.2.1 Discusión. El límite K/Pg ha generado en la humanidad, curiosidad, dudas, investigación, controversia y hasta pasión. El problema de hoy a nivel global no es la determinación del límite, ya que, en más de 200 secciones alrededor del mundo, se ha identificado y datado; la situación hoy, es conocer qué ocasionó la extinción masiva, realmente fue el meteorito de Chicxulub o las emisiones volcánicas del Deccan Traps. Las dudas y preguntas alrededor del tema se centran principalmente en saber si la caída del meteorito coincide con el límite y por lo tanto, fue la causa de la extinción masiva, o si dicho meteorito fue uno más de los varios que pudieron caer dentro del proceso gradual de la extinción a finales del Cretácico, quizás porque las erupciones volcánicas habían debilitado la atmósfera y su efecto fue determinante en la extinción. Pero, si el proceso fue gradual, cómo explicar las evidencias registradas por organismos como los foraminíferos planctónicos, acerca de la extinción súbita de estos.

Pero mientras a nivel mundial, estas son las dudas que se pretenden aclarar, en zonas como el sector norte del VMM en Colombia, aún no se ha identificado dicho límite, quizás como ya se mencionó en este trabajo, no ha sido fácil, no se evidencia la capa de arcilla, ni se han encontrado las evidencias del impacto o las de erupciones volcánicas; esto en gran parte, debido a la evolución geológica de la cuenca, el levantamiento de las cordilleras, el retiro del mar a finales del Cretácico de la zona, los procesos erosivos en el tiempo, los cambios ambientales, entre otros. En las tres secciones estudiadas en esta investigación, se analizaron los sedimentos depositados a finales del Cretácico y principios del Paleógeno, lo que corresponde en la zona a las Formaciones Umir y Lizama. En las secciones Lizama y Mata de Cacao los sedimentos expuestos corresponden en su mayoría a fases finas (arcillas y lodos), la presencia de paleosuelos, materia orgánica, arcilla orgánica pedogenizada, impide a través de petrografía o análisis Drx, observar cambios importantes en la mineralogía o química como tal, de manera que se puedan tomar criterios para

la definición de la zona de límite. Los resultados petrográficos y de DRX en la sección Lizama, indican que no hay claridad de los cambios para la determinación de la zona de límite.

Debido a lo anterior, fue necesario utilizar una herramienta que permitiera la caracterización de la roca para establecer la correlación entre las secuencias estudiadas. Se utilizó la quimioestratigrafía, como se explicó en el numeral de análisis de resultados, donde se buscó caracterizar químicamente la roca, para encontrar elementos químicos inmóviles, analizar su comportamiento y poder correlacionar, teniendo en cuenta los atributos químicos. Este trabajo permitió establecer la caracterización química de los sedimentos de la Formación Umir, parte superior (Cretácico Superior) en contacto con los sedimentos de la Formación Lizama, parte basal (Paleógeno), buscando establecer posibles variaciones o cambios determinantes en los elementos inmóviles determinados por métodos estadísticos. Cabe aclarar, que las zonas no son fáciles de caracterizar, ya que en su mayor parte las muestras tomadas corresponden a paleosuelos, donde la presencia de óxidos, la pedogenización, arcillas, entre otros, dificulta mayormente la caracterización del terreno.

La presencia de colores oscuros y verdosos a lo largo de la secuencia estratigráfica, en la sección Lizama, gran parte de Mata de Cacao e incluso Rio Sucio, son indicativos, de unas condiciones de sedimentación con bajas concentraciones de oxígeno y de esta manera prevalece una condición al menos disóxica. En el levantamiento de la sección Lizama, esto se observa después de los 12 metros, que corresponden a la Formación Umir y se hace más fuerte hacia el tope de esta, en contacto con la Formación Lizama. Los paleosuelos, arcillas abigarradas, colores oscuros y verdosos se encuentran en un amplio espesor, desde los 12 m hasta los 61,5 m aproximadamente en la sección Lizama; después de los 61,5 m se observan areniscas impregnadas de hidrocarburo.

La abundancia relativa de distintos elementos químicos, donde están el grupo del platino y las tierras raras en la lámina de impacto, presenta un patrón condrítico (Álvarez et al., 1980; Ganapathy, 1980; Smith y Ten Kate, 1982; Martínez-Ruiz et al., 2006) en Villasante, 2015, sin embargo, en la zona de estudio, no hay indicios de estos platinoídeos, dentro de los estudios realizados (petrografía, Drx y XRF), lo que dificulta un poco la determinación del límite, además la presencia de paleosuelos y facies finas (arcillas y lodos) en su mayor parte en la tres secciones, no permiten visualizar cambios representativos en el área a nivel de petrografía o Drx, la quimioestratigrafía elemental juega entonces aquí, un papel importante.

El aluminio es el principal elemento inmóvil dentro de los análisis quimiestratigráficos, ya que se mantiene estable durante los procesos sedimentarios, esta estabilidad la hace dentro de una estructura mineral arcillosa, esto significa que la meteorización fue de incipiente a elevada en la zona, sin embargo, se debe tener en cuenta, que de igual manera el Al forma aquí, óxido-hidróxidos de Al, lo que indica meteorización extrema, reflejando entonces, severos cambios medioambientales, quizás no un proceso inmediato, sino un intervalo de tiempo durante el cual se generaron cambios a finales del Cretácico, justo antes del límite, de acuerdo al análisis del comportamiento de los minerales inmóviles, pasando de un ambiente carbonático a uno con condiciones rédox, posteriormente, parece que todo vuelve a la normalidad y el ambiente se restablece en cierta parte, pero finalmente, se produce un cambio más fuerte, donde reaparecen las condiciones de óxido-reducción, generando quizás, la extinción y los cambios definitivos. Esto se observa en las tres secciones en el comportamiento químico de los elementos.

El límite K/Pg podría determinarse de acuerdo al comportamiento químico observado, teniendo en cuenta de igual manera la variación de incremento o disminución de elementos calcófilos, litófilos o siderófilos, así como la aparición y desaparición de ciertos elementos productos de

fuerentes cambios medioambientales o por contaminación como es el caso del Cd, Y, Hg o la misma presencia de hidrocarburos, incremento de materia orgánica, entre otros aspectos observables; de acuerdo con esto, se puede inferir que para la sección Lizama el límite podría encontrarse a los en un rango entre los 19,5 m y los 31,5 m en la columna levantada, dicho rango está por debajo del contacto Umir-Lizama y de igual manera infrayacente a la zona de transición establecida por palinología; lo que implicaría que se puede tener un lapso de tiempo sin información precisa de palinomorfos propios del Cretácico o la Formación Lizama, pudo iniciar su depositación antes del contacto establecido hasta hoy. Para la Formación MTC, se requiere profundizar un poco más en el análisis de foraminíferos, sin embargo, se puede dar una aproximación de la ubicación del rango del límite K/Pg, a través de los análisis elementales y las quimiofacies, las variaciones son similares a las dadas en Lizama y el rango se puede considerar entre los 285 y los 320 m de la columna levantada. Finalmente, para la sección de Rio Sucio, los análisis elementales indican que el comportamiento de los elementos analizados (inmóviles) es similar al presentado en Lizama, con una zona carbonática de menor espesor y el K/Pg en un rango entre los 120 m y los 230 m de la columna levantada.

4. Conclusiones

El análisis de información existente acerca del límite K/Pg en Colombia, junto con los análisis realizados en esta investigación, permiten concluir que, para el sector norte del Valle Medio del Magdalena, no es posible acogerse a los indicadores dados por la teoría impactista, de hecho, no hay evidencias de impacto, microesférulas, picos de Ir, cuarzos de choque, ni la delgada capa de arcilla, no significa que más adelante mediante mejoramiento de datos y técnicas se encuentre al menos una. De acuerdo con la teoría multicausal, ocurren al parecer dos eventos de destrucción, uno inicial que cesó y pudo la Tierra restablecerse durante un tiempo y un segundo evento que generó cambios definitivos, ya que gran parte de la actividad biológica disminuyó o se extinguió.

Análisis de petrografía y Drx se realizaron para comparar los datos obtenidos en quimioestratigrafía, sin embargo, las facies finas presentes en la zona y el comportamiento similar observado a través de la petrografía y el Drx, no permiten hacer comparaciones en sí con la quimioestratigrafía y los resultados de esta última van a ser los tenidos en cuenta para la descripción del área dando rangos de aproximación para el límite K/Pg en cada sección.

La petrografía, en general en las tres secciones, indican facies finas, en la sección MTC, presenta litoarenitas, sin embargo, paleosuelos, arcillas y lodolitas también están presentes, lo que hace más difícil tomar los análisis petrográficos como referencia en la determinación del límite K/P, por lo tanto, la quimioestratigrafía es el método más acertado en este caso.

De acuerdo al análisis quimioestratigráfico, se pudo determinar que los elementos se encuentran asociados a material clástico tipo arcillas como es el caso de Al, Cr, V, Cu, Pb, Y y Mo; de igual

manera asociados a clásticos tipo carbonatos como es el caso de Ca, Mn y Sr, también hay clásticos tipo limo como Cr, Si y Zr y finalmente óxido- hidróxidos como es el caso de Mg, Fe, Si y K.

De acuerdo a las asociaciones de los minerales, se puede hablar de las quimiofacies presentes, para el caso, corresponden básicamente a tres, controladas por cada uno de los procesos que se llevaron a cabo durante la sedimentación de las Formaciones presentes, en la parte analizada (superior de la Formación Umir, basal de la Formación Lizama) y son dichas asociaciones tipo arcilla, carbonato y lodo, las que determinan los cambios de las distintas quimiofacies.

Aunque no es totalmente claro el límite K/P en la zona de estudio, los análisis de quimioestratigrafía elemental, muestra una buena aproximación hacia donde debe estar, unos rangos establecidos con mayor precisión para continuar profundizando bajo otras herramientas de investigación como la bioestratigrafía (estudios en foraminíferos), quimioestratigrafía isotópica, determinación de propiedades magnéticas, entre otros.

La Formación Lizama inicia su proceso de sedimentación en el Cretácico terminal, sus características basales semejan el comportamiento químico a la Formación Umir, probablemente el mismo contacto litológico observado en campo, no corresponde a la zona específica, ya que esta formación al parecer inicia un poco antes del contacto definido y observado.

Cabe resaltar dentro de las conclusiones, la presencia de materia orgánica en las secciones estudiadas y en las dos Formaciones, aclarando que, ella es mayor en la parte superior de la Formación Umir, donde se presenta como espesos mantos de carbón y disminuye hacia la Formación Lizama donde los mantos de carbón son más delgados hasta desaparecer completamente. De igual forma en la sección Lizama y sobre la Formación del mismo nombre, la materia orgánica está también asociada a la presencia de Hidrocarburo. No cabe duda de acuerdo a lo anterior, que esta materia orgánica que forma mantos de carbón, corresponde a material

continental especialmente, depositado en ambientes transicionales, pantanos, que se formaron después del retiro del mar y generó de igual forma cambios en los procesos de sedimentación. El límite K/P, estaría asociado a la disminución de esta cantidad de materia orgánica.

5. Recomendaciones

- Se propone para complementar este trabajo, la determinación de las propiedades magnéticas para saber si hay alguna huella o firma magnética que distinga las fases mineralógicas generadas durante el K-P, permitiendo concluir a qué fases mineralógicas corresponde las propiedades magnéticas que se puedan observar y si están asociadas a los indicadores dados ya sea por la teoría impactista o por la multicausal en la determinación del límite K-P. De esta manera, se podrá saber si el origen de las propiedades magnéticas observadas en las fases mineralógicas asociadas al límite K-P son de origen meteorítico o no y si estas propiedades se pueden extender a través del VMM, para la identificación y determinación del límite K-P a lo largo de la cuenca.
- En la sección MTC, se encuentran foraminíferos, es importante realizar un análisis bioestratigráfico, para reconocer qué tipo de foraminíferos se tiene y si están asociados a la extinción del K/P, esto ayudaría aún más a la determinación del límite en el área.
- Es importante para determinar con claridad el límite K/P aplicar quimioestratigrafía isotópica, ella permitirá mayor precisión a la hora de concluir la existencia y ubicación del límite K/P en la zona de estudio.

Referencias Bibliográficas

- Aguilera, R., Sotelo, V., Burgos, C., RA GEOLOGIA E.U. Arce, C., Gómez et al., ANH. Atlas de Geoquímica Orgánica de Colombia. Una herramienta exploratoria para las cuencas colombianas.
- Alegret, L. A. (2002). Eventoestratigrafía del límite Cretácico/Terciario en A'in Settara, Tunicia: ¿disminución de la productividad y/o de la oxigenación oceánicas? *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 121-136.
- Álvarez, L.W., W. Álvarez, F. Asaro & H.V. Michael. (1980). Extraterrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary extinction. *Science* 208: 1095-118.
- Alvarez, W., Asaro, F., Alvarez, L. W., & Michel, H. V. (1982). Iridium anomaly approximately synchronous with terminal Eocene extinctions. *Science*, 886-888.
- ANH (2006). Cartografía Geológica Cuenca Cesar-Ranchería, Informe Final. Geostudios Ltda. Bogotá, 95 pag.
- Arenillas, I. A. (1998). *El límite Cretácico- Terciario en Zumaya, Osinaga y Músquez (Pirineos): Control bioestratigráfico y cuantitativo de hiatos con foraminíferos planctónicos*. Zaragoza, España
- Arz, J. e. (2001). Extinción de foraminíferos en el límite Cretácico-Terciario de Coxquihui (México) y su relación con las evidencias del impacto. *Revista Española de Micropaleontología*, 221-236.
- Arz, J. e. (2012). The Cretaceous/Tertiary boundary event and Occam's razor. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 218-228.
- Barrero et al, 2007. Colombian Sedimentary Basins: Nomenclature, boundaries and petroleum geology, a new proposal. ANH, Bogotá, Colombia.
- Bermúdez, H. S. (2015). Primer Registro del límite Cretácico - Paleógeno en Colombia. *XV Congreso Colombiano de Geología*, 4 pag.
- Caballero, V. (2010). *Evolución tectonosedimentaria del Sinclinal de Nuevo Mundo, Cuenca sedimentaria Valle Medio del Magdalena, Colombia durante el Oligoceno-Mioceno*. Bucaramanga, Colombia: Geología, UIS.

- Cárdenas, R. (2008). *El fin de la Teoría del meteorito y los dinosaurios?: El debate de Chicxulub*. Obtenido de Cienciorama: <http://www.cienciorama.unam.mx/>
- Carreño, e. a. (2004). Límites K/T y Eoceno Inferior-Eoceno Medio: Catastrofismo y evolución gradual en el Caribe. *Ediciones Universitarias, Cuba*.
- Carrión, J. (2015). *Extinciones y Excepciones: El poder de la rareza en evolución*. Murcia, España: Servicio de publicaciones. Universidad de Murcia.
- Cerón, R. (2016). *El ritmo de la Extinción se acelera*. Mexico: El universal.com.
- García, J. (2016). *Extinciones Masivas a lo largo de la historia de la Tierra*. Jaén, España: Facultad de Ciencias Experimentales, Universidad de Jaén.
- García, j. R. (2015). *Microkristitas de la isla Gorgonilla: Primer registro de esferulitas asociadas al límite K/Pg en Colombia, Sur América y el Pacífico Oriental*. XV Congreso de Geología.
- Geosites. (2011). Crisis en la historia de la Tierra. En I. G. España, *Proyecto Geosites: Aportación española al patrimonio geológico mundial* (págs. 126-147). España: Geosites.
- Gómez, e. a. (2003). Controls on Architecture of the Late Cretaceous to Cenozoic Southern Middle Magdalena Valley Basin, Colombia. *GSA Bulletin*, 131-147.
- Gómez, J. (2019). *Caracterización geoquímica y mineralógica del límite Cretácico-Paleógeno en el flanco Oriental del SNM, Lebrija-Santander*.
- Gómez et al., 2003. Controls on Architecture of the Late Cretaceous to Cenozoic Southern Middle Magdalena Valley Basin, Colombia. *GSA Bulletin*; February 2003; v. 115; no. 2; p. 131-147.
- Keller, G., Adatte, T., Berner, Z., Harting, M., Baum, G., Prauss, M., . . . Stueben, D. (30 de Marzo de 2007). *Science Direct*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/>
- Keller, G., Adatte, T., Berner, Z., Harting, M., Baum, G., Prauss, M., . . . Stueben, D. (2007). *Scince diret*. Obtenido de Sciencia i.
- Melendez, A. y. (2008). El límite Cretácico-Terciario (K/T). *Contextos Geológicos Españoles*, 107-113.
- Molina, E. (2007). Causas de los principales eventos de extinción en los últimos 66 millones de años. *Real Academia de Ciencias*, 37-64.
- Moreno, e. a. (2011). *Depositional and provenance record of the Paleogene transtition from foreland to hinterland basin evolution during Andean orogenesis northern Middle Magdalena Valley Basin, Colombia*. Bogotá.

- Nieves, J. (28 de Mayo de 2012). La Gran Extinción que casi acabó con la vida en la Tierra. *ABC-ciencia*, 1-3.
- Pardo, A. (2006). Los efectos de la polarización de los medios de comunicación especializados en los grandes paradigmas científicos: el caso de la gran extinción del límite Cretácico-Terciario. *researchgate.net*, 327-340.
- Pardo, A. K. (2011). From Mexico to India: In search of the causes of the demise of the dinosaurs. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 149-161.
- Pollastro, R.M., Bohor, B.F. (1993). Origin and clay-mineral génesis of the Cretaceous/Tertiary boundary unit, western interior of North America. U.S. Geological Survey, Denver, Colorado 80225.
- Prados, T. C., 2014. Grandes catástrofes en la historia de la Tierra: extinciones en masa. Universidad de Jaén. Facultad de Ciencias Experimentales. Andalucía, España.
- Prothero. (1998). Bringing fossils to life: An introduction to paleobiology. *WCB/McGraw-Hill*, 566 páginas.
- Ramkumar, Mu., 2015. Chemostratigraphy: concepts, Techniques, and Applications. Department of Geology, Periyar University, Salem, Tamilnadu, India. Elsevier. 509 pag.
- Sarmiento, G., Puentes, J., Sierra, C., 2015. Evolución Geológica y Estratigrafía del Sector Norte del VMM. Departamento de Geociencias, Universidad Nacional. Bogotá, Colombia. Lewis Energy Group, San Antonio Texas. 78216
- Smith, Ch., 2010. Rapid Handheld X-ray Fluorescence (HHXRF). Análisis of Gas Shale. AAPG Search and Discovery Article #90108. AAPG International Convention and Exhibition, September 12-15, 2010 Calgary, Alberta, Canadá.
- Spalletti, L., 2004. Evidencias Geológicas sobre las extinciones del límite Cretácico/Terciario. Museo, vol. 3, No.19.



Límite K/Pg en el sector norte del VMM