



**ESTUDIO DE MINERALES PESADOS Y SU APLICACIÓN EN
CORRELACIONES ESTRATIGRAFICAS Y PROCEDENCIA DE SEDIMENTOS
EN FORMACIONES CENOZOICAS DEL VALLE MEDIO DEL MAGDALENA
(VMM)**

YUDY MILENA CEPEDA URIZA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUIMICAS
ESCUELA DE GEOLOGIA
BUCARAMANGA
2010**



**ESTUDIO DE MINERALES PESADOS Y SU APLICACIÓN EN
CORRELACIONES ESTRATIGRAFICAS Y PROCEDENCIA DE SEDIMENTOS
EN FORMACIONES CENOZOICAS DEL VALLE MEDIO DEL MAGDALENA
(VMM)**

YUDY MILENA CEPEDA URIZA

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar el título de
Geóloga**

**DIRECTOR
NESTOR RAUL MORENO GOMEZ
Geólogo**

**CODIRECTOR
CARLOS ALBERTO GARCIA RAMIREZ
Geólogo, PhD.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUIMICAS
ESCUELA DE GEOLOGIA
BUCARAMANGA
2010**

DEDICATORIA

A Dios y al virgencita por ser quienes iluminan, protegen y guían mis pasos en el camino a la vida.

A mis angelitos (mamita y papito) aunque no están presentes en cuerpo, se que desde el cielo me están cuidando y apoyando.

A mi mami Marina que gracias a su sacrificio y paciencia en todos estos años de crianza y enseñanzas he logrado salir adelante.

A mis hermanos Diego, Mao, la nena, y pipe por ser mi alegría e inspiración.

A mi familia por brindarme su apoyo incondicional día a día.

A Johan por ser la personita que me acompaña en los buenos y malos momentos llenando mis días de amor y felicidad.

A mis amigos Paflow, Adrohehe, Fabimar, Aleja, Lonchis, David, Nata, Lau, Fercho, y todos aquellos con los que he compartidos momentos inolvidables y que han logrado causar una sonrisa en mi.

Y por último a mí por tener la paciencia, la responsabilidad y la capacidad para terminar con éxito este trabajo.

AGRADECIMIENTOS

Expreso los más sinceros agradecimientos:

A la Universidad Industrial de Santander, en especial a la escuela de geología y su cuerpo docente por contribuir en mi formación como profesional.

Al Instituto Colombiano del Petróleo y al grupo de investigación en estratigrafía por darme la oportunidad de conocer personas gratas y adquirir conocimientos que me llevaron a realizar mi trabajo de grado

A mis directores el Geol. Néstor Raúl Moreno Gómez y el Geol. PhD. Carlos Alberto García, por estar al frente del trabajo y compartirme sus conocimientos.

A los geólogos Jorge Rubiano, Julián Naranjo, Jaime Gelvez, Jorge Arley Meza, Johan Ortiz, Cesar Tarazona y Freddy Gallo porque me brindaron su apoyo, colaboración y conocimientos durante el trabajo.

Al personal de los laboratorios de petrología y microscopía electrónica del Instituto Colombiano del petróleo, por sus aportes y la facilidad de los equipos.

Al laboratorio Gmas, ya que en sus instalaciones fue posible llevar a cabo la concentración de los minerales pesados.

CONTENIDO

	Página
INTRODUCCIÓN	16
2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	17
2.1 Planteamiento del problema	17
2.2 Justificación del proyecto	17
3. OBJETIVOS.....	18
3.1 Objetivo General.....	18
3.2 Objetivos Específicos.....	18
4. MARCO TEÓRICO	19
4.1 Proceso Hidráulico.....	21
4.1.1 Tamaño de grano	21
4.1.2 Estabilidad Química	22
4.2 Aplicaciones.....	23
5. METODOLOGÍA	25
5.1 Fase de análisis bibliográfico.....	25

5.2 Fase de laboratorio	26
5.2.1 Concentración de minerales pesados.....	28
5.2.2 Montaje para el análisis óptico.....	32
5.2.3 Microscopia electrónica de barrido (SEM)	33
5.2.4 Conteo para determinar la abundancia y la variedad de los minerales pesados presentes en las unidades de estudio.	34
LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	35
6. MARCO GEOLÓGICO.....	37
6.1 Evolución Tectono-sedimentaria de la CVMM	37
6.2 Marco estratigráfico regional.....	39
6.3 Marco Estratigráfico del área de estudio.....	40
7. RESULTADOS	41
7.1 Identificación de zonaciones de minerales pesados	41
7.1.1 Zonaciones para las unidades Cenozoicas	41
7.1.2 Zonaciones para el Pozo La Puerta-1.....	45
7.1.3 Zonaciones para el Pozo La Cira-79	47
7.2 Correlación estratigráfica pozo-afloramiento	49
7.3 Modelo de procedencia basada en la concentración de minerales pesados ...	51
7.3.1 Posibles áreas fuentes en la secuencia Cenozoica del VMM.....	51

7.3.2 Análisis de procedencia	52
8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	57
9. BIBLIOGRAFIA	59
ANEXOS	62

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama esquemático que muestra los procesos que controlan las asociaciones de minerales pesados en las areniscas.	20
Figura 2. Metodología llevada a cabo en el estudio.....	25
Figura 3. Mapa geológico del VMM y localización de las secciones estratigráficas.	27
Figura 4. Metodología para la separación de fracciones de minerales pesados. ..	29
Figura 5. Proceso de lavado y secado muestras.	30
Figura 6. Gráfico densidad de yoduro de metileno Vs. Cantidad de acetona agregada para obtener la densidad deseada (2.8 g/ml).	30
Figura 7. Montaje de centrifugado para la separación de los minerales pesados con yoduro de metileno.....	31
Figura 8. Fracción magnética y no magnética de minerales pesados.	32
Figura 9. Montaje de los granos, para el análisis óptico	32
Figura 10. Mapa de Localización de la zona de estudio y la ubicación de las muestras de las secciones estratigráficas y pozos.	36
Figura 11. Marco Tectono -Sedimentario de la Cuenca del Valle Medio del Magdalena.	38

Figura 12. Columna generalizada del Valle Medio del Magdalena.	39
Figura 13. Columna estratigráfica de del área de estudio.....	40
Figura 14. Composición de las muestras de la Secuencia Cenozoica del VMM y asociaciones de minerales pesados	42
Figura 15. Composición de las muestras analizadas en el pozo La Puerta-1.....	46
Figura 16. Composición de las muestras analizadas en el pozo La Cira-79.....	48
Figura 17. Correlación entre la sección estratigráfica y los pozos la Puerta-1 y la Cira-79.	50
Figura 18. Localización de las posibles áreas fuentes durante el Cenozoico.	51
Figura 19. Mapa paleogeográfico, indicando las áreas de aporte de sedimento para la Formación Lisama.	52
Figura 20. Mapa paleogeográfico, indicando las áreas de aporte de sedimento para la Formación La Paz.....	53
Figura 21. Mapa paleogeográfico, indicando las áreas de aporte de sedimento para la Formación Esmeraldas.	54
Figura 22. Mapa paleogeográfico, indicando las áreas de aporte de sedimento para la Formación Mugrosa.	55
Figura 23. Mapa paleogeográfico, indicando las áreas de aporte de sedimento para la Formación Colorado.....	56

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Características generales de minerales presentes en las muestras de estudio.	19
Tabla 2. Orden de persistencia y estabilidad química de los minerales pesados según Pettijohn 1941 y 1973, los minerales están dispuestos en orden creciente.	22
Tabla 3. Listado de muestras de afloramiento y pozos.	26
Tabla 4. Relación de muestras con análisis realizados.	28

LISTA DE ANEXOS

ANEXO 1. TABLAS DE DATOS.

Tabla A1.1 Contenido (%) de estudio minerales pesados en las muestras de columna estratigráfica del VMM sinclinal de Nuevo Mundo Este.

Tabla A.1.2. Contenido de minerales pesados, pozo La Puerta-1.

Tabla A.1.3. Contenido de minerales pesados, pozo La Cira-79.

Tabla A1.4 Contenido (%) de minerales pesados según origen, de la columna estratigráfica del VMM sinclinal de Nuevo Mundo Este.

Tabla A1.5 Contenido (%) de minerales pesados traslúcidos y opacos, de la columna estratigráfica del VMM sinclinal de Nuevo Mundo Este.

Tabla A.1.6 Descripción de los principales minerales pesados presentes en las muestras de estudio.

ANEXO 2. FOTOS DE MINERALES PESADOS (MICROSCOPIO OPTICO Y SEM).

RESUMEN

TITULO: ESTUDIO DE MINERALES PESADOS Y SU APLICACIÓN EN CORRELACIONES ESTRATIGRÁFICAS Y PROCEDENCIA DE SEDIMENTOS EN FORMACIONES CENOZOICAS DEL VALLE MEDIO DEL MAGDALENA (VMM)*.

Autor: CEPEDA URIZA, Yudy Milena**

Palabras Claves: minerales pesados, Cenozoico VMM, zonas mineralógicas, procedencia, correlación estratigráfica.

En el presente trabajo de grado se llevo a cabo la implementación y evaluación de la técnica de minerales pesados como posible herramienta de correlación en áreas de baja resolución bioestratigráfica y alta variación facial, el estudio se realizo en el área piloto del Sinclinal de Nuevo Mundo, Valle Medio del Magdalena, con muestras de la secuencia sedimentaria Cenozoica. Además se analizaron los pozos la Puerta-1 y las Cira-79, ubicados al oeste del área de estudio, con el fin de realizar un amarre superficie-subsuelo.

Con base en la microscopia convencional y SEM de 51 muestras de la Secuencia sedimentaria Cenozoica, fueron definidas 16 zonas mineralógicas. La Formación Lisama muestra una zona definida por la asociación de zircón + turmalina. Formación La Paz subdivididas en dos zonas (granate + epidota) y (zircón + turmalina); así como la Formación Esmeraldas que muestran dos zonas (granate + turmalina) y (clorita + turmalina). La Formación Mugrosa compuesta por tres zonas (epidota + turmalina) y (epidota + fosfatos) y (granate + fosfatos), y finalmente la Formación Colorado exhibiendo tres zonas mineralógicas (granate + fosfatos), (zircón + carbonatos), (epidota + carbonatos).

En el pozo la Puerta-1 se definió para la Formación Mugrosa una zona de (epidota + granate) y para la Formación Colorado dos zonas (granate + epidota) y (zircón + estaurolita); mientras que para el pozo la Cira-79 en la Formación Colorado se reconocen dos zonas (epidota + granate) y (zircón + estaurolita).

Se correlacionaron zonas semejantes entre la sección estratigráfica y los pozos para las formaciones Mugrosa y Colorado, y se estableció un modelo de procedencia basado en la asociación de minerales pesados desde el Paleoceno al Oligoceno tardío, identificando fuentes de sedimento.

*Trabajo de Grado Modalidad Investigación. Convenio de Cooperación Tecnológica UIS-ICP 005 de 2007.

**Facultad de ingenierías Físico-Químicas, Escuela de Geología. Director: Geólogo, Néstor Raúl Moreno Gómez (ECOPETROL-ICP). Codirector: Ph.D. Carlos Alberto García Ramírez (UIS).

ABSTRACT

TITLE: HEAVY MINERAL STUDY AND THEIR APLICCATION IN STRATIGRAPHIC CORRELATION AND SEDIMENTS PROVENANCE ON CENOZOIC FORMATIONS FROM MIDDLE MAGDALENA VALLEY (VMM)*.

Authors: CEPEDA URIZA, Yudy Milena**

Key Words: Heavy minerals, Cenozoic VMM, mineralogical zones, provenance, stratigraphic correlation.

This work shows the results of the evaluation and implementation of heavy minerals analysis as correlation tool in sedimentary sequences with low biostratigraphic recover and/or high lateral facies variability. The analyzed samples are from the Cenozoic sedimentary sequence outcropping in the Nuevo Mundo Syncline area and from 2 wells, La Puerta-1 and La Cira-79, in the Middle Magdalena Valley.

Base on conventional and SEM microscopy of 51 samples from the Cenozoic sedimentary sequence, were defined 16 mineralogical zones. Lisama Formation shows one zone defined by the association zircon + tourmaline. La Paz Formation subdivides in two zones (garnet + epidote) and (zircon + tourmaline) as well as Esmeraldas Formation which show garnet + tourmaline zone and chlorite + tourmaline zone. Mugrosa Formation is compose by three zones (epidote + tourmaline), (epidote + phosphates) and (garnet + phosphates) and finally Colorado Formation exhibits three mineralogical zones (garnet + phosphates), (zircon + carbonates) and (epidote + carbonates).

In the well La Puerta-1 was defined one zone for the Mugrosa Formation (epidote + garnet) and two zones for the Colorado Formation (garnet + epidote) and (zircon + staurolite), meanwhile for well La Cira-79, the Colorado Formation was divided in two zones (epidote + garnet) and (zircon + staurolite).

Surface and well sections were correlated according to heavy mineral zones defined for Mugrosa and Colorado Formations. Additionally based on the heavy minerals associations a source area model was proposed for the basin evolution since Paleocene to Late Oligocene.

**Faculty of physicochemical Sciences. Geology School. Directress: Geologist, Néstor Raúl Moreno Gómez (ECOPETROL-ICP). Codirectress: Ph.D. . Carlos Alberto García Ramírez (UIS).

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo se desarrolló bajo la modalidad de investigación, enmarcado dentro del proyecto de cronología de la deformación de Cuencas Subandinas, mediante el convenio 005-2007 entre el Instituto Colombiano del Petróleo (ICP) y la Universidad Industrial de Santander, liderado por el Grupo de Investigación en Estratigrafía, con el fin de implementar y evaluar técnicas no convencionales como el análisis de minerales pesados, en conjunto con la petrografía y microscopía electrónica, para ser aplicadas en correlaciones estratigráficas en áreas de baja resolución bioestratigráfica y alta variación facial como lo es el Cenozoico en la cuenca del Valle Medio del Magdalena (VMM).

Esta secuencia está representada, por formaciones productoras de hidrocarburos, depositadas en ambientes continentales fluviales y constituidas por arenas de canal, que no tienen continuidad lateral a lo largo de la cuenca, además del bajo recobro bioestratigráfico lo cual hace difícil la correlación entre los niveles arenosos y por ende el modelamiento estratigráfico.

En los siguientes capítulos se describe la metodología que se trabajó para realizar la separación de fracciones de pesados, los análisis que controlan los procesos de identificación y conteo de los minerales para definir zonaciones en las secciones estratigráficas y en los pozos que permitan ser correlacionables y establecer un modelo de procedencia de sedimentos en estas formaciones.

2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

2.1 Planteamiento del problema

La limitada resolución estratigráfica, y la heterogeneidad litológica de estas unidades, en ocasiones no permite una definición clara de esta secuencia, por lo tanto resulta de valioso interés la aplicación de otras técnicas que soporten la información para lograr caracterizar esta secuencia y definir de mejor manera el marco cronoestratigráfico de la cuenca.

Establecer un inicio de zonas de sedimentación a fin y su relación con las facies.

2.2 Justificación del proyecto

El objetivo de este trabajo es implementar la técnica de minerales pesados como posible herramienta de correlación y análisis de procedencia de sedimentos, con el fin de dar soluciones a problemas geológicos (como la correlación estratigráfica de estos sedimentos clásticos, y la evolución tectónica de la Cuenca) de la secuencia del Cenozoico en el Valle Medio del Magdalena.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo General

- Caracterizar los minerales pesados de las formaciones Cenozoicas del Valle Medio del Magdalena (VMM) y valorar su uso en estudios de procedencia de sedimentos, y como herramienta de correlación estratigráfica.

3.2 Objetivos Específicos

- Definir patrones estratigráficos de primer orden basados en la asociación de minerales pesados presentes en las unidades de estudio.
- Identificar superficies de correlación para la Cuenca del VMM, con base en la abundancia y variedad de minerales pesados.
- Discutir la procedencia de los sedimentos de las Unidades del Terciario mediante el estudio de minerales pesados.
- Implementar y definir una metodología a seguir en futuros estudios de la técnica analítica de los minerales pesados.

4. MARCO TEÓRICO

Los minerales pesados son aquellos que presentan una densidad mayor a 2.8 g/cc (Mange & Wright, 2007).

Los minerales pesados presentan sus propias características, como se resume en la tabla 1.

Tabla 1. Características generales de minerales presentes en las muestras de estudio.

MINERAL	COMPOSICION	GRAVEDAD ESPECIFICA	ROCAS ASOCIADAS MAS COMUNES	RESISTENCIA
Zircón (Zrn)	Zr SiO ₄	4.6-4.7	Granitos, gneises, esquistos	Ultraestable
Turmalina (Tur)	(Na,Ca)(Al,Fe,Li)B ₃ Al	3.0-3.25	Granitos, gneises, esquistos	Ultraestable
	₃ (AlSi ₂ O ₉)(O,OH,F) ₄			
Rutilo (Rut)	Ti O ₂	4.18-4.25	Granitos y Gneises	Ultraestable
Dolomita-Ankerita	CaMg(CO ₃)-Ca(Mg,Fe)(CO ₃)	2,86-3.10	Pegmatitas, hidrotermal, metasomático, sed. y met.	Muy inestables
Apatitos (Ap)	Ca ₂ (F,Cl,OH)(PO ₄) ₃	3.15-3.20	Pegmatitas, venas H-T y aureolas de met. de contacto	Estable
Epidota (Ep)	Ca ₂ (Al,Fe)3(SiO ₄)3(OH)	3.35-3.45	Ortogneises y anfibolitas	Moderadamente estable
Esfalerita (Sph)	ZnS	4.10	Pegmatitas, venas H-T, sedimentarias y met.	
Esfena (titanita) (Ttn)	CaTiSiO ₅	3.4-3.55	Granitos y gneises	Moderadamente estable
Granate (Grt)	Fe ₃ Al ₂ (SiO ₄) ₃	4.25	Esquistos micáceos	Estable
Sillimanita (Sil)	Al ₂ SiO ₅	3.23	Paragneises con muy alto grado metamórfico	Moderadamente estable
Clorita (Chl)	(Mg, Al, Fe) ₁₂ [(Si,Al) ₈ O ₂₀](OH) ₁₆	2.60-3.30	Rocas de bajo grado de metamorfismo	Moderadamente estable
Augita (Aug)	Ca(Mg,Fe,Al)(Al,Si) ₂ O ₆	3.2-3.4	Basaltos, Gabbros, gneises	Inestable
Estauroлита (St)	FeAl ₄ Si ₂ O ₁₀ (OH) ₂	3.65-3.75	Esquistos y gneises	Estable
Espinela (Spl)	(Mg, Fe ²⁺ , Zn, Mn)Al ₂ O ₄	5.09	Rocas ultramaficas, rocas de alto grado de metamorfismo	Inestables

Fuente: Modificado de Mange y Maurer, 1992.

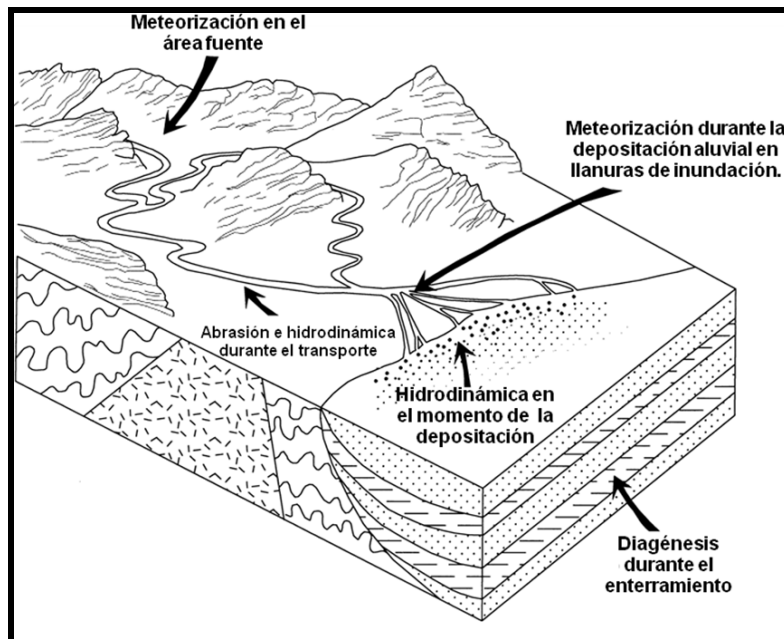
Las fracciones de estos minerales en los sedimentos se componen de diversas especies, en el que cada grano expresa su propia historia, y el geólogo mediante los análisis de estos, los aplica a:

1. *Determinar de procedencia:* reconstrucción de la naturaleza y características de las aéreas fuentes.
2. *Indican la dirección de transporte de sedimento:* complementan los análisis de paleocorrientes.
3. *Cartografía de los patrones de dispersión de sedimentos.*

4. Delineación de provincias petrológicas sedimentarias. Esquematización y correlación de cuerpos arenosos, especialmente estratos estériles.
5. Indica la acción de regímenes hidráulicos y la concentración de los procesos.
6. Aclarar los procesos diagenéticos.
7. Localizar los depósitos de potencial económico. (Mange y Maurer, 1992).

La composición de los minerales es reflejo de las condiciones físicas y químicas en el momento de cristalización. Además la morfología y la estructura de los granos son indicadores de petrogénesis, por lo cual son de aplicación para estudios de procedencia (Morton, 1999). Sin embargo la composición del conjunto de minerales pesados no es totalmente controlada por la mineralogía de la roca fuente porque otros procesos que operan durante el ciclo de sedimentación (principalmente la erosión, hidrodinámica y diagénesis) pueden sobrecargar la señal de procedencia (Ratcliffe, 2004) (Figura. 1).

Figura 1. Diagrama esquemático que muestra los procesos que controlan las asociaciones de minerales pesados en las areniscas.



Fuente: Modificado de Morton, 1999.

El digrama muestra los procesos por los cuales están controlados los minerales pesados en los sedimentos, algunos de estos procesos causan lo siguiente:

- La meteorización de la roca madre causa la modificación de la mineralogía de la roca fuente antes de la incorporación en el sistema de transporte a través de la disolución selectiva.
- Durante el transporte, los minerales se pierden de forma selectiva a través de la abrasión mecánica y la meteorización durante periodos de almacenamiento antes de la depositación.
- Los procesos hidráulicos durante el transporte y en el momento de la deposición afectan en gran medida la abundancia relativa de los minerales con comportamientos hidráulicos diferentes.
- La diagénesis de enterramiento elimina selectivamente minerales inestables como resultado en el cambio de las condiciones fisicoquímicas.

4.1 Proceso Hidráulico

En 1933 Rubey, formuló la teoría de la *equivalencia hidráulica* que establece que los granos con diferentes tamaños y densidades, pero que presentan la misma velocidad de sedimentación, se depositarán en las mismas condiciones. Por lo cual involucra la definición de *tamaño hidráulico equivalente* como la diferencia de tamaños entre una especie de minerales pesados y una esfera de cuarzo, con la misma velocidad de sedimentación en el agua. Una serie de estudios han comprobado que hay una fuerte correlación entre los parámetros de tamaño hidráulico equivalente y la densidad (Morton, 1999).

El comportamiento hidráulico de los minerales pesados es un tema muy complejo que involucra varios factores, principalmente se rige por el tamaño de grano y la densidad, aunque la morfología es otro factor muy significativo. El transporte y la depositación de los minerales pesados también dependen de cuantos granos son arrastrados por el flujo, la naturaleza del medio de transporte y el modo de dispersión dentro del medio de transporte.

4.1.1 TAMAÑO DE GRANO

El tamaño individual de los minerales pesados y el tamaño promedio de los granos en los sedimentos son controlados por factores que operan en ambientes

depositacionales, un rango uniforme de tamaño de grano adecuado para todos los análisis de minerales pesados, no se puede establecer (Mange y Maurer, 1992). Para este proyecto se utilizó un tamaño de grano de fino a muy fino, donde se obtuvo un buen recobro de minerales pesados.

4.1.2 ESTABILIDAD QUÍMICA

Los minerales que se forman a elevadas temperaturas y presión son menos estables frente a la meteorización.

Por lo tanto el orden de estabilidad (tabla 2) tiene una relación inversa al de la serie de reacción de Bowen.

Tabla 2. Orden de persistencia y estabilidad química de los minerales pesados según Pettijohn 1941 y 1973, los minerales están dispuestos en orden creciente.

Orden de Persistencia Modificado de Pettijohn (1941)	Estabilidad química Pettijohn et al. (1973)
olivino	Muy inestables
sillimanita	olivino
piroxeno	Inestables
esfena	horblenda
andalusita	actinolita
Ca-anfiboles-glaucofana-serie riebeckita	augita
epidota	diopsido
cianita	hyperstena
estauroлита	andalusita
monazita	Moderadamente estables
xenotima	epidota
apatito	cianita
granate	granate (ricos en Fe)
turmalina	sillimanita
rutilo	esfena
	zoisita
	Estables
	apatito
	granate (pobres en
	estauroлита
	monazita
	Ultraestables
	rutilo
	zircón
	turmalina
	anatasa

Fuente: Modificado de Mange y Maurer, 1992.

4.2 Aplicaciones

La aplicación y el avance de las técnicas analíticas tales como AFTA, ZFT, análisis isotópicos y químicos en zircones, opacos y apatitos que reflejan edades y cambios fisicoquímicos en las rocas. Así como también los desarrollos y avances en el conocimiento de la evolución de cuencas y en la exploración de recursos minerales.

Los siguientes son algunos ejemplos de estudios de minerales pesados que muestran la versatilidad y la amplia aplicación.

- Los estudios de minerales pesados han tenido su aplicabilidad desde el siglo pasado en diferentes partes del mundo, pero en la Cuenca del Valle Medio del Magdalena (CVMM), ha sido utilizado para identificar marcadores regionales estratigráficos, hay reporte de los años 20's de que se utilizaba como marcador en pozos, en los años 30's y 50's se realizaron las primeras correlaciones y en los 80's se aplico como herramienta para corregir anomalías en los registros eléctricos.
- Los minerales pesados en las cuencas modernas proporcionan análogos actuales que conducen a la comprensión de la historia geológica de sus homólogos antiguos, demostrando la correlación de las áreas fuentes, procesos de transporte y cinco provincias de minerales pesados en los sedimentos superficiales del Mar Norte Meridional (Baak, 1936).
- El análisis de minerales pesados, apoyado de la petrografía, permitieron identificar las composiciones de las áreas fuente de las rocas, así como indicar la distancia relativa de estas al sitio de depósito en el Sinclinal de Usme, Colombia (Montenegro, 2008).
- El estudio de Van Andel (1955) en los sedimentos del delta del Ródano es un ejemplo de cómo los minerales pesados se pueden utilizar para indicar los patrones de distribución de los sedimentos en un río dentro de un sistema de deltas.
- Con denso muestreo en pozos espaciados estrechamente, se realizó una precisa correlación estratigráfica de zonas de minerales pesados en el Valle de San Joaquín, California (Reed & Bailey, 1927).
- Mediante microsonda electrónica determinaron la química de los minerales pesados, principalmente se analizaron el granate y la turmalina para ser utilizados como indicadores de procedencia en formaciones del Mesozoico

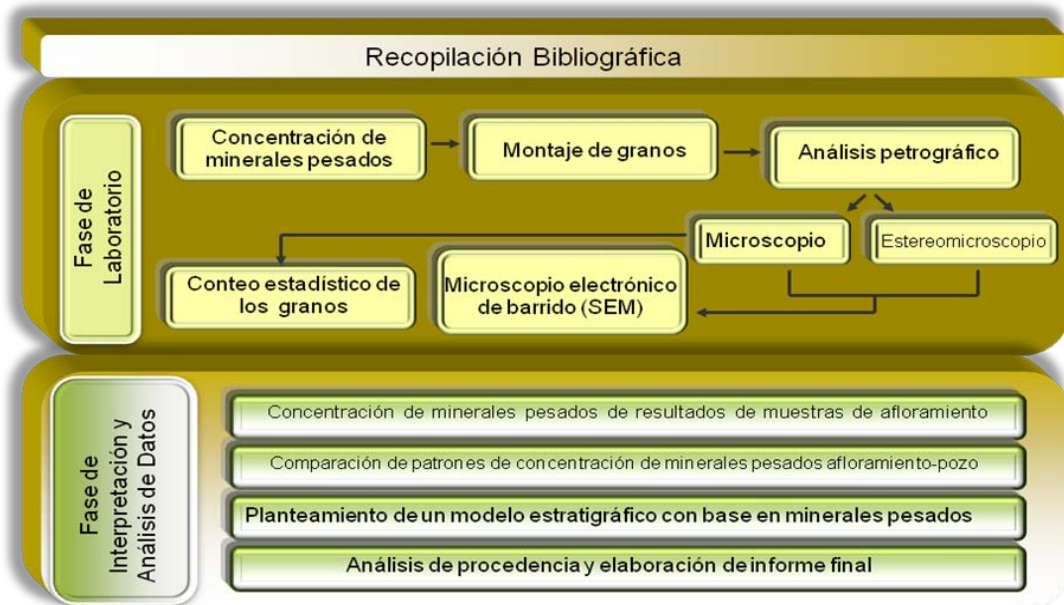
y Terciario en el pozo Ventura-B en la costa afuera de Nueva Escocia, Canadá (Kettanah, 2006).

La contribución de los estudios de minerales pesados en la solución de los problemas en el análisis de cuencas, la exploración de petróleo y manejo de los yacimientos es considerable (Mange y Maurer, 1992).

5. METODOLOGÍA

El trabajo siguió una metodología (Figura 2), que está conformada por una serie de fases que se describen a continuación.

Figura 2. Metodología llevada a cabo en el estudio.



Fuente: Autor

5.1 Fase de análisis bibliográfico

En esta fase se realizó una recopilación y análisis de información relacionada con la secuencia Cenozoica del VMM, así como estudios de minerales pesados, y algunas técnicas analíticas que se puedan asociar a estudios de procedencia.

Esta información se obtuvo de lugares como la biblioteca de la Universidad Industrial de Santander (UIS), el Centro de Información Técnica (CIT) del Instituto Colombiano del Petróleo (ICP) y en consulta de algunas bases de datos.

5.2 Fase de laboratorio

El objetivo de esta fase fue seguir unas etapas que puedan apoyar los análisis de estos minerales pesados, con el fin de realizar una serie de asociaciones para la caracterización de la secuencia en estudio (tabla 3 y 4).

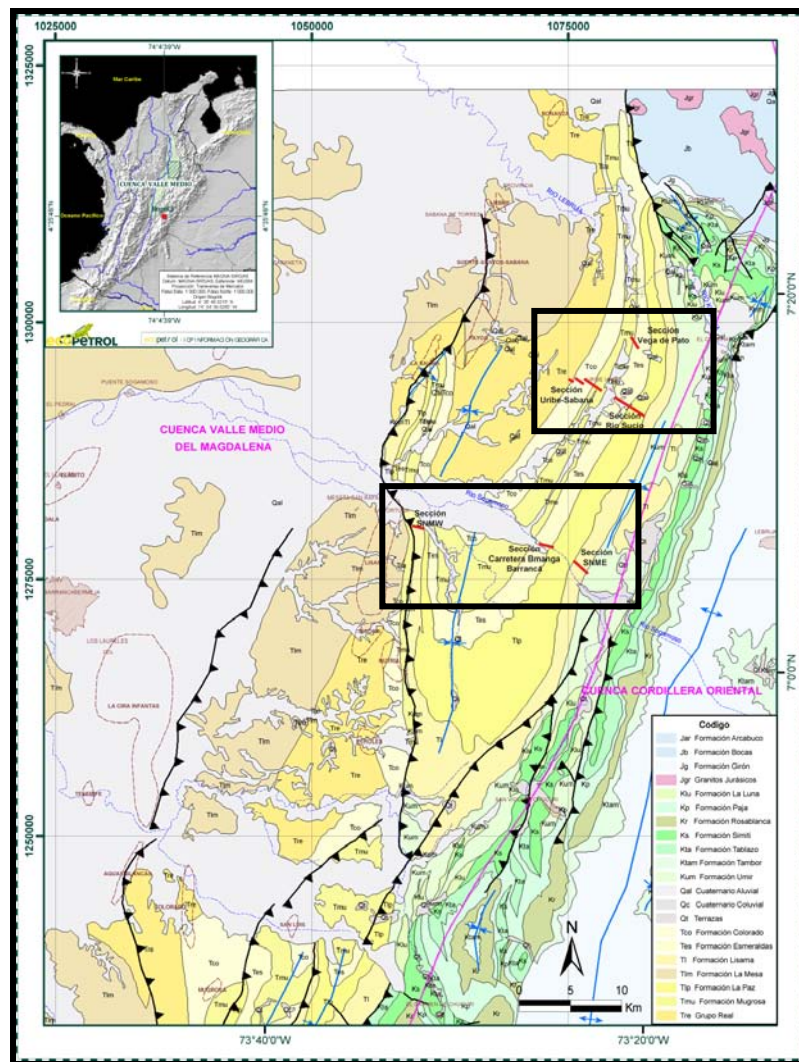
Tabla 3. Listado de muestras de afloramiento y pozos.

AFLORAMIENTO			POZOS		
Formación	Sección estratigráfica	Muestras	Formación	La Puerta-1	La Cira-79
COLORADO	URIBE-SABANA	US-188-P	COLORADO	Muestras	Muestras
	URIBE-SABANA	US-044-MP		2650-56	1275
	URIBE-SABANA	US-048-MP		2689-94	1419
	URIBE-SABANA	US-304-MP		2752-59	1500
MUGROSA	SANTA CLARA	SC-011-P		2814-2705	1517-20
	SANTA CLARA	SC-517-P		2825-30	1553
	URIBE-SABANA	US-022-P		2838-43	1595
ESMERALDAS	RIO SUCIO	RS-594-P		2846-51	1605-09
	Carretera Bucaramanga - Barrancabermeja	CB-397-P		2870-75	1701
	RIO SUCIO	RS-627		2919-25	1709
LA PAZ	RIO SUCIO	RS-624		3037-42	
	Carretera Bucaramanga - Barrancabermeja	CB-785		3131-36	
	RIO SUCIO	RS-059-AFTA		3415-19	
	RIO SUCIO	RS-123-P		3419-25	
LISAMA	SINCLINAL NUEVO MUNDO ESTE (SNME)	SNME-CB27-01		3474-79	
		SNME-CB60-01		3488-93	
	SINCLINAL NUEVO MUNDO OESTE (SNMW)	SNMW-L6-01		3539-44	
		SNMW-L7-05		3570-73	
		SNMW-L71-02		3691-95	
		SNMW-L87-01		3799-3805	
		MUGROSA	4830-4840		
		MUGROSA	5046-5054		
MUGROSA	5569-5580				

Fuente: Autor

Las muestras de afloramiento fueron seleccionadas por el proyecto de investigación de cronología de la deformación de cuencas Subandinas, tomadas en Formaciones Cenozoicas en el área piloto del Sinclinal de Nuevo Mundo (SNM), se tomo como base el levantamiento detallado de dos secciones estratigráficas de la Formación Lisama en cada uno de los flancos del SNM (Ruiz et al., 2008); y de dos secciones compuestas (Figura.3) en el flanco Este del Sinclinal de Nuevo Mundo (SNME) una de las Formaciones La Paz y Esmeraldas y la otra de las Formaciones Mugrosa y Colorado (GEMS, 2009), además se analizaron ópticamente las muestras del subsuelo pertenecientes a los pozos (La Cira-79 y La Puerta-1) las cuales fueron procesadas por la compañía Holandesa SHELL, en los años 40's.

Figura 3. Mapa geológico del VMM y localización de las secciones estratigráficas.



Fuente: Tomado de ECOPETROL-ICP Información geográfica, 2009.

5.2.1 CONCENTRACIÓN DE MINERALES PESADOS

La concentración de los minerales pesados fue llevada a cabo en el laboratorio de geología, geoquímica, y geofísica “Gmas”, en la ciudad de Bogotá, en este proceso se separaron 20 muestras de la secuencia Cenozoica de la CVMM (tabla 5).

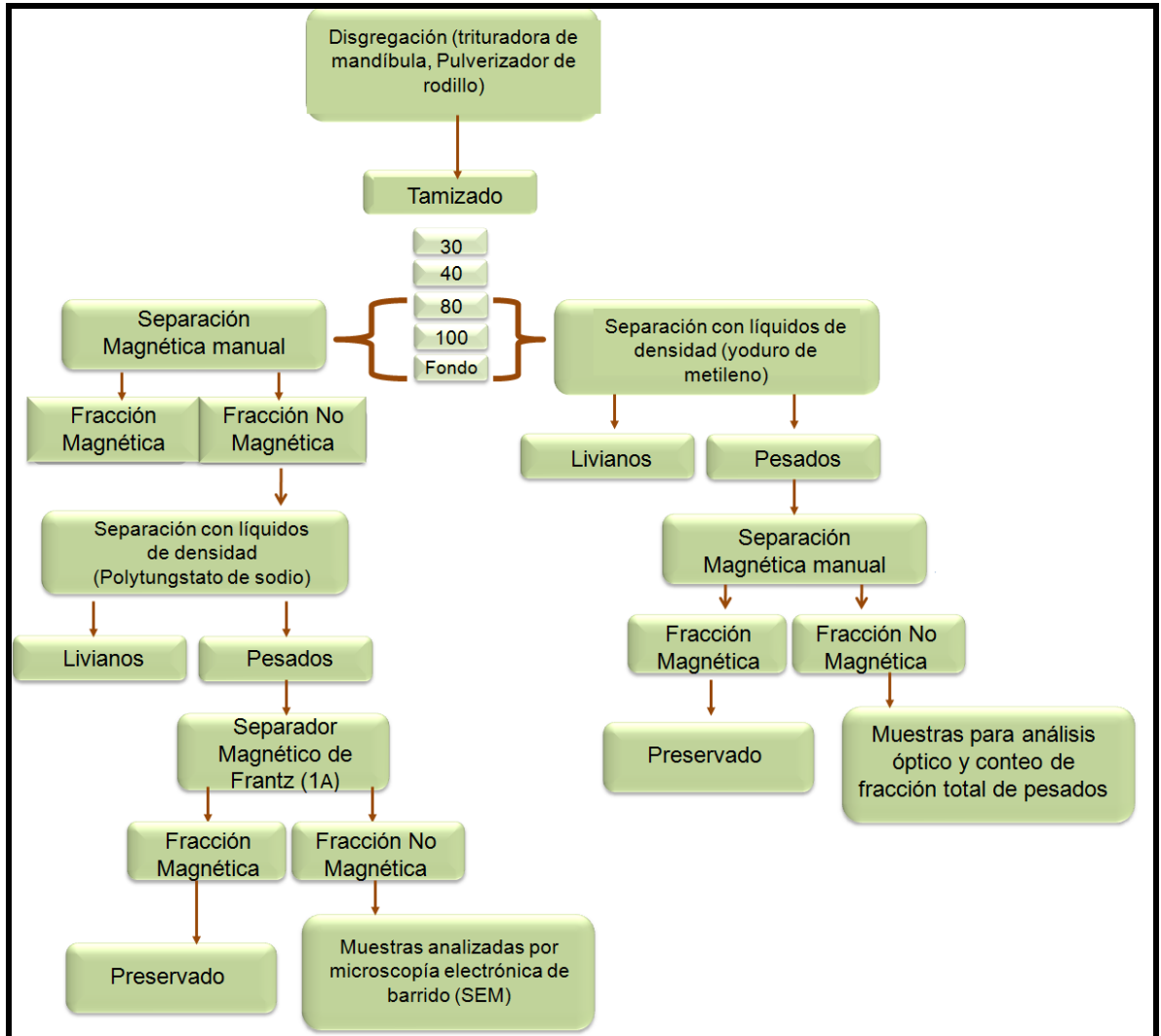
Tabla 4. Relación de muestras con análisis realizados.

Formación	Muestras	SEM	Análisis Óptico
COLORADO	US-188-P		X
	US-044-MP	X	X
	US-048-MP	X	X
	US-304-MP	X	X
MUGROSA	SC-011-P	X	X
	SC -517-P		X
	US-022-P		X
ESMERALDAS	RS-594-P		X
	CB-397-P		X
	RS-627	X	X
LA PAZ	RS-624	X	X
	CB-785	X	X
	RS-059-AFTA		X
	RS-123-P		X
LISAMA	SNME-CB27-01	X	X
	SNME-CB60-01	X	X
	SNMW-L6-01	X	X
	SNMW-L7-05	X	X
	SNMW-L71-02	X	X
	SNMW-L87-01	X	X

Fuente: Autor

En la elaboración del proyecto se evaluaron dos metodologías para obtener las fracciones de minerales pesados, una que se utilizó para los análisis por microscopía electrónica (SEM) donde se procesaron 13 muestras, y la otra donde se concentraron 20 muestras incluyendo las anteriores para análisis óptico (figura 4).

Figura 4. Metodología para la separación de fracciones de minerales pesados.



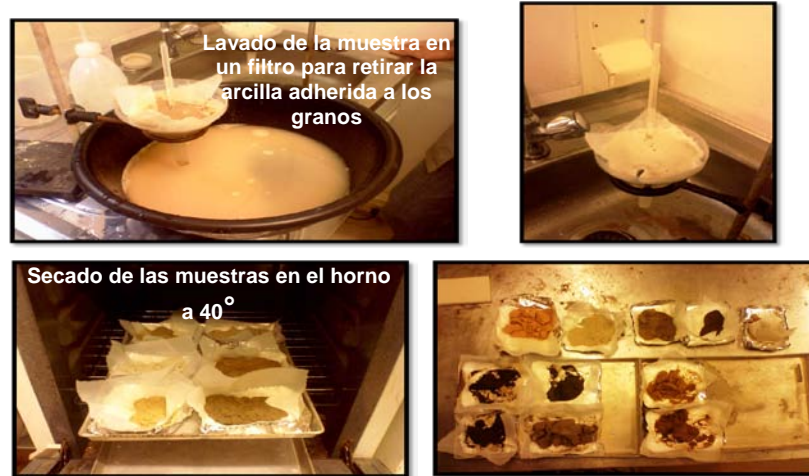
Fuente: Autor

A continuación se da una descripción de cómo se desarrollo la metodología especialmente la que se utilizo para el análisis óptico ya que con esta se obtuvo la fracción total de pesados, que se necesita para llevar a cabo este estudio.

1. Las muestras fueron llevadas a una trituradora de mandíbula y fueron tamizadas en unas mallas de 30, 40, 80, 100 y fondo, se escogió observando en el estéreomicroscopio la malla en la cual los granos están sueltos.

2. La malla escogida (80, 100 y fondo), fueron colocadas en ultrasonido por 20 minutos para desprender la arcilla adherida a los granos y posteriormente ser lavadas en un filtro y secadas en un horno a 40° como se observa en la figura. 5.

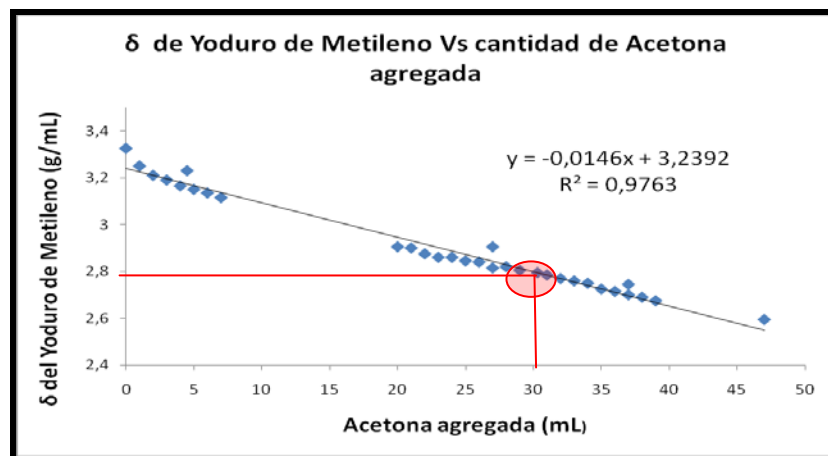
Figura 5. Proceso de lavado y secado muestras.



Fuente: Autor

3. Cuando las muestras están secas, se reduce la densidad yoduro de metileno de 3.3 g/ml hasta obtener 2.8 g/ml, que es la deseada para la concentración de minerales pesados, para esto se adiciona aproximadamente 30 ml de acetona (Figura. 6).

Figura 6. Gráfico densidad de yoduro de metileno Vs. Cantidad de acetona agregada para obtener la densidad deseada (2.8 g/ml).



Fuente: Tomado del laboratorio Gmas, 2010.

4. Obtenida la densidad requerida (2.8 g/ml) del yoduro de metileno, se da paso a la concentración de los pesados, con un montaje de centrifugado donde se espera la separación de fracciones pesadas de livianas, teniendo en cuenta los estandartes de seguridad, como realizar este proceso dentro de una campana de extracción para que los vapores que produce el yoduro de metileno no sean absorbidos a través de la piel y por ingestión, ya que es un líquido nocivo para la salud (Figura. 7).

Figura 7. Montaje de centrifugado para la separación de los minerales pesados con yoduro de metileno.



Fuente: Autor

5. El yoduro de metileno es colocado junto con la muestra en un embudo donde se agita con una varilla para que los granos de minerales pesados se desplacen al fondo; el paso del yoduro de metileno y de los granos es controlado por unas pinzas de Mohr, utensilio que se utiliza para obstruir el paso de un líquido o gas a través de un tubo látex como se observa en la figura 7.

Al quitar las pinzas la fracción pesada cae a un papel filtro, el cual está debidamente marcado con el código de cada muestra, y el erlenmeyer, está destinado a recoger el yoduro de metileno filtrado.

6. Los granos pesados concentrados son lavados con acetona para quitar residuos del líquido denso y posteriormente se realiza una separación con imán de mano, de acuerdo con Friedman, 1958, para obtener dos fracciones una magnética y la otra no magnética las cuales son colocadas en recipientes previamente marcados (figura. 8).

7. La fracción no magnética se utilizo para realizar los análisis posteriores.

Figura 8. Fracción magnética y no magnética de minerales pesados.



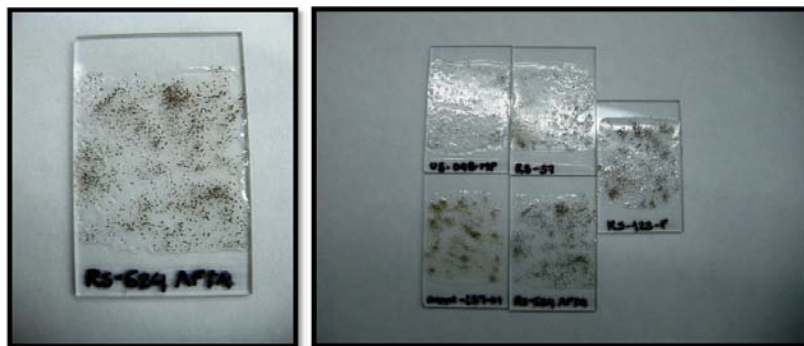
Fuente: Autor

La metodología con la cual se realizaron los análisis de SEM no fueron muy satisfactorios debido a que se obtuvo una fracción más específica de pesados (zircones y apatitos), ya que se pasaron las muestras por el separador isodinámico Frantz a 1 A, la variación del amperaje, la inclinación horizontal y vertical, permiten la separación de los minerales de acuerdo a la susceptibilidad magnética de cada uno, por lo cual se obtienen fracciones específicas para ciertos tipos de estudios como por ejemplo datación de zircones y apatitos.

5.2.2 MONTAJE PARA EL ANÁLISIS ÓPTICO

Para el montaje de los granos se aplicó resina epóxica a los porta objetos para posteriormente distribuir los granos, este se realizó en el laboratorio de preparación de muestras geológicas de la Universidad Industrial de Santander (Figura. 9).

Figura 9. Montaje de los granos, para el análisis óptico



Fuente: Autor.

La fracción no magnética de minerales pesados fue observada y analizada, a través de un microscopio óptico de luz transmitida Nikon Eclipse LV100POL, ubicado en el laboratorio de petrología del Instituto Colombia del petróleo, ECOPETROL-ICP.

5.2.3 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM)

La técnica de microscopia electrónica de barrido (SEM) proporciona un análisis con más datos (composición y morfología) de los que se obtienen por las técnicas convencionales de microscopia óptica, sin embargo la combinación de estas técnicas permite un análisis más completo de los minerales (Arthur B. *et al* 1972).

Este estudio se realizó con el microscopio electrónico Leo 1450VP equipado con sistema de rayos X por energía dispersa de alto vacío, ubicado en el laboratorio de microscopia electrónica de barrido del Instituto Colombiano del Petróleo, ECOPETROL-ICP, este análisis se llevo a cabo con el fin de llevar un control en el proceso de identificación de minerales.

Para trabajar las muestras en SEM, estas se deben ser recubiertas con oro o con grafito, estos proporcionan conductividad y evita la acumulación de carga. En este caso las muestras solo fueron recubiertas con grafito para evitar interferencias en el análisis elemental y así obtener una mejor resolución de esta.

Posteriormente la muestra es barrida con los electrones que viajan a través del cañón. Un detector mide la cantidad de electrones enviados que arrojan la intensidad de la zona de muestra, siendo capaz de mostrar las figuras en tres dimensiones proyectando una imagen de televisión.

Las imágenes observadas se obtuvieron usando un detector de electrones retrodispersos (BSE) o primario, debido a que este extrae de la muestra electrones mas internos y permite ver la parte composicional de la muestra y la morfología con mejor resolución por medio de contrastes, estos dependen principalmente del número atómico promedio, es decir, las zonas más claras corresponden a número atómico elevado, en tanto que las oscuras pertenecen a números atómicos bajos.

Para realizar el análisis por SEM, se montaron las muestras sobre un portaobjetos con goma tragacanto, y para la selección de los granos se realizo una malla de 50 rectángulos por línea, y así elegir los minerales por medio de la observación en el estéreomicroscopio y el microscopio óptico.

5.2.4 CONTEO PARA DETERMINAR LA ABUNDANCIA Y LA VARIEDAD DE LOS MINERALES PESADOS PRESENTES EN LAS UNIDADES DE ESTUDIO.

Para realizar el conteo de los minerales pesados, se utilizan tres metodologías (Van Harten 1965, Galehouse 1969, 1971).

- *Line counting*: En esta metodología el portaobjetos es colocado en la platina del microscopio y es movido a lo largo de líneas, con el fin de contar e identificar los granos que son interceptados por el punto de mira.
- *Ribbon counting*: La técnica se trata de seleccionar bandas en el portaobjetos al azar y así contar e identificar los granos que estén en estas.
- *Fleet method*: El método consiste en contar todos los granos. (Fleet, 1926).

La metodología que se utilizo para este estudio fue *line counting*, debido a que se pudo realizar un barrido equidistante en la vertical y contar e identificar los minerales pesados interceptados por el punto de mira en la horizontal y así poder tener una abundancia relativa más precisa, esta técnica fue llevada a cabo con el microscopio óptico Nikon Eclipse LV100POL, ubicado en el laboratorio de petrología del Instituto Colombiano del petróleo, ECOPETROL-ICP.

El conteo de 300 puntos se baso en la metodología de Mange and Maurer, 1992, identificando minerales pesados, aquellos que se presentaron en un porcentaje menor al 1% fueron colocados como otros.

LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La Cuenca del Valle Medio del Magdalena se localiza a lo largo del sector central del valle del río Magdalena entre las Cordilleras Central y Oriental, y está limitada al norte por la Falla de Bucaramanga, y al sur por la Falla de Cambao en el departamento de Caldas, presenta una extensión de de 32949 km².

El estudio se llevo a cabo en Sinclinal de Nuevo Mundo, estructura de forma elongada e inmersión hacia el norte asociado al cabalgamiento de la falla La Salina, se localiza en el sector nororiente de la Cuenca Valle Medio Magdalena (CVMM), entre las coordenadas con origen Bogotá (E:1056000 a E:1085000 y N:1255000 a N:1320000) (Caballero, 2010) (Figura. 10).

6. MARCO GEOLÓGICO

6.1 Evolución Tectono-sedimentaria de la CVMM

Varios autores proponen un modelo Tectono-Sedimentario del VMM, donde lo importante a destacar es la configuración que ha tenido esta Cuenca en varios tiempos geológicos.

El modelo que se presenta es el propuesto por Cooper, en 1995. (Figura. 11), donde sobresale el cambio que se dio desde el Paleoceno, pasando por una Cuenca Foreland a una de tipo Intramontaña, limitada por las dos Cordilleras Central y Oriental.

Cada uno de estos estadios de evolución se caracteriza por un estilo propio de deformación y una correspondiente sucesión estratigráfica. (Gómez, 2005). A la vez se presenta una íntima relación entre la tectónica y la sedimentación, la cual tiene importantes implicaciones en la geología del petróleo de la cuenca. (Dengo, 1993).

- Cuenca Pericratónica (Cretáceo – Paleoceno).

El principal evento es la subsidencia continua relacionada a la apertura de la cuenca como efecto del evento del megagraben activo. La cuenca se rellenó de sedimentos depositados en ambientes transicionales a marinos someros. La Formación Lisama del Paleoceno representa la regresión final y abandono de los ambientes marinos.

- Cuenca Antepaís (Eoceno – Mioceno temprano).

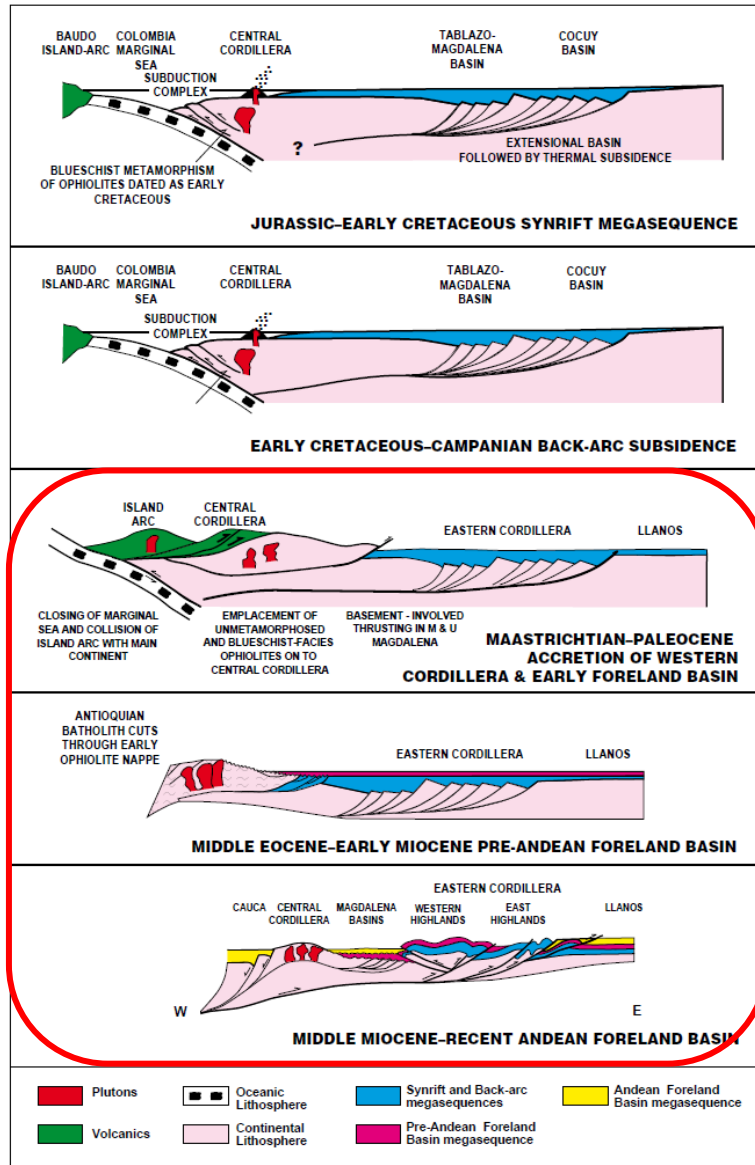
La cuenca se rellenó de sedimentos cuya depositación fue controlada por el levantamiento de la Cordillera Central y su vergencia tectónica hacia el Este. (Cooper, 1995). A la base de esta secuencia se presenta la discordancia regional del Eoceno y la mega secuencia depositada sobre esta, involucra rocas fluviales de las formaciones la Paz, Esmeraldas, Mugrosa y Colorado. La principal fuente de sedimentos fue la cordillera Central, el Macizo de Santander y los paleoaltos de La Cira y Cáchira.

- Cuenca Intramontaña (Mioceno).

El principal evento tectónico fue la Orogenia Andina. El levantamiento de la Cordillera Oriental significó el inicio de la cuenca intramontaña del Magdalena,

limitada al oeste por la Cordillera Central y al este por el Piedemonte Occidental de la Cordillera Oriental.

Figura 11. Marco Tectono -Sedimentario de la Cuenca del Valle Medio del Magdalena.

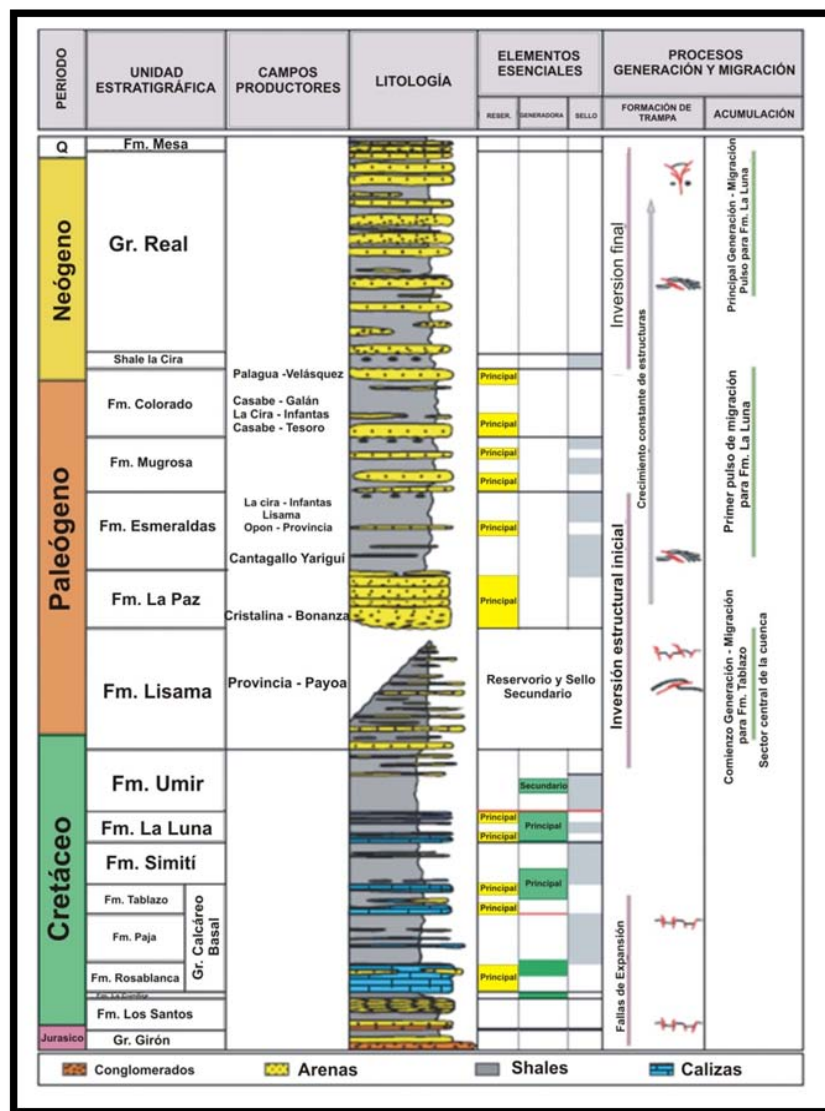


Fuente: Tomado de Cooper, 1995.

6.2 Marco estratigráfico regional

El registro sedimentario muestra una sucesión de depósitos continentales del Jurásico superponiendo sedimentos del Cretácico, a la vez los calcáreos y siliciclásticos son de origen transicional a marino. La secuencia Paleógeno está formado por rocas siliciclásticas depositadas principalmente bajo condiciones continentales con cierta influencia marina (Figura. 12).

Figura 12. Columna generalizada del Valle Medio del Magdalena.



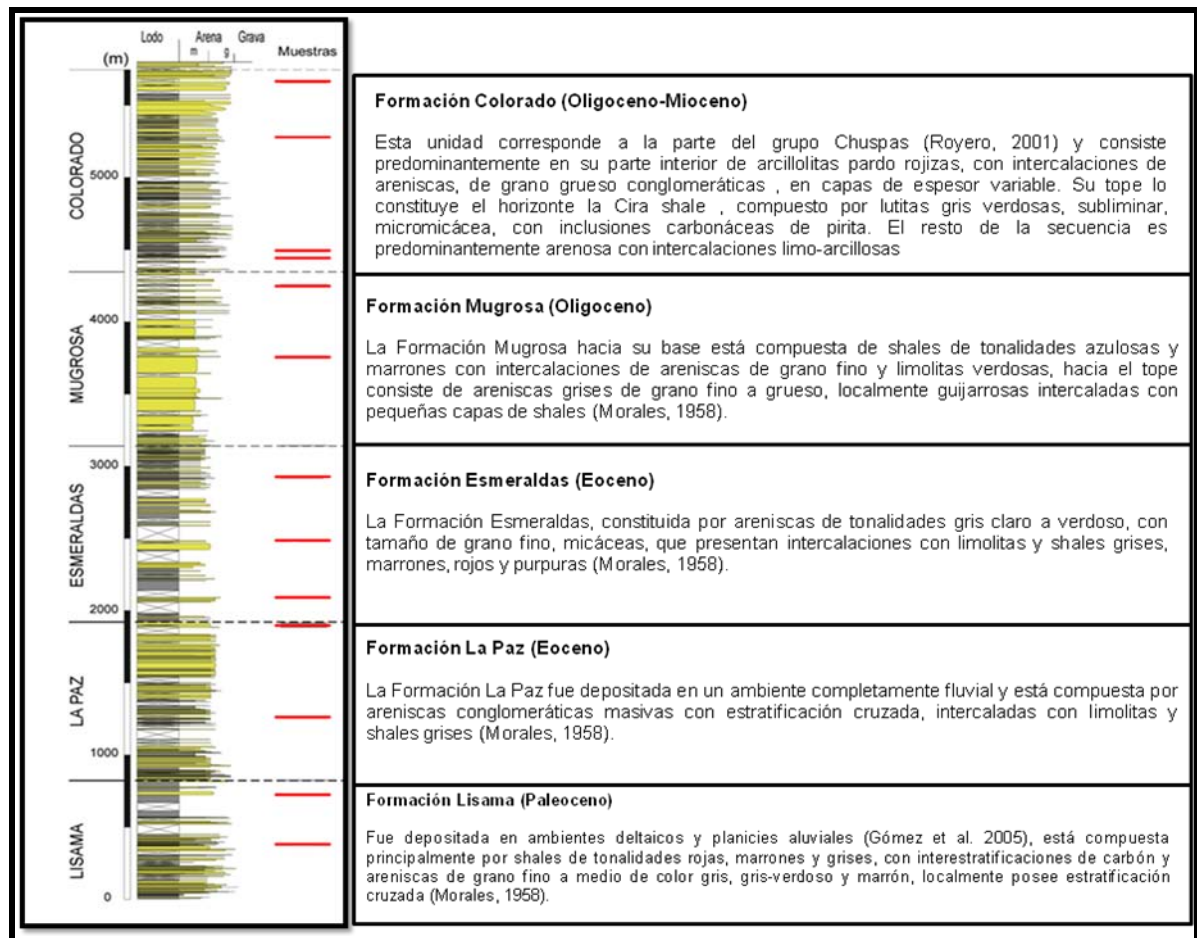
Fuente: Modificado de Barrero, *et al*, 2007.

6.3 Marco Estratigráfico del área de estudio

Las muestras de este estudio hacen parte de la secuencia Cenozoica dentro del sinclinal de Nuevo mundo, VMM.

La secuencia Cenozoica está representada por la Formaciones Lisama, La Paz, Esmeralda, Mugrosa, Colorado y Real (Figura.13). Estas unidades contienen las principales rocas reservorio, depositadas en ambientes fluviales, y representadas por areniscas de canales, que no guardan continuidad lateral a lo largo de la Cuenca, lo cual dificulta su correlación y modelamiento estratigráfico (Rodríguez, 2008)

Figura 13. Columna estratigráfica de del área de estudio.



Fuente: Modificada de Gems, 2009.

7. RESULTADOS

Los resultados a presentar en este capítulo, son las interpretaciones de los análisis realizados en el transcurso del proyecto, a partir de los análisis y conteo de minerales pesados a lo largo del SNM.

7.1 Identificación de zonaciones de minerales pesados

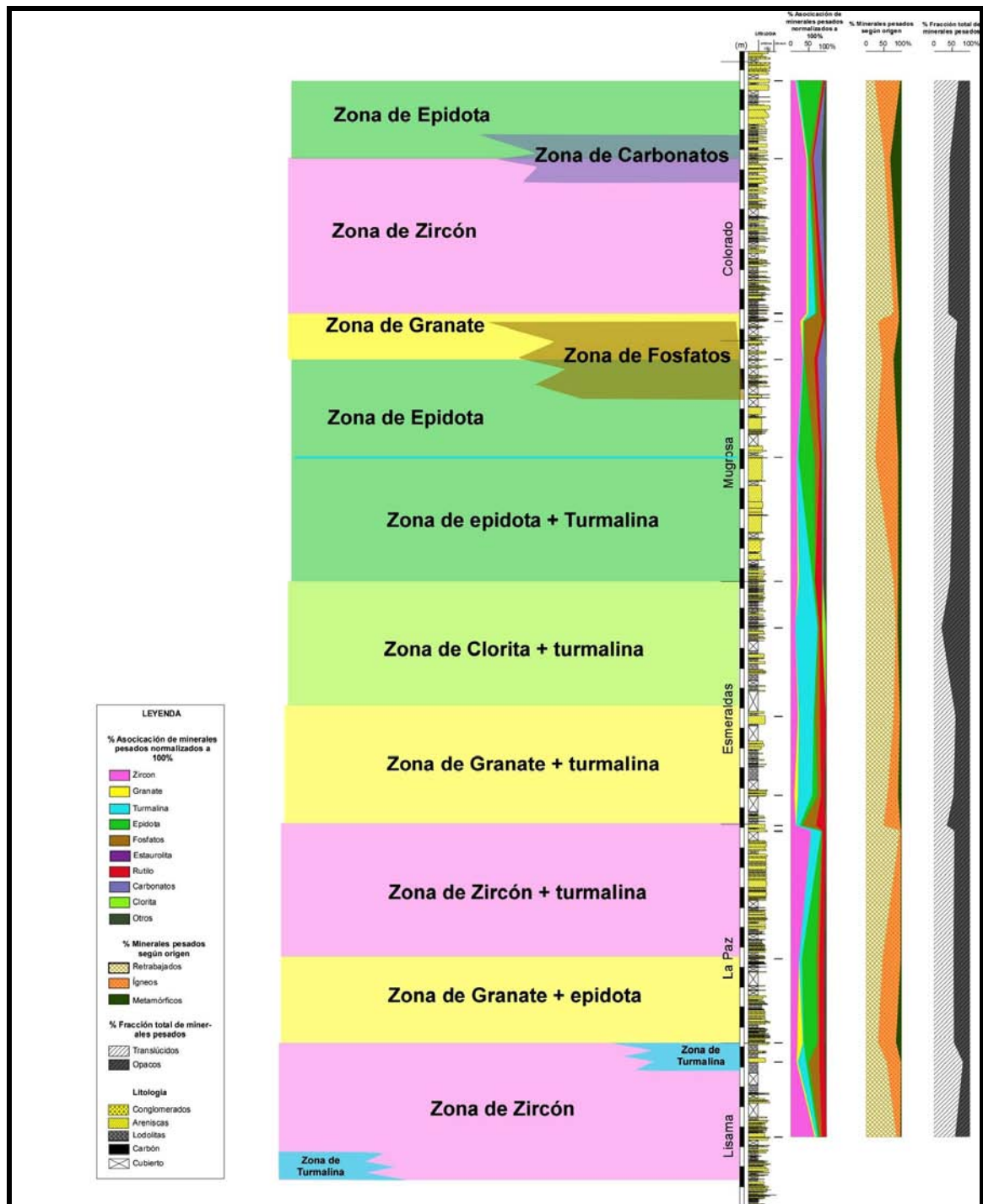
A continuación se presentan gráficos de porcentajes a nivel estratigráfico con el fin de definir diferencias entre las unidades, basadas en los cambios que presenten los minerales pesados.

7.1.1 ZONACIONES PARA LAS UNIDADES CENOZOICAS

En la figura 14 podemos observar las diferentes asociaciones para cada unidad, el contenido (%) de los minerales presentes, el porcentaje de minerales retrabajados, ígneos y metamórficos (Anexo 1 tabla A1.4), además de los porcentajes de traslúcidos y opacos (Anexo 1 tabla A1.4), que constituyen a las formaciones Cenozoicas.

Para obtener estas asociaciones se realizó un conteo de 300 puntos para cada muestra los resultados se encuentran en el anexo 1. tabla A1.1.

Figura 14. Composición de las muestras de la Secuencia Cenozoica del VMM y asociaciones de minerales pesados



Fuente: Autor

En el gráfico podemos observar las variaciones de los minerales pesados que han tenido lugar dentro de las unidades terciarias, las principales variaciones son las siguientes:

Formación Lisama:

- **Zona de zircón (Zr)+turmalina (Tur).**

Esta zona se caracteriza por el aumento de zircón (37%) hacia la base de la zona propuesta, mientras que hacia el tope hay un aumento de turmalina (12%), esto para el SNME.

Para el SNMW el aumento se presenta un aumento de zircón (19%) hacia la base de la zona y un aumento de turmalina (18%) hacia la base contrario al SNME, lo que nos indica que los dos flancos no necesariamente presentan la misma composición de minerales pesados.

Formación La Paz: Para esta Formación se definieron dos zonas.

- **Zona de granate (Grt)+epidota (Ep).**

Esta zona se caracteriza por la concentración de granate (9%) y epidota (22%) en la base de la Formación la Paz y el tope de Lisama.

- **Zona de zircón (Zr)+turmalina (Tur).**

Dentro de esta zona se observa un aumento de zircón (31%), turmalina (15%), hacia el tope de la Formación La paz.

Formación Esmeraldas: Para esta Formación se definieron dos zonas

- **Zona de granate (Grt)+turmalina (Tur).**

La zona se caracteriza por la presencia hacia la base de la Formación Esmeraldas del granate (2%) y la concentración de turmalina (18%).

- **Zona de clorita (Chl)+ turmalina (Tur).**

La presencia de clorita (6%) y el aumento de turmalina (33%) hacia el tope de la Formación Esmeraldas, caracterizan esta zona.

Formación Mugrosa: se definieron 3 zonas.

- **Zona de Epidota (Ep)+ turmalina (Tur).**

La zona se caracteriza por el aumento de epidota (24%) en el tope de esta zona y un aumento de turmalina (12%) hacia la base de la Formación Mugrosa.

- **Zona de Epidota (Ep)+fosfatos.**

El aumento de epidota (24%) hacia la base de esta zona y el incremento de fosfatos (15%) hacia el tope de la Formación Mugrosa, caracterizan esta zona.

- **Zona de granate (Grt)+fosfatos.**

Esta zona la caracteriza la presencia de granate con un porcentaje del 1% y el aumento de fosfatos con un 15%.

Formación Colorado: para esta formación se definieron tres zonas.

- **Zona de granate (Grt)+ fosfatos.**

En esta zona se presenta un incremento de granate (5%) y de fosfatos (33%) hacia la base de la Formación Colorado.

- **Zona de zircón (Zr)+carbonatos.**

- En la zona se observa un incremento hacia el tope de la zona de zircón (19%) y carbonatos (33%), los cuales caracterizan esta zona.

- **Zona de Epidota (Ep)+ carbonatos.**

- Esta zona se caracteriza por el aumento de epidota (46%) hacia el tope de la Formación Colorado y el incremento de carbonatos (33%) hacia la base de la zona.

Los minerales opacos en toda la secuencia presentan un mayor porcentaje que los translúcidos, estos no se clasificaron, pero se sugiere realizar este análisis en estudios posteriores.

En cuanto a los apatitos hay mayor abundancia en formaciones La Paz y Lisama (SNME).

Es importante destacar que los minerales pesados con mayor abundancia en la mayoría de las muestras después de los opacos son los zircones, principalmente translúcidos y de forma subhedral, subredondeados y redondeados.

En general los minerales que representan mayor abundancia en la secuencia son la colofana hacia la base de Colorado y hacia el tope de Mugrosa, el de Turmalina en un nivel local de la Formación Esmeraldas, y el zircón un aumento en la Formación La Paz y el otro en la Formación Lisama (SNME y SNMW).

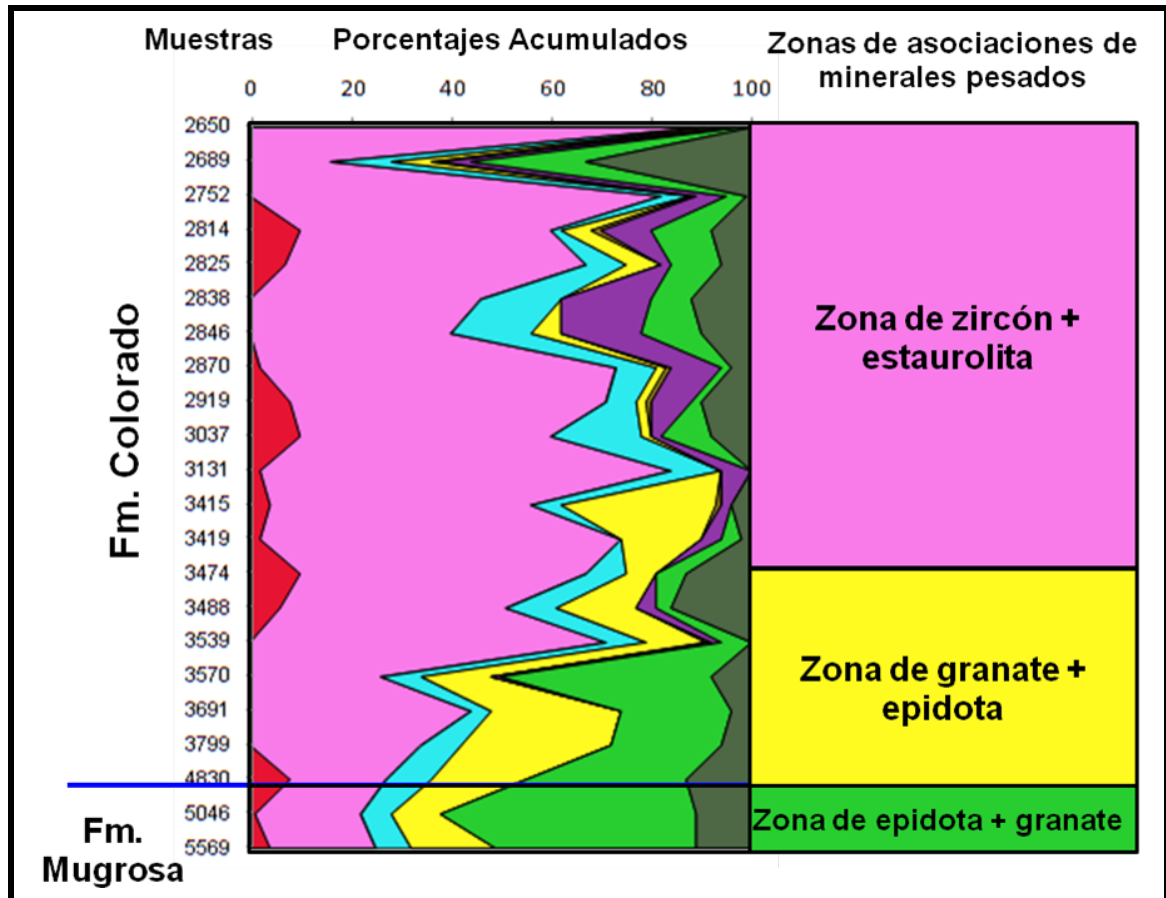
Se resalta el predominio de de minerales accesorios moderadamente estables a ultraestables indicando mayor retrabajamiento en todas la secuencia, mientras los minerales más inestables encontrados se presentan en proporciones menores.

7.1.2 ZONACIONES PARA EL POZO LA PUERTA-1

Se realizó un conteo alrededor de 300 granos, para determinar la abundancia de los minerales pesados, en este conteo no se tuvo en cuenta los minerales opacos. Anexo 1. Tabla A 1.2.

El gráfico de porcentajes (Figura.15) muestra el contenido y la variación de los minerales pesados que constituyen las muestras de este pozo.

Figura 15. Composición de las muestras analizadas en el pozo La Puerta-1.



Fuente: Autor

En el gráfico se aprecian principalmente tres zonas, para la Formación Mugrosa una y para la Formación Colorado dos, estas se describen a continuación:

Formación Mugrosa:

- **Zona de epidota (Ep)+granate (Grt).**

Esta zona se caracteriza por el aumento de epidota (51%) y granate (19%) entre 4830' y 5569'.

Formación Colorado:

- **Zona de granate (Grt)+epidota (Ep).**

En esta zona se observa un incremento de granate (30%) y epidota (42%) entre 3474' y 4830'.

- **Zona de zircón (Zr)+estauroлита (St).**

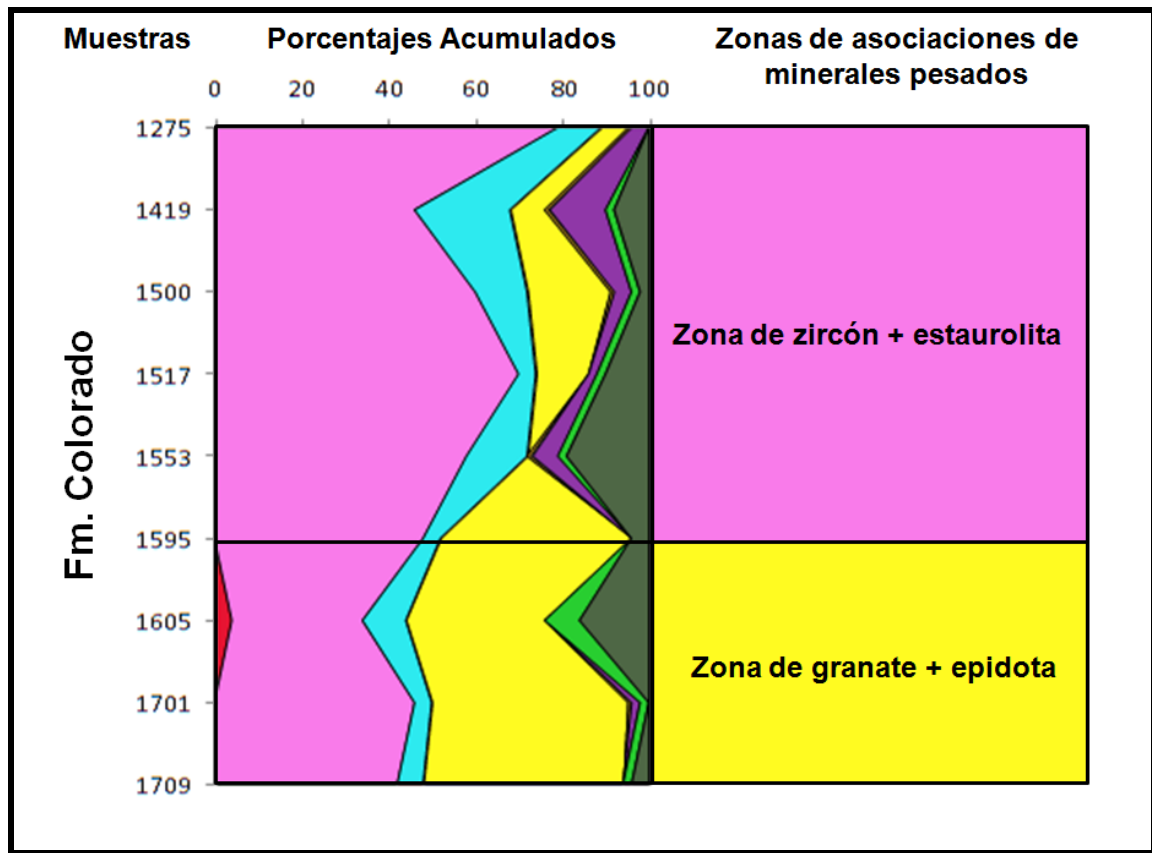
En esta zona se presenta un aumento de zircón (90%) y de estauroлита (18%) entre 2650' y 3474'.

Se resalta el predominio de de minerales accesorios moderadamente estables a ultraestables (epidota, granate, turmalina, rutilo y zircón) en todas las muestras, mientras los minerales más inestables (andalucita, barita) encontrados se presentan en proporciones menores

7.1.3 ZONACIONES PARA EL POZO LA CIRA-79

De igual manera se realizó el conteo estadístico para los montajes de minerales pesados para el pozo La Cira-79) (Anexo 1. Tabla A 1.3) y el gráfico que representa el contenido en porcentaje (Figura. 16).

Figura 16. Composición de las muestras analizadas en el pozo La Cira-79.



Fuente: Autor

En el gráfico se observan principalmente dos zonas en la Formación Colorado.

- **Zona de epidota (Ep)+granate (Grt).**

En la zona se presenta un incremento de granate (46%) y epidota (8%) entre 1595' y 1709'.

- **Zona de zircón (Zr)+estaurolita (St).**

Se caracteriza por el aumento de zircón (79%) y estaurolita (13%) entre 1275' y 1595'.

Se resalta el predominio de de minerales accesorios estables a ultraestables (zircón, turmalina, granate) en todas las muestras, mientras los minerales más

inestables (epidota, andalucita, esfena) encontrados se presentan en proporciones menores

7.2 Correlación estratigráfica pozo-afloramiento

La correlación estratigráfica se realizó de Este a Oeste entre los Pozos La Puerta-1, la Cira-79 y las formaciones Mugrosa y Colorado del SNME con el fin de tener un control regional de las unidades (Anexo 3) (Figura. 17), donde se tomo como datum el tope de la Formación Mugrosa, en la columna propuesto por Gems, 2009 y en los pozos guiado por el horizonte de fósiles Mugrosa, estos registros de los años 30's y 40's.

En esta correlación se evidenciaron eventos para cada Formación que se describen a continuación:

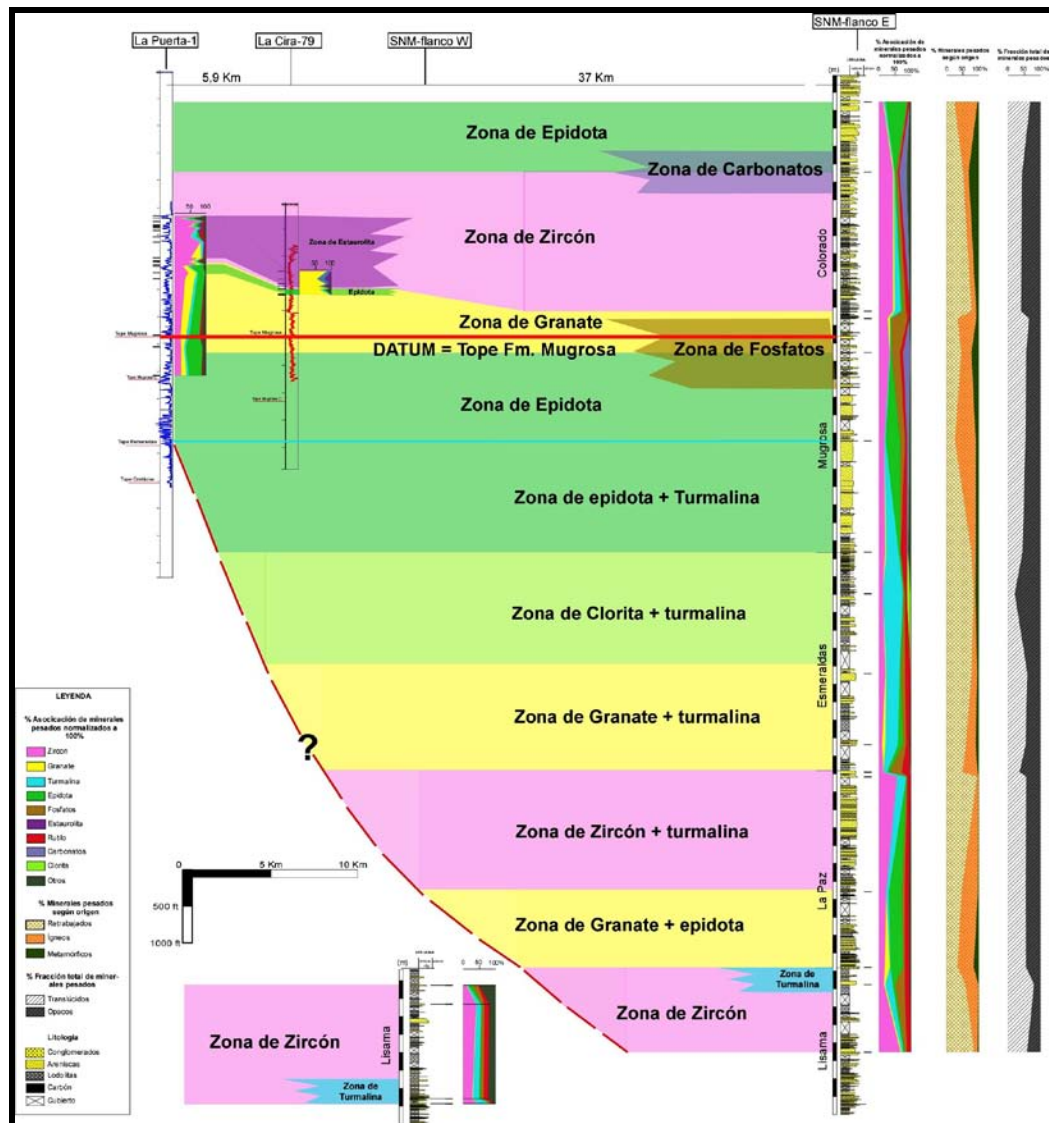
Formación Mugrosa:

- Entre el pozo la Puerta-1 y la columna estratigráfica del Cenozoico en el Sinclinal de Nuevo Mundo se correlaciona la zona de epidota para la Formación Mugrosa.

Formación Colorado:

- La zona de granate es correlacionable entre los dos pozos y la Formación Colorado en el SNME.
- Entre los dos pozos de estudio la zona de de epidota es correlacionable.
- En el pozo la puerta-1 y la Cira-79 se presentan la zona de estaurólita, la cual permite una correlación entre estos.
- En el pozo la Puerta-1 se presenta una tendencia del zircón muy similar a la de la Cira-79 y a la de la columna principalmente en la Formación Colorado, sin embargo la puerta-1 y la columna muestran una similitud en la tendencia que presenta el zircón en los gráficos de % de minerales pesados.

Figura 17. Correlación entre la sección estratigráfica y los pozos la Puerta-1 y la Cira-79.



Fuente: Autor

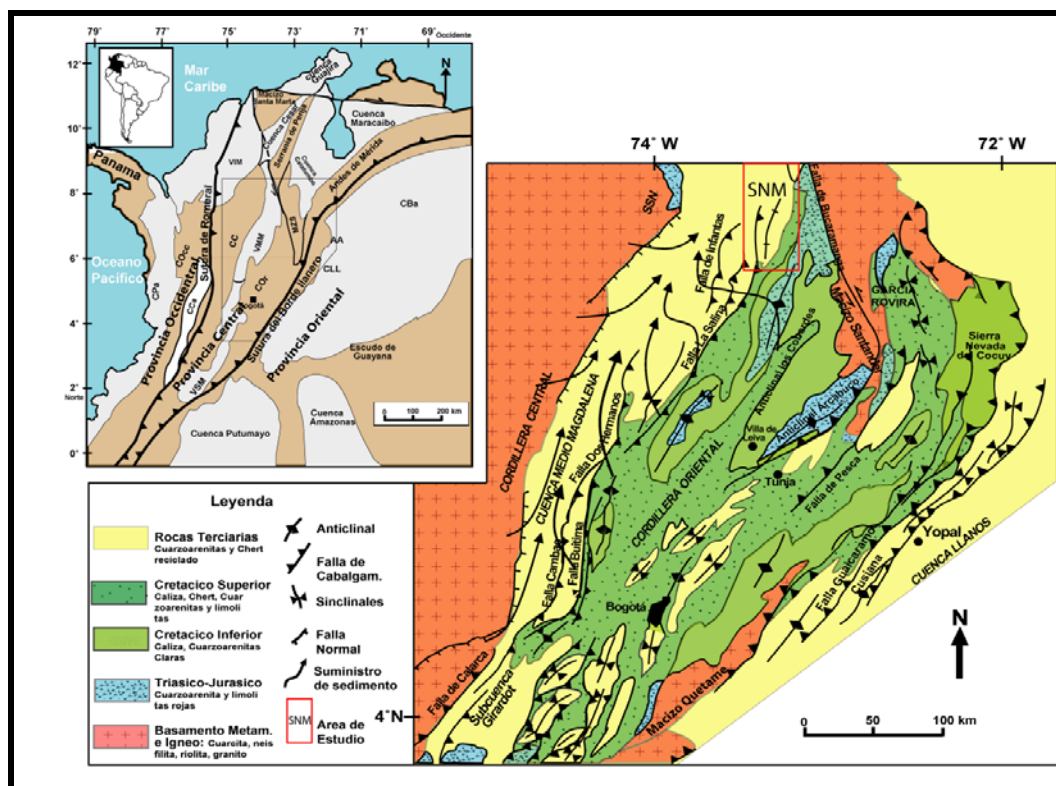
7.3 Modelo de procedencia basada en la concentración de minerales pesados

El origen y las áreas de aporte de los sedimentos en la secuencia Cenozoica del VMM son muy discutidos, por lo cual se implementa la herramienta de minerales pesados como una técnica complementaria en el análisis de procedencia con el fin de establecer relaciones entre las unidades terciarias y deducir el área fuente de sedimentos

7.3.1 POSIBLES ÁREAS FUENTES EN LA SECUENCIA CENOZOICA DEL VMM

En la literatura geológica, se han reportado las principales fuentes de sedimentos para la secuencia Cenozoica del VMM, principalmente han sido la Cordillera Central, la Cordillera Oriental y el Escudo Guayanés (Forero, 1990; Cooper et al., 1995; Gómez et al., 2003; Gómez et al., 2005) (figura. 18).

Figura 18. Localización de las posibles áreas fuentes durante el Cenozoico.



Fuente: Tomado de Caballero, 2009.

7.3.2 ANÁLISIS DE PROCEDENCIA

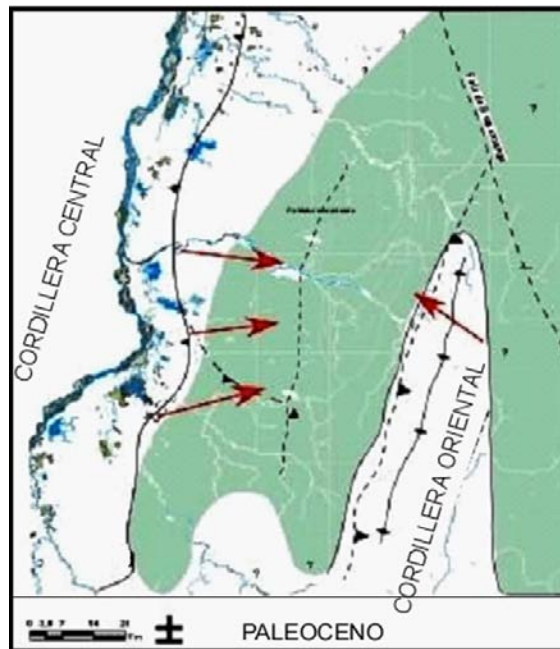
El análisis de procedencia de las áreas fuentes de sedimentos para las formaciones Cenozoicas del VMM, se basó en la abundancia, variación y morfología de los minerales pesados constituyentes en las muestras.

El zircón es el mineral pesado que más predomina en la secuencia, ocurre principalmente como granos subhedrales, redondeados y translúcidos indicando una fuente lejana (Paleo-proterozoico), y en menor proporción zircones de tipo euedral indicando una fuente cercana, esto nos indica que para el Cenozoico hay una fuente mixta.

1. Formación Lisama (Paleoceno):

Recibe sedimentos tanto de la Cordillera Central y de la Oriental (figura. 19) (sedimentos reabajados de la Cordillera Oriental, heredados del Cratón Amazónico) evidenciado por el incremento de zircones redondeados (reabajados) y euhedrales.

Figura 19. Mapa paleogeográfico, indicando las áreas de aporte de sedimento para la Formación Lisama.

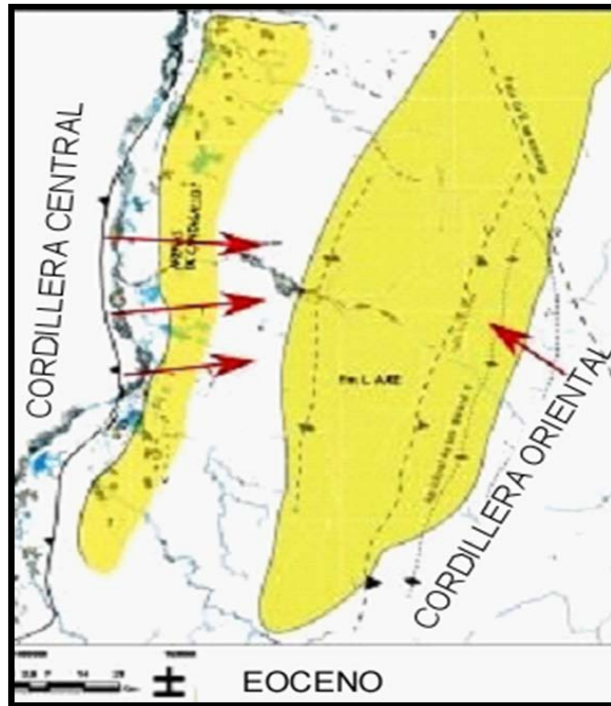


Fuente: Modificado de Caballero, 2009.

2. Formación La Paz (Eoceno):

El aporte de sedimentos proviene de la Cordillera Central, y Oriental (figura 20), pero el aumento de Zircón de tipo euhedral y la Epidota permite indicar que la Formación La Paz recibe más sedimentos de la Cordillera Central.

Figura 20. Mapa paleogeográfico, indicando las áreas de aporte de sedimento para la Formación La Paz.

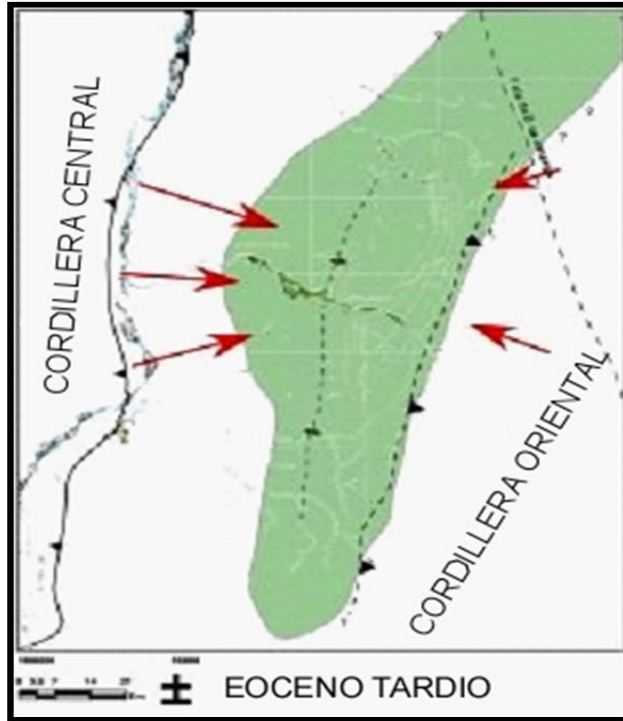


Fuente: Modificado de Caballero, 2009.

3. Formación Esmeraldas (Eoceno):

El área de aporte de sedimentos para la Formación Esmeraldas (figura. 21) proviene principalmente de la Cordillera Central esto evidenciado por el alto contenido de Turmalina y la presencia de Clorita, pero también hay un leve aporte de la Cordillera Oriental y del Macizo de Santander.

Figura 21. Mapa paleogeográfico, indicando las áreas de aporte de sedimento para la Formación Esmeraldas.



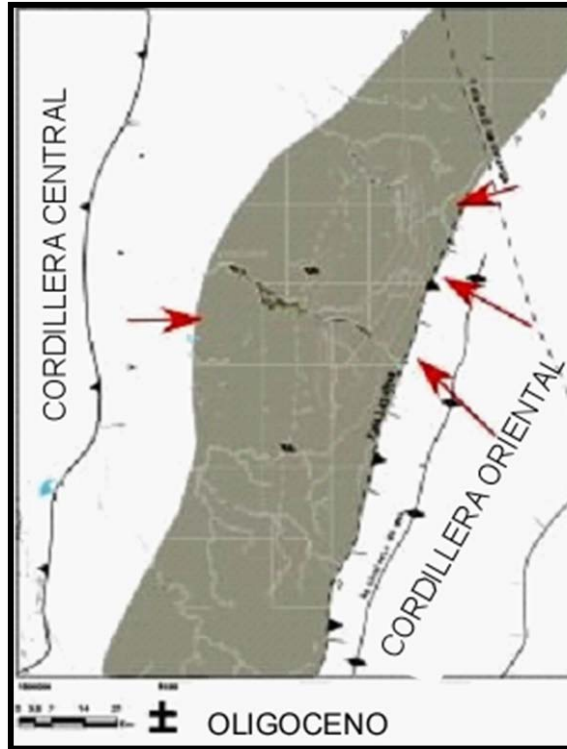
Fuente: Modificado de Caballero, 2009.

4. Formación Mugrosa (Oligoceno):

El aporte de los sedimentos provienen del Macizo de Santander, y de las cordilleras Oriental y Central (figura. 22), lo cual indica una mezcla de fuentes.

Entre los minerales de fracción pesada se observan carbonatos e incremento de colofana lo cual puede estar indicando un reciclaje de sedimentos Cretácicos retrabajados de la Cordillera Oriental.

Figura 22. Mapa paleogeográfico, indicando las áreas de aporte de sedimento para la Formación Mugrosa.



Fuente: Modificado de Caballero, 2009.

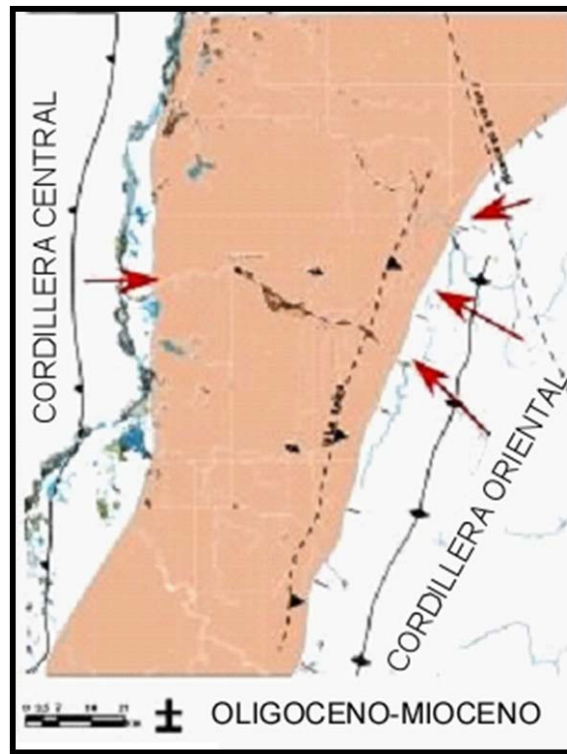
5. Formación Colorado (Oligoceno-Mioceno):

La fuente de sedimentos para la parte basal de esta, son del Macizo de Santander y de la Cordillera Central (alto contenido de fosfatos (colofana), turmalina y zircón)

Para la parte superior de la Formación el aporte de sedimentos son de la Cordillera Oriental y Central, esto por el alto contenido de zircones, carbonatos y epidota.

En la formación se presenta una abundancia de carbonatos sedimentarios posiblemente del Cretácico de la Cordillera Oriental (figura 23), evidenciando reciclaje.

Figura 23. Mapa paleogeográfico, indicando las áreas de aporte de sedimento para la Formación Colorado.



Fuente: Modificado de Caballero, 2009.

Los pozos analizados la Puerta-1 y la Cira-79 se encuentran al oeste del sinclinal de Nuevo Mundo mostrando un importante incremento para el Oligoceno-Mioceno (Formación Colorado) de estauroлита, mineral de metamorfismo de medio a alto grado, no muy estable, lo cual indica una fuente cercana, Cordillera Central (Neis de San Lucas), esto también lo evidencia el alto contenido de epidota en las Formaciones Mugrosa y Colorado.

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Se definieron 11 zonas de minerales pesados para las formaciones Cenozoicas, Lisama una zona (zircón + turmalina); La Paz dos zonas (granate + epidota) y (zircón + turmalina); Esmeraldas dos zonas (granate + turmalina) y (clorita + turmalina); Mugrosa tres zonas (epidota + turmalina) y (epidota + fosfatos) y (granate + fosfatos) y por último la Formación Colorado con tres zonas (granate + fosfatos), (zircón + carbonatos), (epidota + carbonatos).
- En el pozo la Puerta-1 se definió para la Formación Mugrosa una zona de (epidota + granate) y para la Formación Colorado dos zonas (granate + epidota) y (zircón + estaurolita). Para el pozo la Cira-79 en la Formación Colorado dos zonas (epidota + granate) y (zircón + estaurolita).
- Se evidenciaron eventos a correlacionar entre las formaciones Mugrosa y Colorado de la sección estratigráfica y los dos pozos, la zona de epidota en la Formación Mugrosa y la zona de granate y zircón en la Formación Colorado, además de zonas como la epidota y estaurolita correlacionables solo entre los pozos.
- Los análisis de procedencia permitieron definir fuentes de sedimentos para las unidades terciarias, desde el Paleoceno al Eoceno medio (formaciones Lisama, La Paz y Esmeraldas) provienen de las dos Cordilleras, principalmente de la Central, a partir del Eoceno medio al Oligoceno tardío (formaciones Esmeraldas, mugrosa y Colorado), recibe un mayor aporte de la Oriental reciclando sedimentos Cretácicos, además de un aporte del Macizo de Santander.
- Para los pozos la Puerta-1 y la Cira-79, ubicados al oeste de la zona de estudio, el aporte proviene de la Cordillera Central, esto evidenciado por la presencia de estaurolita en la Formación Colorado y alto contenido de epidota principalmente en la Formación Mugrosa.
- Además de las zonaciones de minerales pesados definidas en este trabajo, se sugiere realizar un muestreo más denso en estudios posteriores, para proponer sub-zonas que aporten un mayor control en la realización de correlaciones estratigráficas, asimismo aplicar esta metodología en las áreas de aporte de sedimentos como la parte central de la Cordillera Central, el Macizo de Santander, y la Cordillera Oriental.

- Este estudio deja en preservación los minerales opacos de estas muestras, se sugiere realizar un estudio para la clasificación de estos, con análisis como calcografía, petrología con luz reflejada y para la parte elemental microscopia electrónica de barrido.
- Por medio de este trabajo se logra establecer que la herramienta de minerales pesados brinda datos importantes en el conocimiento geológico de la secuencia Cenozoica del Valle medio del Magdalena, la cual se puede implementar en otras áreas de interés

9. BIBLIOGRAFIA

- Arthur, B., Merkle and Ray, E., Ferrell, 1972, The identification of heavy minerals with a scanning electron microprobe. Offshore Technology Conference, 1-3 May, Houston, Texas.
- Baak, T. A., 1936, Regional petrology of the Southern North Sea, Wageningen: H. Veenman en Zonen.
- Barrero, D., A. Pardo, Vargas, C., and Martinez, J., 2007, Colombian sedimentary basins, ANH, 92.
- Caballero, V., 2010, Evolución tectono - sedimentaria del Sinclinal de Nuevo Mundo, Cuenca sedimentaria Valle Medio del Magdalena, Colombia, durante el oligoceno – mioceno.
- Cooper, M. A., and F. T. Addison, *et al.* 1995, Basin Development and tectonic history of the Llanos Basin, Eastern Cordillera, and Middle Magdalena Valley, Colombia, AAPG Bulletin, v. 79 p. 1421 – 1443.
- Dengo, C. A., 1993, Structure of the Eastern Cordillera of Colombia: Implications for Trap Styles and Regional Tectonics, AAPG Bulletin, 77/8, 1315-1337.
- De Porta, J., 1974, Lexique Stratigraphique International- Ameique Latine, Colombia, Volume V, Fascicule 4b, Centre Nat. Rech. Scie, Paris.
- Fleet, W. F., 1926, Petrological notes on the Old Red Sandstones of the West Midlands, Geol Mag., 63, 505.
- Friedman; G. M., 1958, Determination of sieve-size distribution from thin-section data for sedimentary petrological studies, *Journal of Geology*, v. 66, p. 394.
- Galehouse, J. S., 1969, Counting grain mounts: number percentage vs. Number frequency, J. Sedim. Petrol., 39, 812.
- Galehouse, J. S., 1971, Point counting. In procedures in sedimentary petrology, R. E. Carver (ed.), 385-407, New York: Wiley.

- GEMS, 2009. Adquisición y consolidación de información para el Valle Medio del Magdalena (VMM) y Piedemonte de la Cordillera Oriental- Fase I. Trabajo realizado para ECOPETROL-ICP.
- Gómez, E., Jordan, T. E., Allmendinger, R. W., Hegarty, K., Kelley, S., and Heizler, M., 2003, Controls on architecture of the Late Cretaceous to Cenozoic southern Middle Magdalena Valley Basin, Colombia: Geological Society of America Bulletin, v. 115, no. 2, p. 131-147.
- Gómez, E., Jordan, T. E., Allmendinger, R. W., Hegarty, K., y Kelley, S., 2005, Syntectonic Cenozoic sedimentation in the northern middle Magdalena Valley Basin of Colombia and implications for exhumation of the Northern Andes: Geological Society of America Bulletin, v. 117, no. 5-6, p. 547-569.
- Kettanah, Y. A., and G. D. Wach, 2006, The Provenance of Heavy Minerals in the Mesozoic and Tertiary Formations, Venture B- 13 Borehole, Offshore Nova Scotia, Canada, Dalhousie University, Halifax, N.S., Canada.
- Mange, A. M., and W. H. Maurer, 1992, Heavy Minerals in colour, Chapman and Hall, 147.
- Montenegro, O., 2008, Análisis de petrografía y minerales pesados de la sucesión Paleógena en el Sinclinal de Usme y contribuciones a la evolución tectónica del área, Universidad Nacional de Colombia.
- Morales, L. G., Colombian petroleum Industry, 1958, General geology and oil occurrences of the Middle Magdalena Valley, Colombia, *in* Weeks, L. G., ed., Habitat of Oil: A Symposium: Tulsa, AAPG, p. 641-695.
- Morton, A. C., Hallsworth, C. R., 1999, Process controlling the composition of heavy mineral assemblages in sandstones: Sedimentary Geology, v. 124.
- Ratcliffe, K. T., A. M. Wright, C. Hallsworth, A. Morton, B. A. Zaitlin, D. Potocki, and D. S. Wray, 2004, An example of alternative correlation techniques in a low-accommodation setting, nonmarine hydrocarbon system: The (Lower Cretaceous) Mannville Basal Quartz succession of southern Alberta.
- Reed, R. D. & Bailey, J. P., 1927, Surface correlation by means of heavy minerals. Bull. Am. Ass. Petrol Geol. 11, 359-68.

- RODRIGUEZ, G., 2008. palinología del cenozoico del valle medio del magdalena: aplicaciones en la definición de unidades estratigráficas. Reporte interno, Ecopetrol-ICP.
- Royero, J. M., & J. Clavijo, 2001, Mapa geológico Generalizado del Departamento de Santander, escala 1:400.000. Memoria Explicativa, Instituto de Investigación E Información Neocientífica, Minero-Ambiental y Nuclear INGEOMINAS.
- Rubey, W. W., 1933, The size-distribution of heavy minerals within a wáter-laid sandstone. J. Sedim. Petrol. 3. 69.
- RUIZ, C., GOMEZ, P., CIFUENTES, A., 2008. Levantamiento Estratigráfico de la Formación Lisama, aplicado al prospecto Lisama Este 2P, en el área del Sinclinal de Nuevo Mundo, Valle Medio del Magdalena. Informe de Avance. Reporte Interno. Ecopetrol-ICP.
- Van Andel, Tj. H., 1955, Recent sediments of the Rhone delta II, sources and deposition of heavy minerals, Geol. Mijnb. 15, 515.
- Van Harten, D., 1965, On the estimation of relative grain frequencies in heavy mineral slide, Geol. Mijnb., 44, 357.

ANEXOS

ANEXO 1 TABLAS DE DATOS

Tabla A1.1 Contenido (%) de estudio minerales pesados en las muestras de columna estratigráfica del VMM sinclinal de Nuevo Mundo Este.

Formación	Muestra	Zircón	Granate	Turmalina	Epidota	Apatitos	Colofana	Rutilo	Carbonatos	Clorita	Opacos	Otros
Colorado	US-304-MP	9	1	4	46	2	0	3	0	0	32	3
	US-188-P	19	1	1	2	0	3	1	10	0	57	6
	US-048-MP	17	2	8	2	3	1	5	0	0	61	1
	US-044-MP	17	5	1	1	1	32	4	0	0	36	3
Mugrosa	US-022-P	19	0	1	2	5	10	5	13	0	44	1
	SC-517-P	9	0	2	24	1	7	3	4	0	47	3
	SC-011-P	6	1	12	2	0	0	6	1	0	69	3
Esmeraldas	RS-594-P	7	0	33	1	2	0	3	0	6	47	1
	CB-397-P	9	1	18	2	1	5	7	0	0	56	1
	RS-627-AFTA	2	2	8	3	0	2	2	0	0	80	1
La Paz	CB-785-AFTA	8	1	6	4	16	7	15	0	1	41	1
	RS-624-AFTA	31	0	15	1	0	1	5	0	0	46	1
	RS-123-B	8	0	3	14	2	1	5	0	0	65	2
	RS-059-AFTA	10	9	1	22	2	1	8	0	0	44	3
Lisama	SNME-CB60-01	10	1	12	4	12	4	9	0	0	46	2
	SNME-CB27-01	37	2	3	2	1	3	7	0	0	45	0
	SNMW-L87-01	7	2	2	11	2	15	3	0	0	20	40
	SNMW-L71-02	23	1	8	1	1	5	9	0	0	42	11
	SNMW-L7-05	15	1	10	2	3	6	7	0	0	47	12
	SNMW-L6-01	19	1	18	1	2	2	3	0	1	55	0

Fuente: Autor

Tabla A.1.2. Contenido de minerales pesados, pozo La Puerta-1.

Formación	Profundidad	Zircón	Granate	Turmalina	Epidota	Fosfatos	Estauroлита	Rutilo	Otros
Colorado	2650-56	90	0	2	2	4	2	0	0
	2689-94	16	8	12	23	2	6	0	33
	2752-	82	0	6	4	1	6	0	1
	2814-2705	50	6	2	12	2	10	10	8
	2825-30	60	7	8	10	0	2	7	6
	2838-43	46	0	16	8	0	18	0	12
	2846-51	40	6	16	12	0	16	0	10
	2870-75	71	2	8	2	1	10	2	4
	2919-25	63	2	6	2	1	8	8	10
	3037-42	50	2	18	10	0	2	10	8
	3131-36	82	0	10	0	0	6	2	0
	3415-19	52	31	6	0	1	2	4	4
	3419-25	72	16	0	4	0	4	2	2
	3474-79	57	6	8	6	0	0	10	13
	3488-93	45	16	10	3	0	4	6	16
	3539-44	71	12	8	6	1	2	0	0
	3570-73	26	14	8	42	0	2	0	8
	3691-95	44	26	4	22	0	0	0	4
3799-3805	34	30	8	22	0	0	0	6	
4830-4840	19	19	9	32	0	0	8	13	
Mugrosa	5046-5054	21	10	6	51	0	0	1	11
	5569-5580	21	17	7	40	0	0	4	11

Fuente: Autor

Tabla A.1.3. Contenido de minerales pesados, pozo La Cira-79.

Formación	Profundidad	Zircon	Granate	Turmalina	Epidota	Fosfatos	Estauroлита	Rutilo	Otros
Colorado	1275	79	6	10	0	1	4	0	0
	1419	46	8	22	2	1	13	0	8
	1500	60	19	12	2	1	4	0	2
	1517-20	70	12	4	2	0	2	0	10
	1553	58	0	14	2	1	6	0	19
	1595	48	44	4	0	0	0	0	4
	1605-09	30	32	10	8	0	0	4	16
	1701	46	45	4	2	1	2	0	0
	1709	42	46	6	2	0	0	0	4

Fuente: Autor

Tabla A1.4 Contenido (%) de minerales pesados según origen, de la columna estratigráfica del VMM sinclinal de Nuevo Mundo Este.

Muestra	% Retrabajados	% igneos	% metamórficos
US-304-MP	24	72	4
US-188-P	51	17	32
US-048-MP	77	15	8
US-044-MP	34	58	8
US-022-P	45	32	23
SC-517-P	26	64	9
SC-011-P	77	13	10
RS-594-P	83	6	12
CB-397-P	77	18	5
RS-627-AFTA	60	30	10
CB-785-AFTA	49	47	3
RS-624-AFTA	94	4	2
RS-123-B	46	51	3
RS-059-AFTA	34	50	16
SNME-CB60-01	58	40	2
SNME-CB27-01	85	11	4
SNMW-L87-01	29	63	7
SNMW-L71-02	80	16	4
SNMW-L7-05	71	22	7
SNMW-L6-01	89	7	4

Fuente: Autor

Tabla A1.5 Contenido (%) de minerales pesados traslúcidos y opacos, de la columna estratigráfica del VMM sinclinal de Nuevo Mundo Este.

Muestra	% Traslúcidos	% Opacos
US-304-MP	68	32
US-188-P	43	57
US-048-MP	39	61
US-044-MP	64	36
US-022-P	56	44
SC-517-P	53	47
SC-011-P	31	69
RS-594-P	53	47
CB-397-P	44	56
RS-627-AFTA	20	80
CB-785-AFTA	59	41
RS-624-AFTA	54	46
RS-123-B	35	65
RS-059-AFTA	56	44
SNME-CB60-01	54	46
SNME-CB27-01	55	45
SNMW-L87-01	80	20
SNMW-L71-02	58	42
SNMW-L7-05	53	47
SNMW-L6-01	45	55

Fuente: Autor

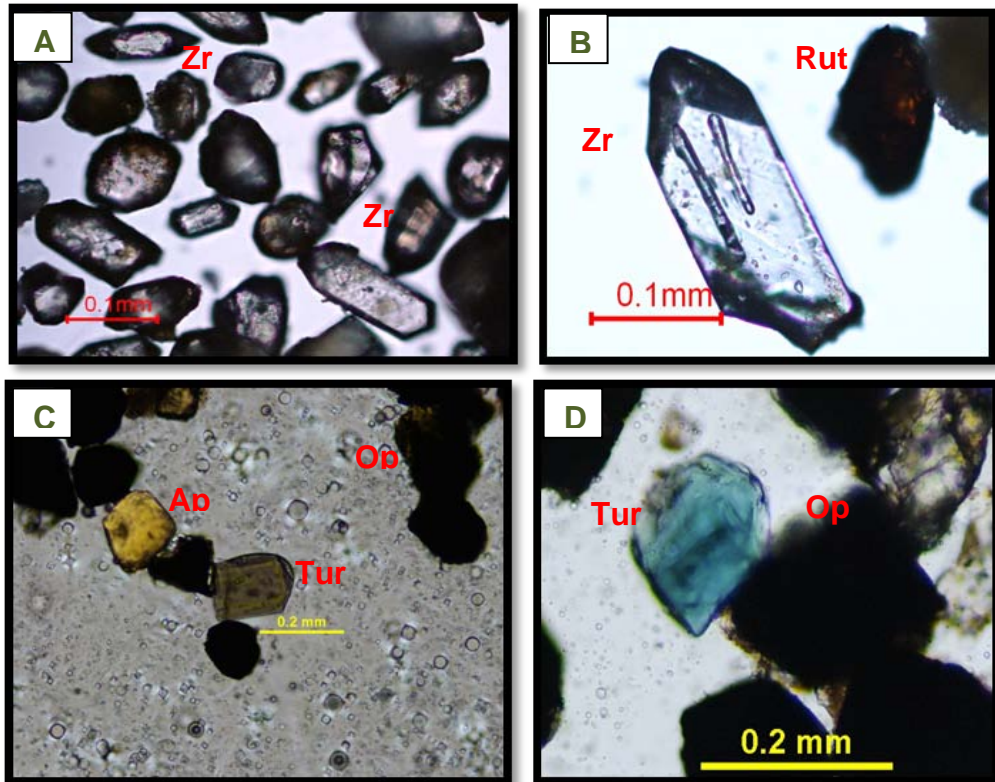
Tabla A.1.6 Descripción de los principales minerales pesados presentes en las muestras de estudio.

Nombre	Descripción
Zircón (Zr)	Cristales principalmente de traslúcidos, aunque algunos se presentan con colores rosados y marrones, generalmente presentan forma subhedral, subredondeada, y redondeada, fuerte birrefringencia.
Turmalina (Tur)	Cristales principalmente de color verde, marrón aunque se presentan algunos de color azul, de forma prismática, colores de pleocrosimo marrón a marrón claro, de verde a verde claro, además se presentan algunos de color azul a azul más claro, colores de birrefringencia de primer orden.
Colofana	Del grupo de los fosfatos, de color marrón, granular e isotrópico.
Rutilo (Rut)	Cristales de colores rojos y pardo rojizos, exfoliación en dos direcciones, alto relieve y birrefringencia extrema.
Carbonatos (Cb)	Cristales incoloros, algunos como las dolomitas presentan forma tabular y otros hexagonales, buena exfoliación, birrefringencia extrema, algunos presentan clivaje.
Apatitos (Ap)	Cristales traslúcidos,prismáticos de alto relieve y con birrefringencia débil a moderada.
Epidota (Ep)	Cristales de color amarillo, morfología irregular, alto relieve y birrefringencia moderada.
Piroxeno (Px)	Cristales de color verde, formas prismáticas e irregulares, de alto relieve y birrefringencia moderada.
Esfalerita (Sph)	Cristales de color amarillo, forma irregular, alto relieve, presentan clivaje, y son isotrópicos
Titanita (Ttn)	Cristales de color amarillo claro, forma irregular, alto relieve y birrefringencia extrema.
Granate (Grt)	Cristales incoloros, de forma irregular con alto relieve e isotrópicos.
Sillimanita (Sil)	Cristales de color marrón claro, de forma tabular con aspecto fibroso, alto relieve y birrefringencia moderada.
Clorita (Chl)	Cristales de color verde amarillento de forma laminar con relieve medio, birrefringencia baja y presenta colores anómalos de interferencia.

Fuente: Autor

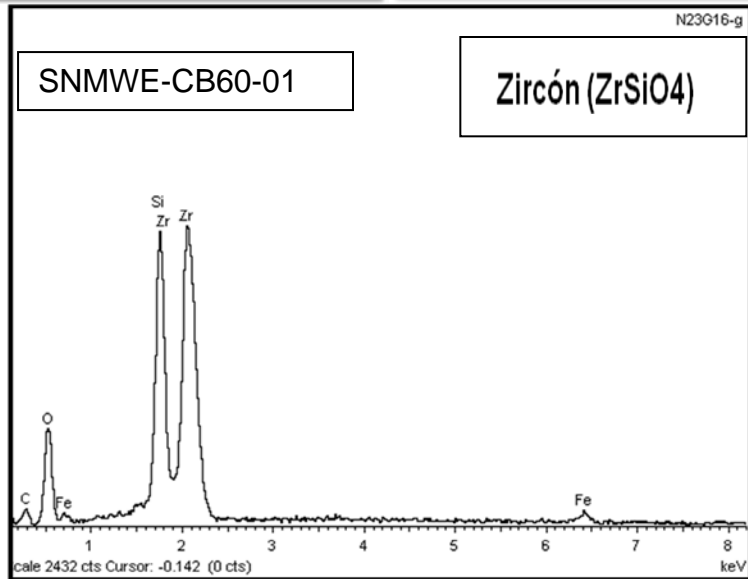
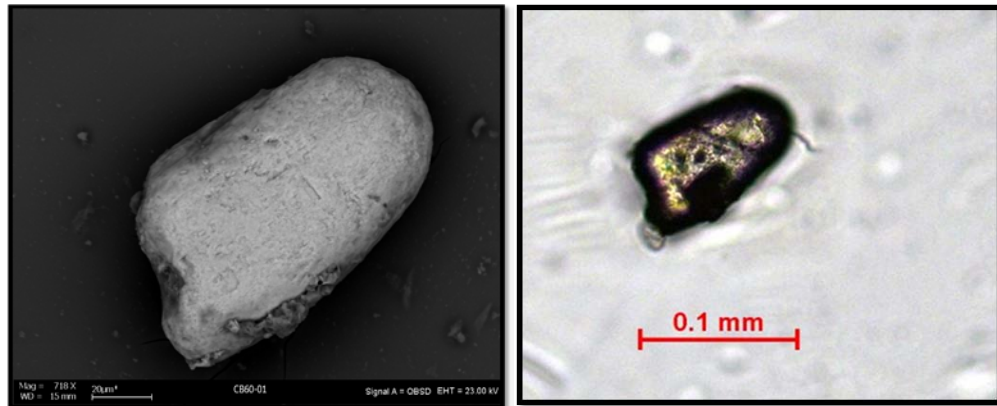
**ANEXO 2 FOTOS DE MINERALES
PESADOS (MICROSCOPIO OPTICO y
SEM)**

Anexo 2.1 Formación Lisama: Se analizaron 6 muestras de los flancos Este y Oeste del Sinclinal de Nuevo mundo, en los dos flancos los minerales que más abundan son los zircones, turmalina y fosfatos.



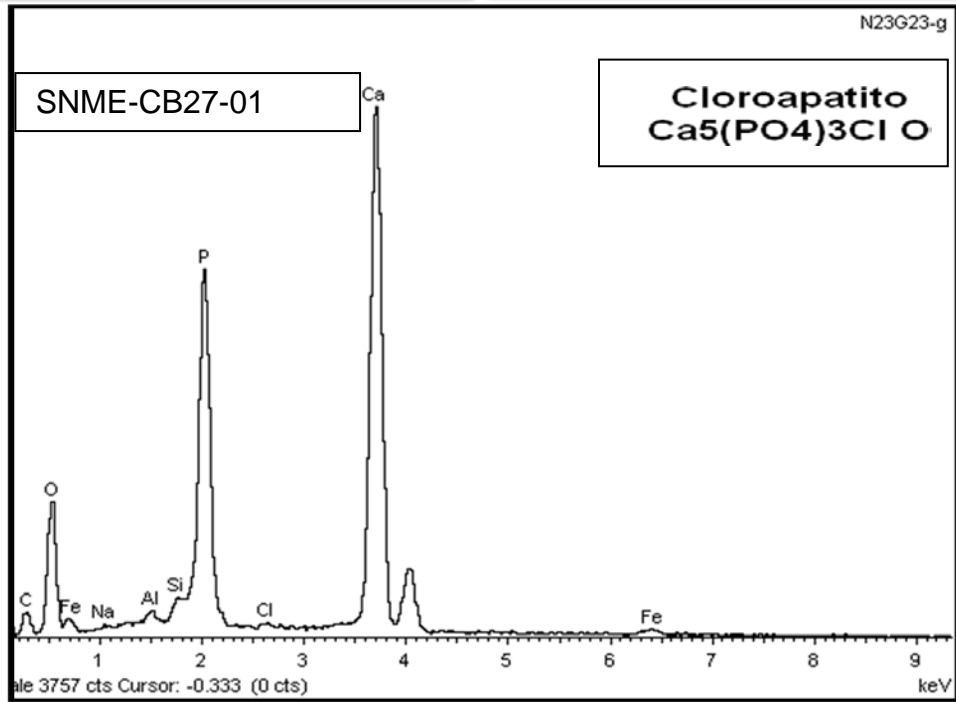
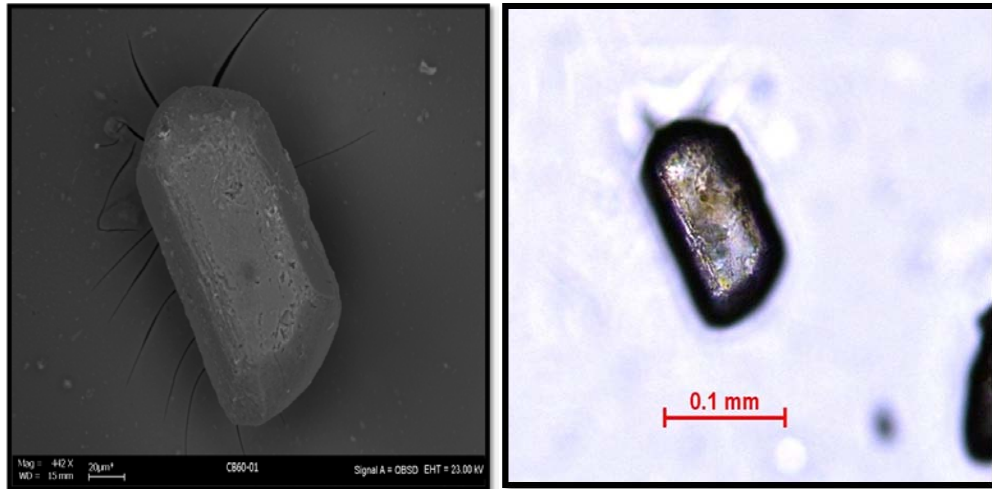
Fuente: Autor

Imágenes de los principales minerales constituyentes de la formación Lisama. (A) zircones (Zr) euhedral, subhedral y redondeados; (B) zircón (Zr) subhedral con algunas zonaciones, rutilo rojo impregnado de óxidos (Rut); (C) apatito (Ap) subredondeado de color amarillo, turmalina (Tur) subhedral verdosa, opacos (Op) de forma irregular; (D) turmalina (Tur) subhedral de color azul, opacos irregulares.



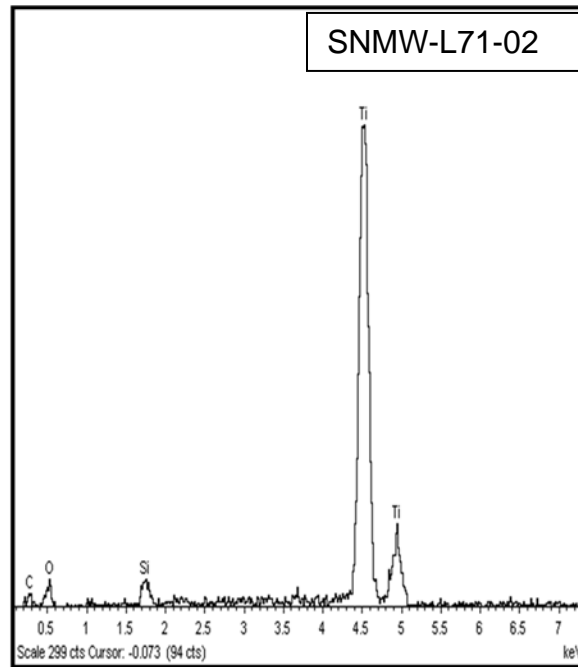
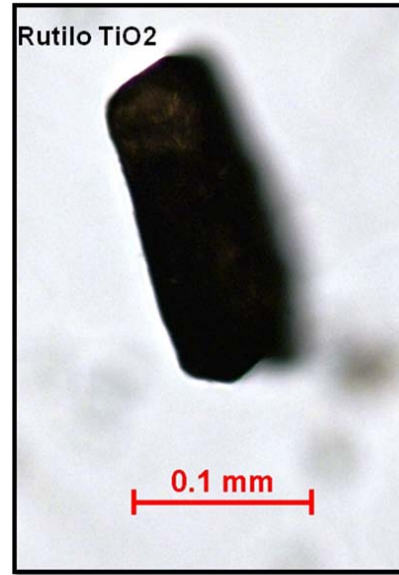
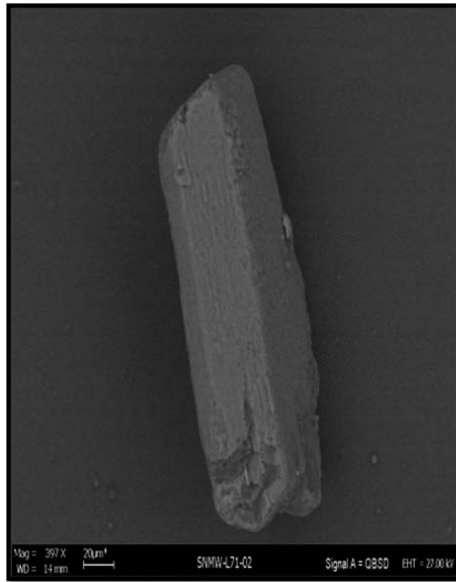
Fuente: Autor

Se observa en la imágenes un cristal de zircón de tipo subredondeado, en el espectros se aprecian picos significativos de Zr, Si y O, pero los picos pequeños muestran la presencia de Fe, esto evidencia el color marrón que presenta el zircón en la imagen óptica.



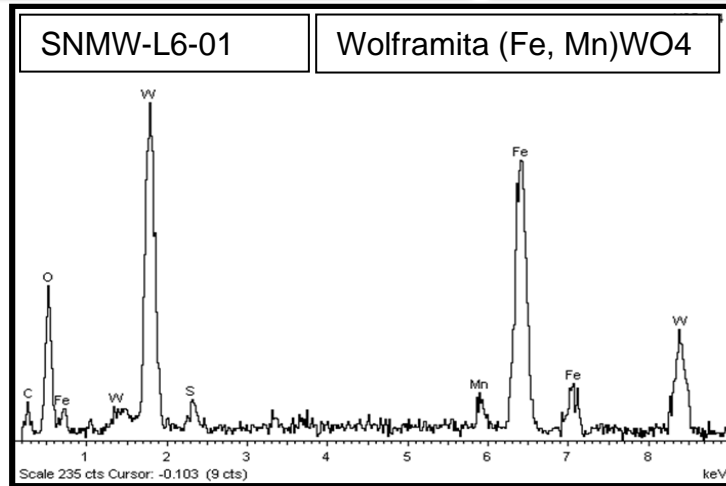
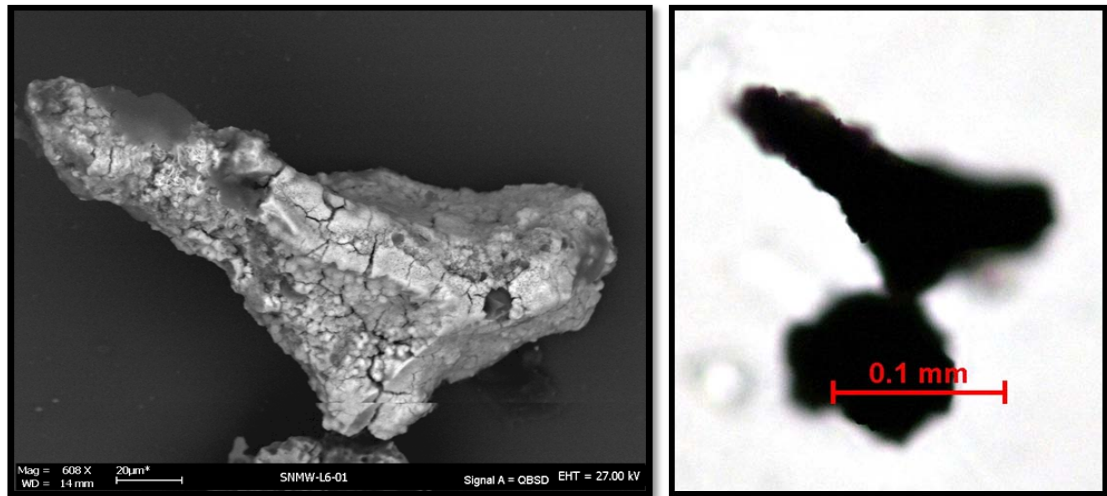
Fuente: Autor

En las imágenes tomadas en SEM y ópticamente, se aprecia un cristal de apatito de forma subhedral, con los análisis de SEM se permite observar la composición de algunos de estos cristales y se puede apreciar picos significativos que representan la presencia de Ca, P y O, y los picos más pequeños corresponden a Si, Al, Fe, Na y Cl, por tal razón pareciera tratarse de un cloroapatito.



Fuente: Autor

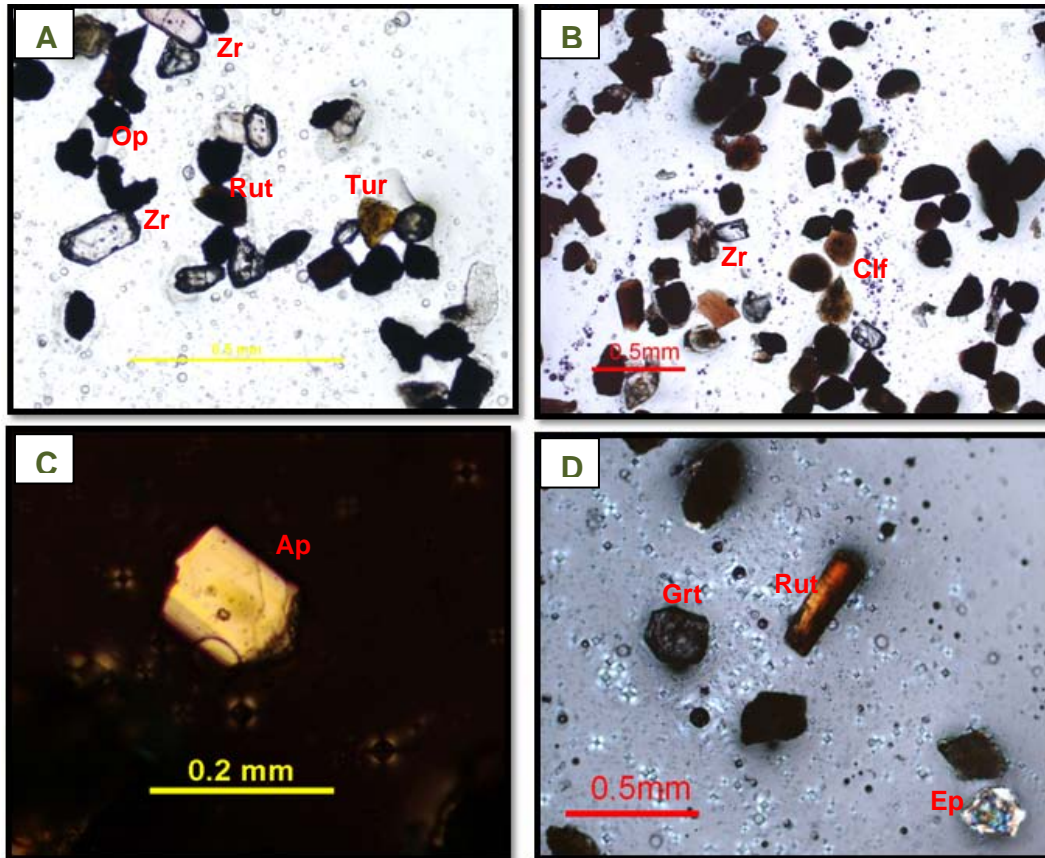
En las imágenes se aprecia un cristal de óxido de titanio de color marrón oscuro con forma tabular y bordes irregulares, en el espectro se observa, los picos típicos de Ti y O.



Fuente: Autor

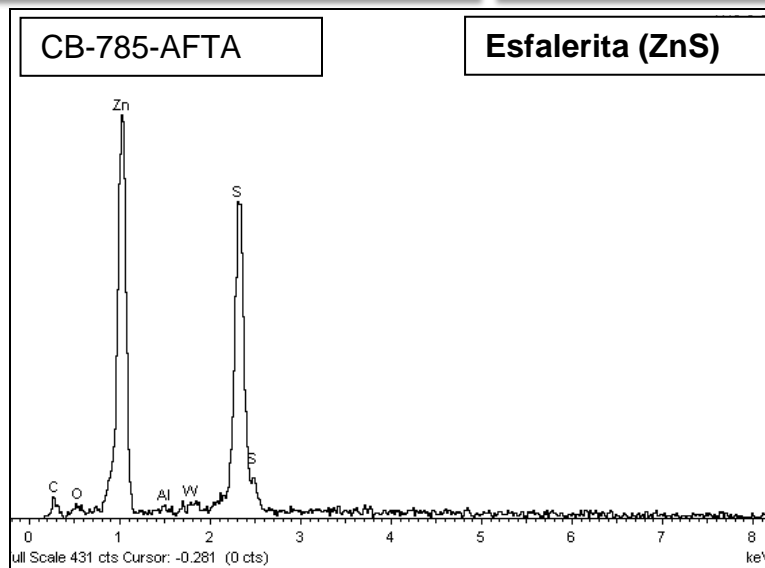
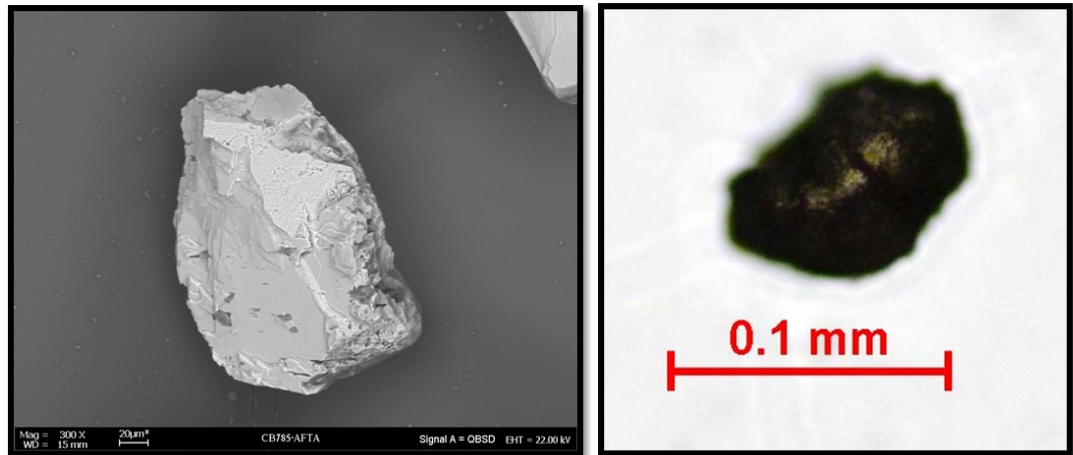
En las imágenes se aprecia un cristal con alto contenido de W, Fe, y Mn, por sus características podría ser una wolframita? de forma irregular.

Anexo 2.2 Formación La Paz: se analizaron 4 muestras, en los minerales más representativos son los zircones, epidota, apatitos, rutilo.



Fuente: Autor

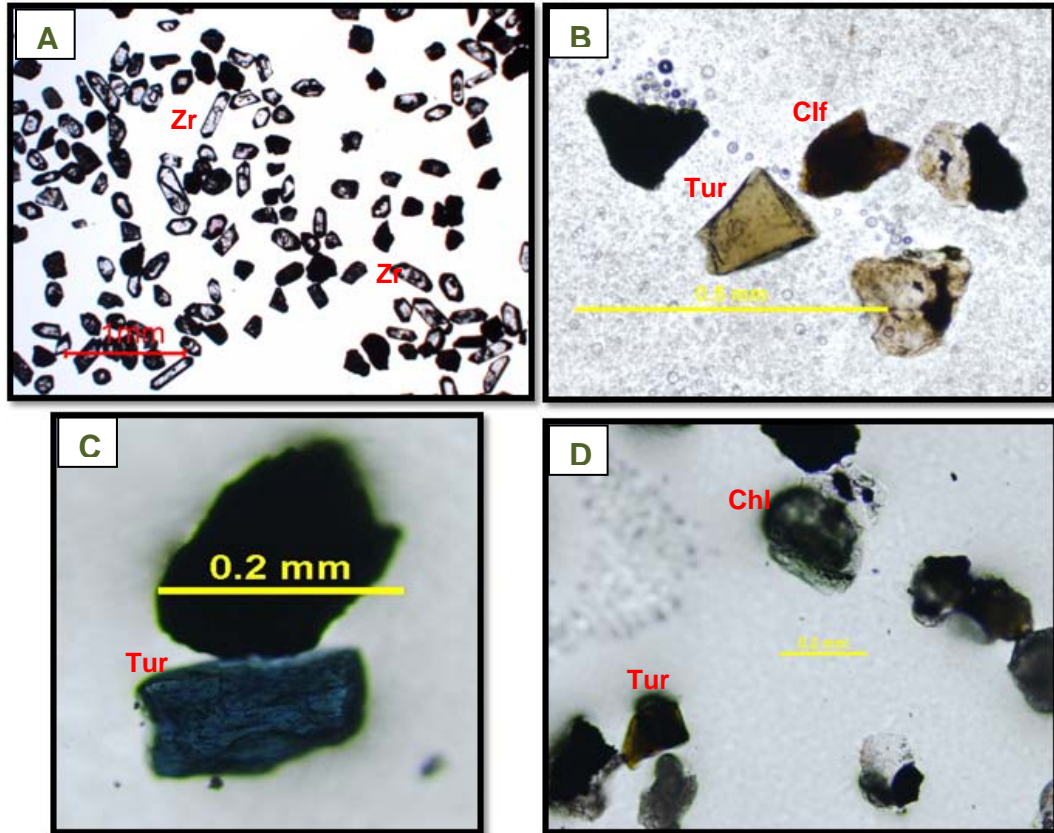
Imágenes de minerales pesados de la formación La Paz. (A) zircones (Zr) subhedral y redondeados rosados y translúcidos; opacos; rutilos; turmalina café de forma irregular (B) zircón (Zr) subhedral; colofanas (Clf) marrón de forma granular; (C) apatito (Ap) subhedral de color amarillo; (D) rutilo (Rut) tabular de color rojo, granate (Grt) de forma hexagonal con bordes irregulares, epidota (Ep) de forma irregular.



Fuente: Autor

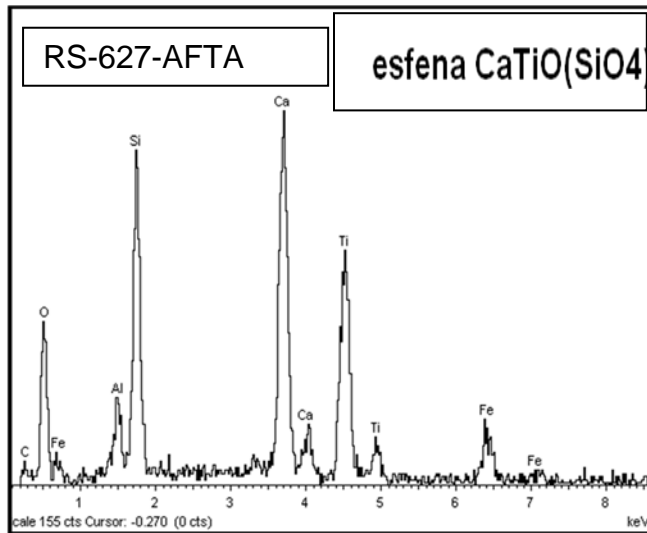
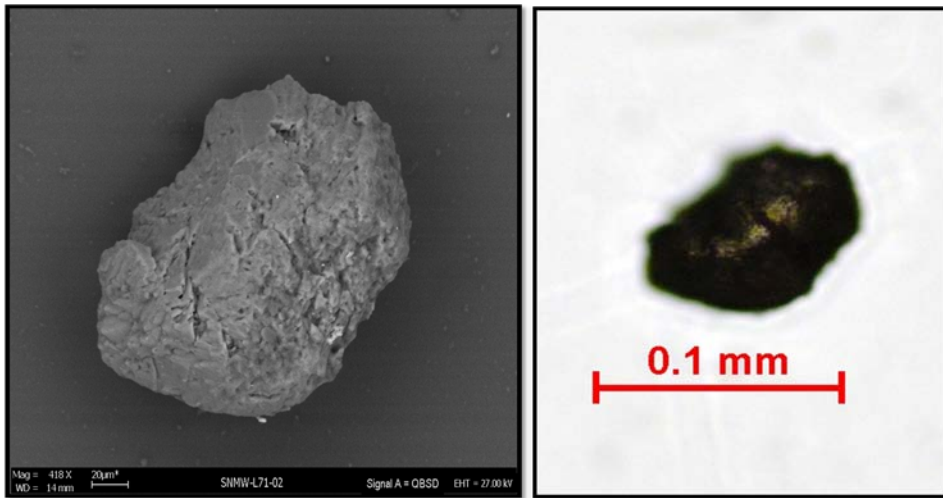
Esfalerita de forma irregular, el espectro muestra los picos de Zn y S típicos de su composición elemental, sin embargo se aprecian picos de Al, O y W, quizás elementos de impurezas o minerales adheridos al cristal.

Anexo 2.3 Formación Esmeraldas: se analizaron 3 muestras, en las cuales los principales minerales son turmalina, zircón y rutilo.



Fuente: Autor

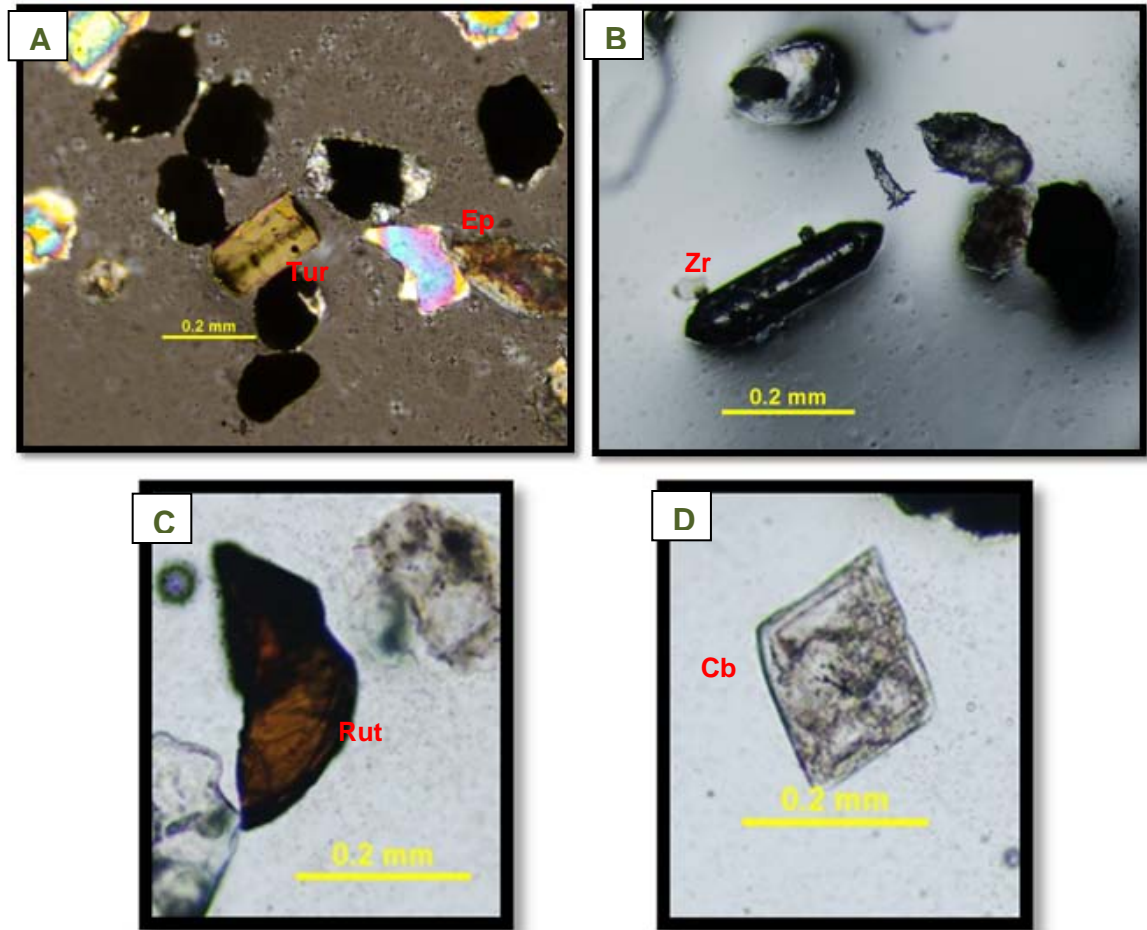
Imágenes de minerales pesados de la formación La Paz. (A) zircones (Zr) euhedrales, subhedrales y redondeados rosados y translúcidos; (B) turmalina (Tur) de color verde, colofanas (Clf) marrón de forma granular; (C) turmalina (Tur) de color azul; (D) Clorita (Chl) de forma irregular y de color verde, turmalina (Tur) de color café.



Fuente: Autor

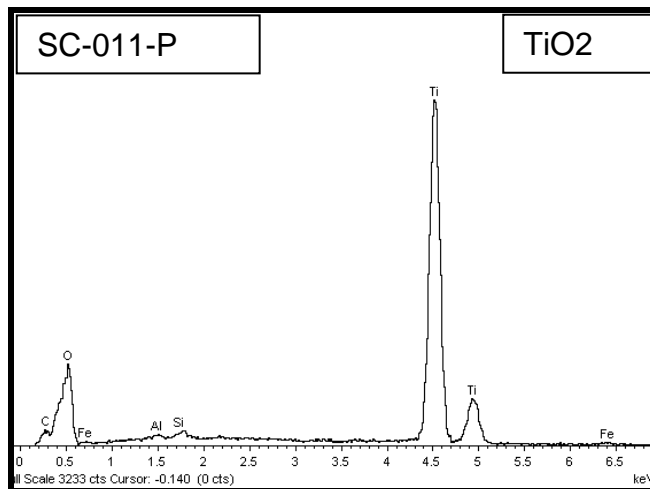
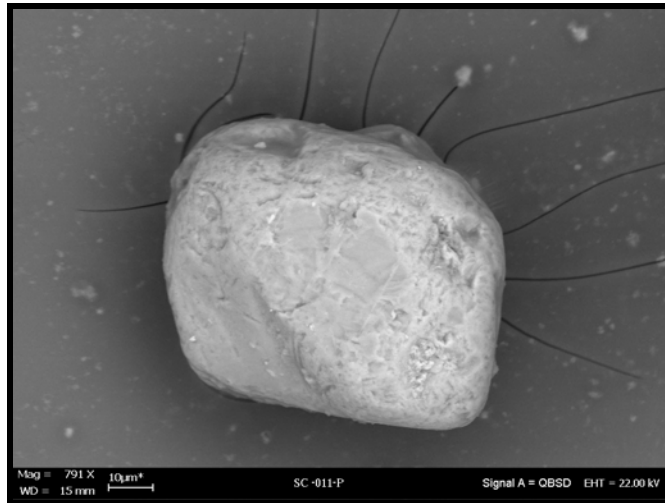
En las imágenes se aprecia un cristal de esfena de forma irregular, y su espectro muestra picos significativos de Ca, Ti, Si y O típicos de la composición de la esfena, sin embargo se presentan otros picos como Al y Fe quizás de minerales arcillosos o algunos óxidos adheridos al cristal.

Anexo 2.4 Formación Mugrosa: se analizaron 3 muestras donde abundan minerales como el zircón, epidota, colofana y carbonatos.



Fuente: Autor

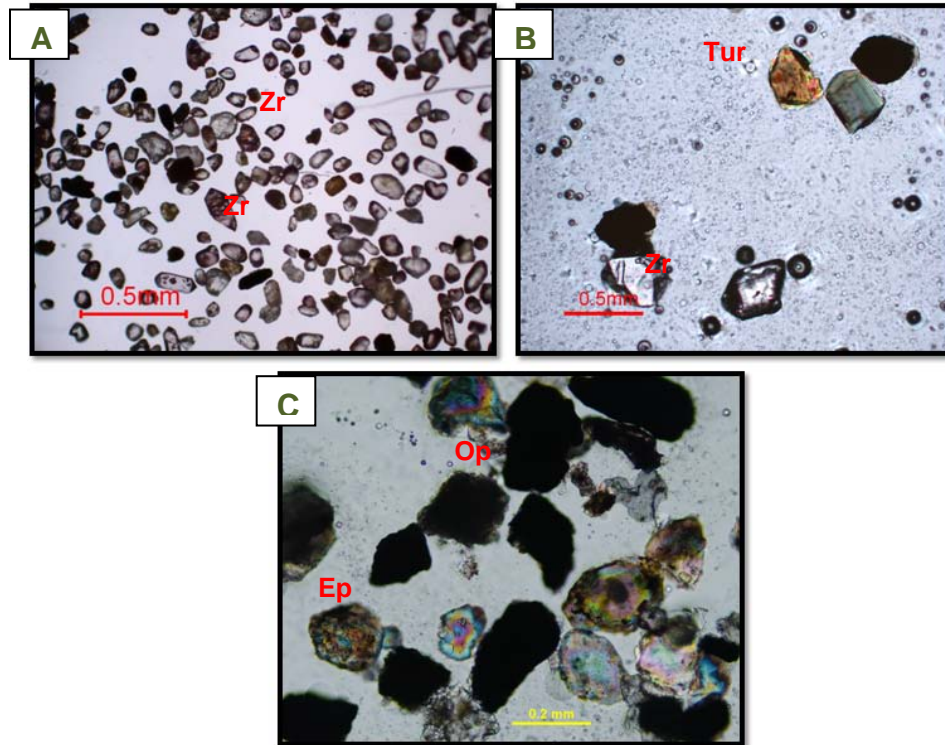
Minerales pesados constituyentes de la Formación Mugrosa. (A) Turmalina (Tur) tabular de color verde, epidota (Ep) de forma granular; (B) zircón (Zr) euédral translúcido; (C) rutilo (Rut) de forma irregular de color rojo; (D) carbonatos (Cb) quizás una Dolomita de forma tabular.



Fuente: Autor

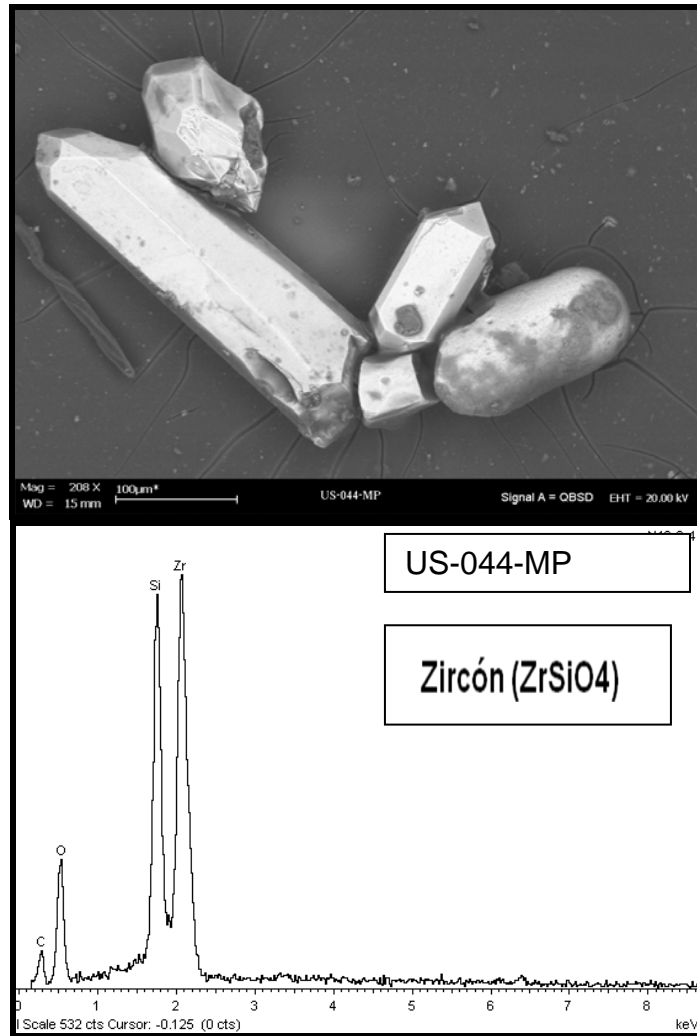
En las imágenes se aprecia un cristal de oxido de titanio con forma redondeada indicando un mineral reabajado, en el espectro se observan los picos típicos de Ti y O composición elemental de este mineral.

Anexo 2.5 Formación Colorado: se analizaron 4 muestras, en las cuales se presentan abundancias de minerales como zircón, epidota, carbonatos.



Fuente: Autor

Minerales pesados presentes en la Formación Colorado. (A) zircones (Zr) de tipo euhedral, subhedral, subredondeados de color rosado y translúcidos; (B) zircón (Zr) subhedral translúcido, turmalina (Tur) de forma tabular de color verde; (C) epidota (Ep) de forma irregular, opacos.



Fuente: Autor

En la imagen se observan cristales de zircones de tipo ehedral, subhedral y subredondeado, en el espectros se acos significativos de Zr, Si y O.