



Concentración y caracterización de los minerales accesorios densos de algunas litologías precámbricas del noreste de Uruguay

Trabajo de Grado

Autor: Paulo Testoni

Tutora: Dra. Elena Peel

Octubre 2020

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, agradezco a la UDELAR por posibilitarme la chance y ofrecerme todas las herramientas necesarias para que esto fuera posible.

Mis sinceros agradecimientos a todos los docentes de Facultad de Ciencias por compartir su conocimiento y experiencia.

Especialmente a mi tutora, Elena, por toda su dedicación, paciencia y por confiarme la tarea de poner los equipos en marcha.

A mis compañeros y amigos de facultad por motivarme y acompañarme en esta jornada.

A todos aquellos que me incentivaron a seguir estudiando y colaboraron de alguna forma para cerrar este ciclo.

RESUMEN

En este trabajo están descritas las características mineralógicas de los minerales accesorios densos encontrados en algunas de las principales litologías del Complejo Paso del Dragón y de granitos del bloque Aiguá-Dionisio, ubicados al norte del dominio Oriental del escudo uruguayo. Además, el trabajo hace énfasis en los procesos de reducción y concentración de minerales, a través de la utilización de los equipos de concentración gravimétrica (Mesa Wilfley) y magnética (Separador Isodinámico Frantz), adquiridos recientemente por la Facultad de Ciencias. También se presenta una guía que tiene la intención de servir de apoyo al iniciante en la operación de estos equipos.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	2
RESUMEN	3
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 GENERALIDADES.....	1
1.2 FUNDAMENTACIÓN.....	1
1.3 OBJETIVOS	2
1.3.1 General.....	2
1.3.2 Específicos	2
1.4 ÁREA DE ESTUDIO	3
2 METODOLOGÍA	4
2.1 REVISIÓN DE LA METODOLOGÍA	4
2.1.1 Muestreo	4
2.1.2 Molienda	5
2.1.3 Tamizado.....	5
2.1.4 Concentración por Gravedad.....	5
2.1.4.1 Mesa Wilfley	9
2.1.5 Concentración Magnética	13
2.1.5.1 Separador isodinámico de Frantz	18
2.2 MÉTODOS EMPLEADOS EN LA SEPARACIÓN DE LOS MINERALES.....	21
3 MARCO GEOLÓGICO.....	23
4 RESULTADOS	27
4.1 TURMALINITA CERRO LA TUNA.....	28
4.1.1 Mineralogía.....	29
4.1.2 Cuantificación composicional.....	33
4.2 ESQUISTO LA MICAELA	37
4.2.1 Mineralogía.....	38
4.2.2 Cuantificación composicional.....	44
4.3 GRANITO P13	46
4.3.1 Mineralogía.....	47
4.3.2 Cuantificación composicional.....	57
4.4 GRANITO P34	61
4.4.1 Mineralogía.....	62
4.4.2 Cuantificación composicional.....	68
4.5 GUÍA PARA LA UTILIZACIÓN DE LOS EQUIPOS	72
4.5.1 Mesa Wilfley.....	72
4.5.2 Separador Isodinámico Frantz.....	78
4.6 RECOMENDACIONES	82
5 CONCLUSIONES	83
6 BIBLIOGRAFÍA	84

1 INTRODUCCIÓN

1.1 GENERALIDADES

Se presenta aquí el Trabajo Final de la Licenciatura en Geología, Facultad de Ciencias, Universidad de la República. El mismo se enmarca dentro de la geoquímica aplicada, particularmente relacionado a la prospección geoquímica de minerales y de proveniencia. El trabajo tiene como objetivo aportar información sobre los minerales accesorios densos que componen algunas de las principales litologías del Complejo Paso del Dragón (Peel, 2012) y de granitos pertenecientes al bloque Aiguá-Cuchilla Dionisio (sensu Masquelin, 2006); así como realizar la puesta en marcha de los procesos de laboratorio relacionados a la concentración de minerales.

Para la realización de esta investigación se utilizaron herramientas fundamentales de campo y laboratorio, y, se pusieron en marcha dos nuevos equipamientos adquiridos por el Instituto de Ciencias Geológicas, esenciales para la tarea.

Cabe destacar que este trabajo se sitúa dentro del Proyecto ANII FCE1_2017_136496 "Firmas isotópicas y geocronología de los bloques Dionisio y Sierra de los Ríos del Cinturón Dom Feliciano (NE de Uruguay): implicancias en su evolución tectónica".

1.2 FUNDAMENTACIÓN

Los estudios de minerales densos han enriquecido las Ciencias de la Tierra con datos informativos durante más de un siglo, con el potencial de integración con la geología aplicada y la investigación interdisciplinaria.

El uso de la química mineral en la investigación de procedencia demuestra cómo los estudios de varias especies de minerales densos se benefician de los continuos avances tecnológicos, y prácticamente todos estos minerales pueden someterse a técnicas geoanalíticas que permiten determinar sus componentes principales y los elementos traza, e identificar su química cristalina.

Según Mange (2008), los controles petrogenéticos imparten firmas elementales distintivas a las fases minerales en rocas ígneas y metamórficas, y pueden ser usados como una herramienta genética para ayudar a decodificar su paragénesis. El circón, el granate, la turmalina, el apatito son ejemplo de algunos de los minerales densos ampliamente utilizados por sus sistemas isotópicos, inclusiones (que son minerales predominantemente densos) y química. La morfología del circón ha sido considerada como un indicador petrogenético (Corfu *et al.*, 2003); se sabe que las variedades de minerales de color, como el circón y la turmalina, son diagnósticos de procedencia (Mange-Rajetzky, 1992); la morfología del apatito se ha utilizado para evaluar el historial de transporte de sedimentos en areniscas de Escocia (Mange-Rajetzky, 1992).

Es importante enfatizar que los conjuntos de minerales densos son relativamente diversos, y las especies particulares elegidas para la geoquímica están asociadas con otros minerales que también son portadores de información. Por lo tanto, los datos de química mineral deben integrarse con la información de todo el conjunto para garantizar que las conclusiones sean efectivamente válidas.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 GENERAL

El objetivo principal de este trabajo es caracterizar mineralógicamente a los minerales accesorios densos de algunas de las litologías integrantes del Complejo Paso del Dragón (CPD) y de granitos del Batolito Dionisio y Sierra de los Ríos. De esta manera se contribuye a la dilucidación de la génesis de esas litologías y evolución local y regional.

1.3.2 ESPECÍFICOS

Como objetivos específicos se plantean:

- La puesta en marcha de los equipos de concentración y separación de minerales (Mesa Wilfley y Separador Isodinámico Frantz);
- Elaboración de protocolos para el uso de los equipos en la separación de minerales densos, particularmente para el circón, mineral de amplio uso en estudios geocronológicos;
- Reconocimiento de las especies minerales densas presentes en las litologías seleccionadas a través del estudio óptico en lupa binocular;
- Determinación de la composición química mineral a través del análisis energética dispersiva de rayos X (EDS) en microscopio electrónico de barrido.

1.4 ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se encuentra situada a unos 40 Km al SE de la ciudad de Melo, capital del departamento de Cerro Largo (Fig. 1.1). El acceso desde Montevideo se realiza por las rutas nacionales nº 8 y nº 26, y se sitúa a unos 400 Km de la capital.

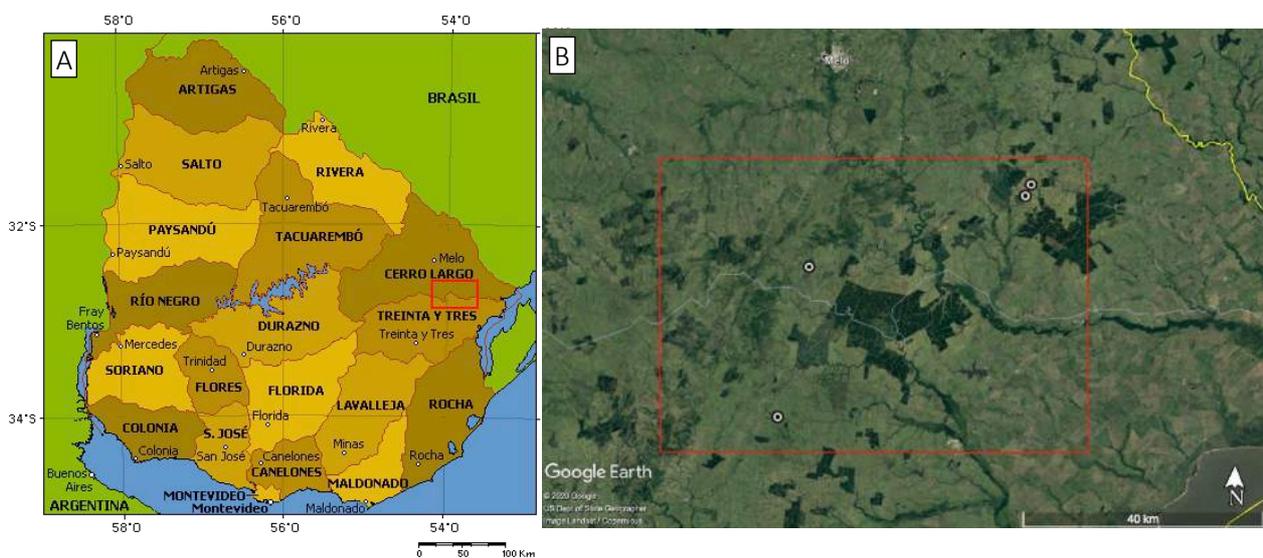


Figura 1.1: A) Ubicación del área de estudio en rojo. (Modificado de <http://enciclopedia.us.es>) B) Área de estudio en detalle con los puntos del muestreo. (Modificado de *Google Earth*)

2 METODOLOGÍA

2.1 REVISIÓN DE LA METODOLOGÍA

Los estudios geoquímicos involucran una serie de etapas necesarias que van desde la obtención de las muestras de interés, hasta sus preparaciones mecánicas en laboratorio.

En este capítulo se expondrán los fundamentos teóricos de separación y concentración de minerales, y los equipos que fueron utilizados para este fin. En la figura 2.1 se visualizan las etapas utilizadas para la concentración de minerales.

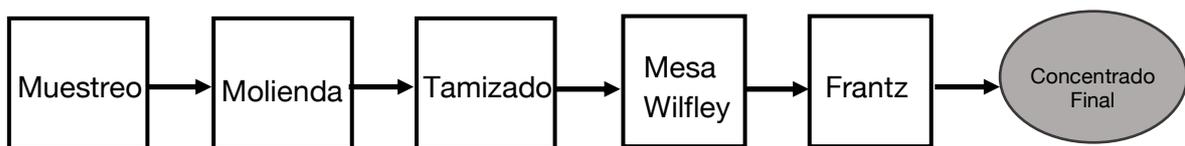


Figura 2.1: Diagrama de flujo de procesos utilizados.

2.1.1 MUESTREO

A pesar de ser una práctica regular, elegir un afloramiento apropiado para el muestreo es esencial. Es importante considerar la naturaleza del afloramiento y recolectar rocas que son extrañas al afloramiento, ya que esto contaminaría la muestra. Siempre que sea posible, es mejor obtener muestras de rocas frescas ya que la meteorización profunda del afloramiento y fracturas pueden afectar los resultados finales. Aunque varios minerales son generalmente robustos en escalas de tiempo geológicas, los procesos de meteorización pueden inducir cambios químicos en los minerales. Si el propósito es obtener un análisis inequívoco, se debe evitar la evidencia de meteorización, donde los eventos térmicos asociados con la alteración pueden haber inducido cambios en la composición química o isotópica (Chisholm *et al.*, 2014).

2.1.2 MOLIENDA

La reducción del tamaño de la muestra se realiza con el propósito de desagregar los minerales, liberando granos individuales atrapados en cristales de la roca. Juntamente con el tamizado, son los procesos principales en la producción de un agregado homogéneo previo a la concentración propiamente dicha (Wills *et al.*, 2006).

La trituradora de mandíbula excéntrica superior es el principal equipamiento utilizado en el proceso de reducción. La trituradora de mandíbula funciona comprimiendo y cortando fragmentos de roca entre una placa de movimiento oscilante y una placa fija. Las dos placas se conocen como mandíbulas. Una vez que la muestra ha sido triturada, está lista para ser tamizada.

2.1.3 TAMIZADO

El tamizado es uno de los métodos de dimensionamiento más antiguos conocidos. Hay varios dispositivos disponibles para los análisis de laboratorio moderno, dependen del propósito, el rango de tamaño granulométrico de interés y la cantidad de material de tamaño deseado. El más utilizado actualmente es el agitador Ro-tap, usado para determinar la distribución de tamaños, o para obtener pequeñas cantidades de fracciones de tamaño de grano limitado (Han *et al.*, 2009).

2.1.4 CONCENTRACIÓN POR GRAVEDAD

Según Singh (1997), la separación por gravedad de dos minerales con diferentes densidades se lleva a cabo por su movimiento relativo en respuesta a la fuerza de la gravedad y, a una o más fuerzas. Normalmente, una de las fuerzas es la resistencia al movimiento de un fluido viscoso, por ejemplo, agua. Cuando se alcanza el equilibrio entre las fuerzas de resistencia gravitacional y de fluidos, el cuerpo alcanza su velocidad de asentamiento y luego cae a una velocidad uniforme (Wills *et al.*, 2006).

En consecuencia, además de la gravedad específica, factores como el tamaño, la forma y el peso de las partículas afectan el movimiento relativo y, por lo tanto, la separación. La facilidad o dificultad de la separación depende de las diferencias relativas en estos factores.

Los 'Criterios de concentración' (CC), que dan una idea de la posibilidad de separación de dos minerales, pueden expresarse mediante la ecuación (Singh *et al.*, 1997; Han *et al.*, 2009; Wills *et al.*, 2006):

$$CC = \frac{(d_H - d_F)}{(d_L - d_F)}$$

donde:

d_H = gravedad específica del mineral denso

d_F = gravedad específica del fluido

d_L = gravedad específica del mineral ligero

Generalmente cuando el cociente es mayor que 2,5 (ya sea positivo o negativo) la separación por gravedad es relativamente fácil. Con una disminución en el valor del cociente, la eficiencia de la separación disminuye y por debajo de 1,25, en general, la concentración por gravedad no es factible.

Como se mencionó anteriormente, además de la gravedad específica, el movimiento de una partícula en un fluido también depende de su tamaño. La eficiencia de la concentración por gravedad aumenta con un aumento en el tamaño de la partícula.

El movimiento de partículas está gobernado por la *Ley de Newton* (Singh *et al.*, 1997; Han *et al.*, 2009):

$$v = \left[3 g d \frac{(D_s - D_f)}{D_f} \right]^{1/2}$$

donde:

v = velocidad de asentamiento de la partícula

D_s = densidad del sólido

D_f = densidad del fluido

Para partículas pequeñas, con diámetros inferiores a 50 μm , el movimiento está dominado por la *Ley de Stokes*, donde la fuerza de arrastre sobre la partícula esférica se debe completamente a la resistencia viscosa (Wills *et al.*, 2006), y estos tienden a responder mal a los separadores de gravedad. La eficiencia de los procesos de gravedad, por lo tanto, aumenta con el tamaño de la partícula, y las partículas deben ser lo suficientemente gruesas para moverse de acuerdo con la ley de Newton. En la práctica, se requiere un control estrecho de los procesos de alimentación para reducir el efecto del tamaño y hacer que el movimiento relativo de las partículas dependa de la gravedad específica (Han *et al.*, 2009). En general, se puede comparar el tamaño apropiado con la curva estándar como se muestra en la figura 2.2.

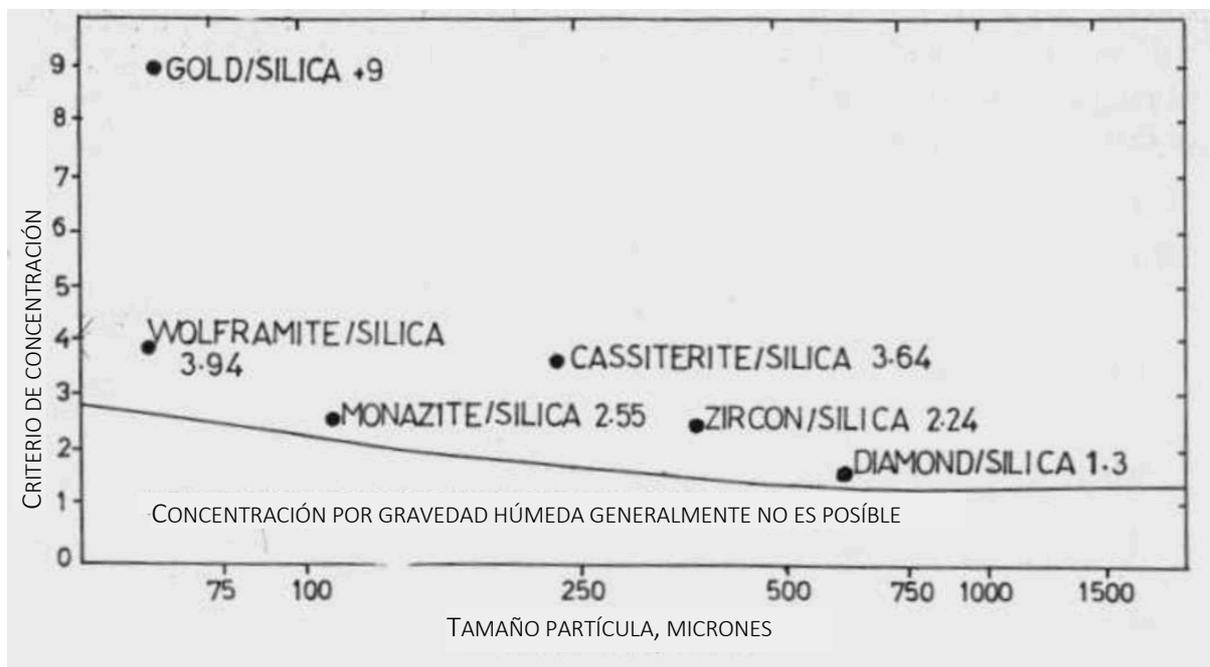


Figura 2.2: Criterio de concentración relacionado a los distintos tamaños de partículas. (Modificado de Singh, 1997)

Una combinación de mecanismos es útil para explicar el comportamiento de cualquier separador por gravedad. Los mecanismos propuestos por Singh *et al.* (1997) son: la decantación estática, estratificación, película de agua que fluye, y superficie de agitación; que se describen brevemente a continuación y se muestran esquemáticamente en la figura 2.3.

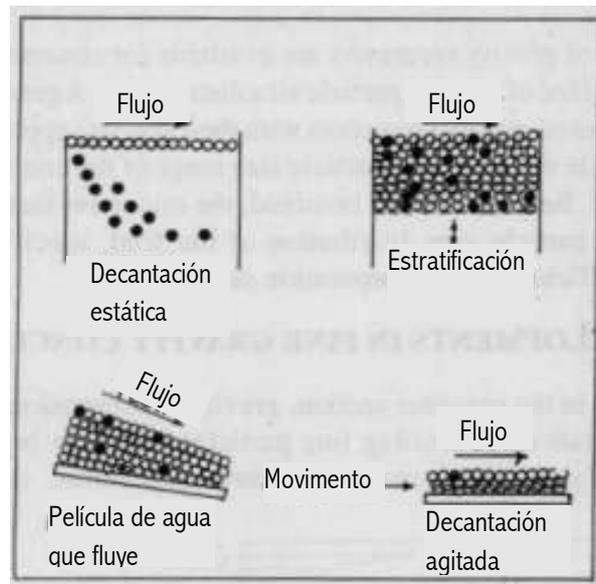


Figura 2.3: Representación esquemática de los mecanismos de concentración por gravedad. (Modificado de Burt, 1984)

- Decantación estática: la metodología emplea un fluido con la densidad aparente entre la de los minerales. Por lo tanto, debido a la diferencia en la flotabilidad, un mineral flota mientras que el otro se hunde.
- Estratificación: los minerales se estratifican por una fluidización intermitente causada por la pulsación del fluido en un plano vertical.
- Película de agua que fluye: los minerales son separados por su movimiento relativo a través de una corriente que fluye por un plano por la acción de la gravedad, formando un abanico y clasificándose por peso específico.
- Decantación agitada: los elementos se separan superponiendo una fuerza de corte horizontal sobre la película que fluye.

2.1.4.1 MESA WILFLEY

También conocida como mesa de agua o mesa vibratoria, la mesa Wilfley es el más popular de varios dispositivos similares. Fue diseñada por Arthur R. Wilfley en 1896 en Colorado, Estados Unidos, utilizada por primera vez en su fábrica de sellos, y en seguida usada por mineros en la separación de sulfuros de plomo, hierro y zinc, del oro y otros metales lucrativos. Su diseño general no ha cambiado significativamente en los últimos 124 años (Strong *et al.*, 2016), y desde entonces ha sido un dispositivo común para concentrar partículas en el rango intermedio y fino. El Laboratorio de Corte y Molienda de FCIEN cuenta con una mesa Holman-Wilfley 800 (Fig. 2.4).



Figura 2.4: Mesa Hofman-Wilfley 800.

Cuando la plataforma de la mesa se inclina suavemente hacia abajo en la dirección transversal, y una película de agua fluye sobre la superficie, el agua más cercana a la superficie se retrasa por la fricción del contacto con la superficie de la mesa; la velocidad aumenta hacia la superficie del agua. Si se introducen partículas minerales, las partículas pequeñas no se moverán tan rápido como las partículas grandes, ya

que se sumergirán en la parte del agua que se mueve más lentamente. Las partículas con alta gravedad específica se moverán más lentamente que las partículas más ligeras, por lo que se producirá un desplazamiento lateral del material (Fig. 2.5). La película de agua que fluye permite separar efectivamente las partículas ligeras gruesas de las partículas pequeñas y densas.

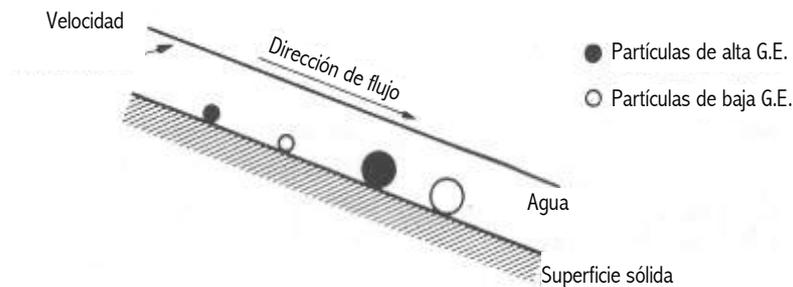


Figura 2.5: Comportamiento de diferentes partículas en una película de agua que fluye. G.E = gravedad específica. (Modificado de Wills *et al.*, 2006)

Otro mecanismo que ocurre es la estratificación vertical, la cual se da debido a la acción de agitación que se lleva a cabo detrás de los rifles. Estos rifles corren paralelos al eje largo de la mesa y se reducen desde una altura máxima en el lado de alimentación, hasta que mueren cerca del lado opuesto, parte del cual queda liso. Las partículas minerales se estratifican en las partes protegidas detrás de los rifles, donde las partículas más finas y pesadas están en la parte inferior y las partículas más gruesas y livianas en la parte superior (Fig. 2.6). Debido al estrechamiento en la altura de los rifles, las partículas progresivamente más finas y de mayor densidad se ponen continuamente en contacto con la película de agua que fluye por encima de los rifles.

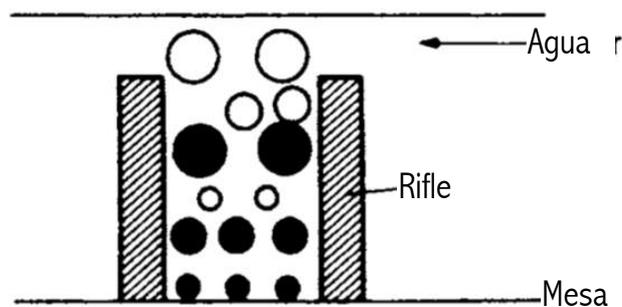


Figura 2.6: Mecanismo de estratificación de partículas detrás de los rifles. (Modificado de Wills *et al.*, 2006)

Una representación esquematiza de la mesa Wilfley se observa en la figura 2.7. El equipo consiste en una plataforma ligeramente inclinada, A, sobre la cual se introduce la alimentación, aproximadamente 25% en peso de sólidos, en la caja de alimentación C; el agua de lavado se distribuye a lo largo del lado de alimentación desde D. La mesa se hace vibrar longitudinalmente, por el mecanismo B, usando un golpe lento hacia adelante y un retorno rápido, lo que hace que las partículas minerales "se arrastren" a lo largo de la plataforma paralela en la dirección del movimiento. Así, los minerales están sujetos a dos fuerzas: a la película de agua que fluye y el movimiento oscilatorio de la mesa.

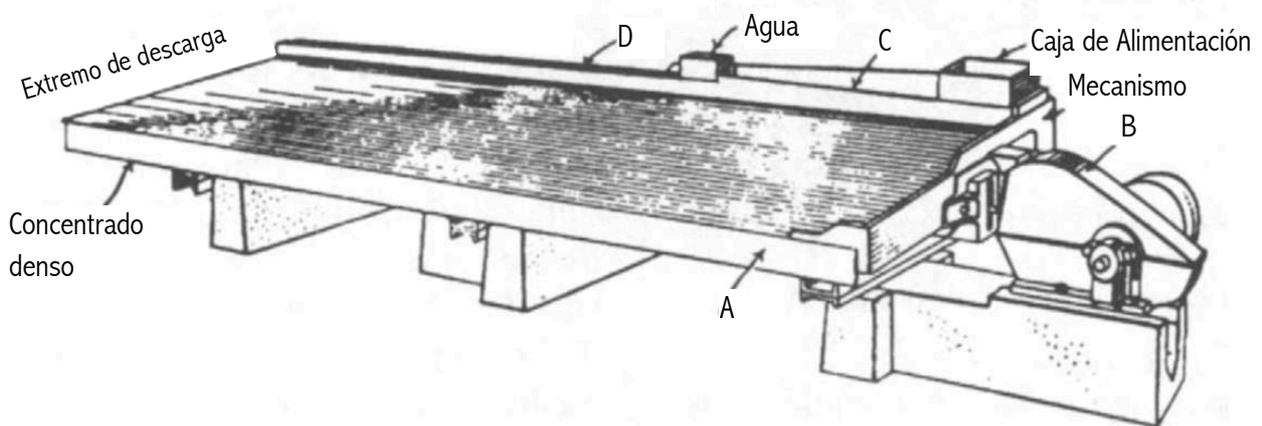


Figura 2.7: Representación esquemática de la Mesa Wilfley. (Modificado de Wills *et al.*, 2006)

El efecto neto es que las partículas se mueven diagonalmente a través de la plataforma desde el extremo de alimentación. Las partículas más pequeñas y densas se moverán hacia el extremo más alejado (extremo de descarga) y se capturan a medida que se lava, mientras que las partículas más grandes y ligeras se lavan en la parte inferior de la mesa y se pueden retener si estos minerales también son objeto de la separación. La figura 2.8 muestra un diagrama idealizado de la distribución de las partículas en la mesa (Wills *et al.*, 2006).

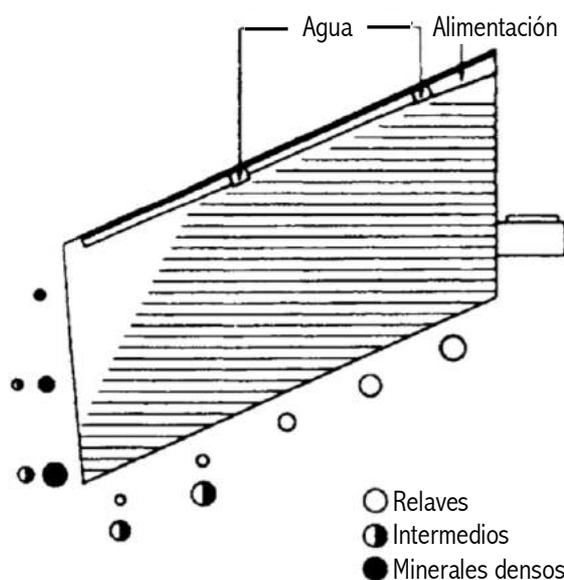


Figura 2.8: Distribución de partículas en la mesa Wilfley.
(Modificado de Wills *et al.*, 2006)

La separación por densidad está controlada por una serie de variables, como el flujo del agua de lavado, la pendiente de la plataforma, la amplitud y la velocidad de alimentación.

La elevación del extremo de descarga a veces se considera necesaria para obtener un mejor grado de concentración, particularmente cuando las partículas ligeras son relativamente grandes. Se usa un aumento en la pendiente lateral para contrarrestar los efectos adversos de la falta de agua de lavado o una alimentación de granos de tamaño mayor (Sivamohan *et al.*, 1985). Se puede afirmar que sólo los métodos de ensayo y error pueden proporcionar las elevaciones correctas de los extremos y los lados.

El tamaño de partícula también juega un papel muy importante en la separación: a medida que aumenta el rango de tamaños, disminuye la eficiencia de la separación. O sea, si la alimentación de una mesa está compuesta por una amplia gama de tamaños de partículas, algunas de estas partículas se lavarán de manera ineficiente.

Muchos otros factores, incluyendo la forma de las partículas y el tipo de cubierta, juegan un papel importante en las separaciones en este tipo de mesa. Las partículas planas, como la mica, aunque consideradas ligeras, no ruedan fácilmente por la

cubierta en la película de agua. Tales partículas se adhieren a la cubierta y se llevan en el extremo de descarga juntamente con el concentrado de mayor densidad. Del mismo modo, las partículas densas esféricas pueden moverse fácilmente en la película hacia el lavado de relaves.

2.1.5 CONCENTRACIÓN MAGNÉTICA

Según Tarling *et al.* (1993), las propiedades magnéticas surgen del movimiento de partículas cargadas eléctricamente. Por lo tanto, un electrón tiene una magnetización que está asociada con su espín axial y también debido a su movimiento orbital alrededor de un núcleo. Esto significa que todos los materiales tienen propiedades magnéticas a temperaturas superiores al cero absoluto (0 K).

Cuando se aplica un campo magnético a cualquier sustancia cuyas capas de electrones están completas el espín del electrón precesa y produce una magnetización en la dirección opuesta a la del campo aplicado, pero dicha alineación se pierde tan pronto como se elimina el campo de magnetización externa. Los materiales que se comportan de esta manera se denominan diamagnéticos. Todas las demás sustancias, aquellas con capas de electrones incompletas, pueden ser descritas como paramagnéticas y, en un campo aplicado, sus espines de electrones precesan para dar un momento magnético que tiene la misma dirección que el campo aplicado. Tanto el paramagnetismo como el diamagnetismo desaparecen tan pronto como se elimina el campo aplicado.

En ambos casos, la fuerza de la magnetización inducida (M) está directamente relacionada con la fuerza del campo aplicado (H), siendo la constante de proporcionalidad equivalente a la susceptibilidad (K); así, la magnetización, M , viene dada por:

$$M = KH = K(B/\mu_0)$$

donde M es el momento dipolar magnético por unidad de volumen (A/m), H es la intensidad del campo magnético (A/m), B es el campo magnético medido en Tesla y

μ_0 es la permeabilidad del espacio libre ($4\pi \cdot 10^{-7}$ henry/m). La susceptibilidad magnética se define como la relación entre la intensidad de magnetización y la fuerza del campo magnético aplicado.

Las sustancias diamagnéticas tienen susceptibilidades negativas ya que el campo producido está en la dirección opuesta a la del campo aplicado y sus susceptibilidades suelen estar en la región de -10^{-5} (SI) para los minerales de roca comunes. Los minerales paramagnéticos tienen susceptibilidades positivas que se extienden sobre varios órdenes de magnitud, principalmente de 10^{-2} a 10^{-4} (SI) para los minerales comunes formadores de rocas.

Los principales tipos de interacción de una sustancia con un campo magnético se clasifican en cinco divisiones principales: diamagnetismo, paramagnetismo, ferromagnetismo, ferrimagnetismo y antiferromagnetismo (Imhmed, 2012). Wills *et al.* (2006) considera el ferromagnetismo, ferrimagnetismo y antiferromagnetismo como un caso especial de paramagnetismo.

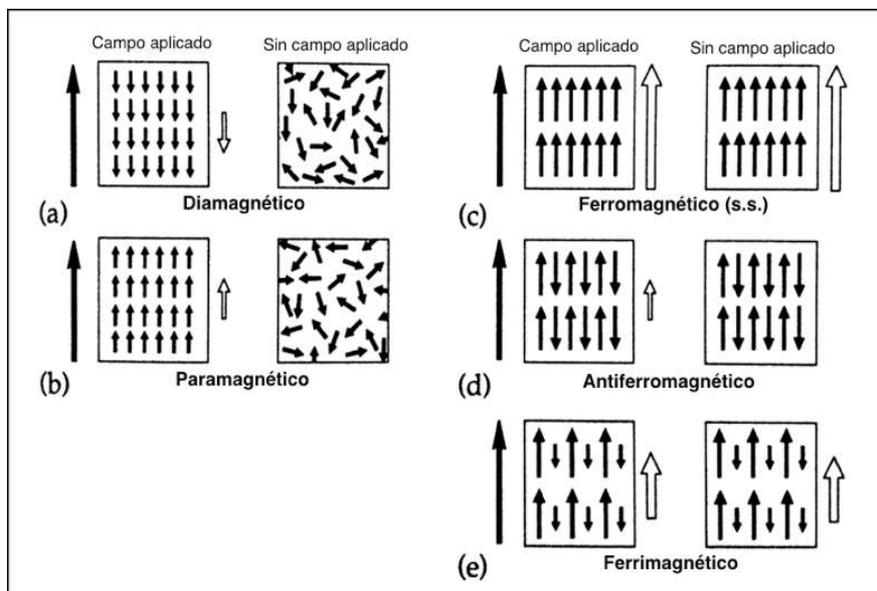


Figura 2.9: Clases de sustancias a) Diamagnético, b) Paramagnético, c) Ferromagnético, d) Antiferromagnético y e) Ferrimagnético. (Modificado de Tarling *et al.*, 1993)

Diamagnetismo:

El diamagnetismo se produce cuando los electrones precesan y se oponen a un campo magnético aplicado. Este fenómeno se observa en los movimientos orbitales de los electrones. Cuando se aplica un campo magnético a una sustancia en la que las capas de electrones están emparejadas con un número atómico par, el electrón gira y produce una magnetización negativa en la dirección opuesta a la del campo magnético aplicado (Fig. 2.9a).

En un campo magnético cero, las capas de electrones de un átomo no tienen dipolo neto. En consecuencia, una vez que se elimina el campo magnético externo, los giros de los electrones se aleatorizan y desaparecen los efectos diamagnéticos (Imhmed, 2012).

Paramagnetismo:

La susceptibilidad paramagnética suele ser mayor que la diamagnética a temperatura estándar y en campos magnéticos moderados. La susceptibilidad paramagnética se ve influenciada por temperaturas reducidas (mucho menos de 100 K) o en casos donde el campo magnético aplicado es muy alto. Uno de los átomos más explícitos con electrones no apareados es el hierro, y la susceptibilidad paramagnética suele ser proporcional al contenido total de hierro de la sustancia.

Los átomos o iones de esta clase de materiales tienen un momento magnético neto debido a electrones no apareados en sus órbitas parcialmente llenas. Los momentos magnéticos individuales no interactúan magnéticamente en las sales de metales de transición, los cationes tienen capas *d* parcialmente llenas y los aniones provocan la separación entre cationes. Esto debilita los momentos magnéticos en los cationes vecinos (Imhmed, 2012). El modelo de Langevin establece que cada átomo tiene un momento magnético que se orienta aleatoriamente como resultado de las energías térmicas; por lo tanto, en el campo magnético aplicado con valor inicial a cero, los momentos magnéticos apuntan en direcciones aleatorias. Cuando el campo magnético es distinto de cero, una alineación parcial de los momentos magnéticos atómicos en la dirección del campo se da como resultado una magnetización positiva

neta y una susceptibilidad positiva (Tarling *et al.*, 1983) (Fig. 2.9b). La mayoría de los carbonatos y silicatos que contienen hierro son paramagnéticos.

Para que una sustancia tenga propiedades paramagnéticas, los átomos o iones que la componen deben poseer un momento magnético permanente. Estos momentos son el resultado de momentos angulares de electrones no apareados en orbitales parcialmente llenos. Con la aplicación de un campo magnético externo, un par actúa sobre los dipolos, forzándolos a una alineación uniforme, que es paralela a la dirección del campo magnético aplicado. (Esta alineación paralela da como resultado una magnetización positiva neta y una susceptibilidad magnética positiva). La alineación de los momentos magnéticos es solo parcial debido al efecto aleatorio de los movimientos térmicos (Tarling *et al.*, 1983). Tras la eliminación de un campo externo, la magnetización paramagnética se aleatoriza rápidamente por estos efectos térmicos. Por lo tanto, la extensión de la alineación paramagnética es un equilibrio entre la temperatura absoluta y la fuerza del campo magnético. En contraste con el paramagnetismo, el diamagnetismo es efectivamente independiente de la temperatura. Por lo tanto, al aumentar la temperatura, las propiedades diamagnéticas dominan las propiedades magnéticas generales de un material. En sustancias paramagnéticas y diamagnéticas, la magnetización es inducida y condicionalmente temporal, porque el momento magnético neto observado desaparece al eliminar el campo aplicado.

Ferromagnetismo:

Los materiales ferromagnéticos se comportan de manera similar a los materiales paramagnéticos formando momentos magnéticos netos que son paralelos a la dirección de un campo aplicado. Los momentos magnéticos atómicos en materiales ferromagnéticos exhiben interacciones muy fuertes que resultan en una alineación paralela o antiparalela de sus momentos magnéticos (Fig. 2.9c). Esto produce una fuerte magnetización incluso en ausencia de un campo magnético aplicado; luego, una vez eliminado el campo, los materiales ferromagnéticos retienen un remanente del magnetismo adquirido.

A medida que se calientan los materiales ferromagnéticos, la agitación térmica de los átomos implica que el grado de alineación de los momentos magnéticos atómicos disminuye y, por lo tanto, la magnetización de saturación también disminuye. Finalmente, la agitación térmica se vuelve tan grande que el material se vuelve paramagnético. La temperatura de esta transición se llama temperatura de Curie (T_C), o punto de Curie, la temperatura por encima de la cual una sustancia ferromagnética pierde su ferromagnetismo y se vuelve paramagnética. Por encima de la temperatura de Curie, la susceptibilidad varía según la ley de Curie-Weiss (Imhmed, 2012).

Ferrimagnetismo

El ferrimagnetismo solo se observa en compuestos, que tienen estructuras cristalinas más complejas que los elementos puros. Las interacciones de intercambio permiten la alineación paralela de los momentos magnéticos atómicos en algunas partes del cristal y la alineación antiparalela en otras (Fig. 2.9e). Estos descomponen el material en dominios magnéticos. Los materiales ferrimagnéticos son muy similares a los materiales ferromagnéticos en términos de magnetización espontánea y temperaturas de Curie. Después de que se elimina el campo magnético aplicado, los materiales ferromagnéticos y ferrimagnéticos adquieren y retienen la magnetización remanente. Sin embargo, en general, los materiales ferromagnéticos y ferrimagnéticos tienen un orden magnético diferente. La magnetita es un ejemplo de material ferrimagnético (Imhmed, 2012).

Antiferromagnetismo

Los materiales antiferromagnéticos hacen que ocurra la alineación antiparalela de los momentos magnéticos atómicos durante las interacciones de intercambio. Esto contrasta con los materiales ferromagnéticos donde los momentos magnéticos atómicos se alinean en paralelo. Si las magnitudes de los momentos magnéticos atómicos son iguales y son completamente opuestos en dirección, esto dará como resultado una magnetización espontánea neta cero y el material es un antiferromagnético perfectamente compensado (Fig. 2.9d). Dichos materiales tienen

una remanencia nula, ninguna histéresis y una pequeña susceptibilidad positiva que varía de manera peculiar con la temperatura. Ilmenita es un ejemplo.

Cuando la cancelación de los momentos magnéticos no se completa, se observa un pequeño momento neto y el sistema se describe como antiferromagnetismo imperfecto. Este desequilibrio puede tener varios orígenes posibles, como defectos de la red, impurezas cristalinas o *spin-canting* cuando los enlaces de intercambio catión-anión-catión están ligeramente inclinados ($<1^\circ$). El antiferromagnetismo inclinado exhibe las características magnéticas típicas de los materiales ferromagnéticos y ferrimagnéticos. La hematita es un ejemplo de mineral antiferromagnético inclinado.

A diferencia de los materiales ferromagnéticos que muestran un comportamiento paramagnético por encima de su temperatura de Curie, los materiales antiferromagnéticos muestran un comportamiento paramagnético por encima de la temperatura de Néel (T_N). Esta es la temperatura por encima de la cual un material antiferromagnético se vuelve paramagnético (Imhmed, 2012).

2.1.5.1 SEPARADOR ISODINÁMICO DE FRANTZ

El separador isodinámico de Frantz es un dispositivo magnético que permite el fraccionamiento de materiales en función de sus propiedades magnéticas. Este separador, que se muestra en la figura 2.10, consta de un electroimán que tiene dos piezas polares largas con un espacio de aire largo y estrecho entre ellas. Según Svoboda (2010), el diseño del polo es tal que el perfil del campo magnético es isodinámico, de modo que la densidad de la fuerza magnética a lo largo del ancho del espacio de aire es constante.



Figura 2.10: Separador Isodinámico Frantz modelo L-1.

El material a ser separado ingresa al campo magnético en el punto A (Fig. 2.11). Si la fuerza de la gravedad (F_g) y la fuerza magnética (F_m) sobre una partícula se equilibran de tal manera que la partícula se mueve a lo largo de la línea central del espacio de aire, esta partícula tiene un 50% de posibilidades de ubicarse en una fracción magnética o no magnética.

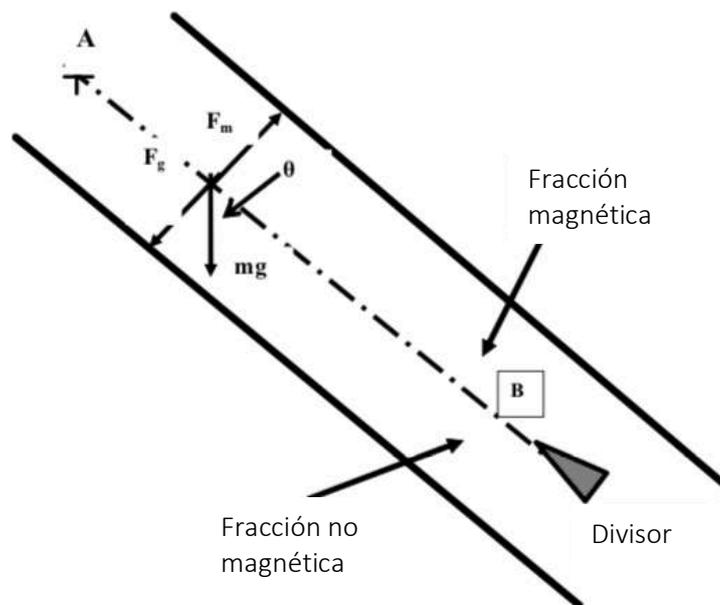


Figura 2.11: Fuerzas actuando sobre una partícula en el Separador Isodinámico. (Modificado de Svoboda, 2004)

El equilibrio de fuerzas se puede expresar como:

$$m_p g \sin\theta = \frac{k}{\mu_0} V_p B \nabla B$$

donde m_p y V_p son la masa y el volumen de la partícula, respectivamente, g es la constante gravitacional, θ es la pendiente transversal del espacio de aire y $B \nabla B$ es la fuerza del campo magnético. Por reorganización obtenemos:

$$x = \frac{\mu_0 g}{B \nabla B} \sin\theta$$

Se puede ver que, debido al patrón isodinámico del campo, la acción del separador sobre una partícula está determinada únicamente por su susceptibilidad magnética y es independiente del tamaño y la masa de la partícula. La magnitud del término $B \nabla B$ está determinada por la intensidad de la corriente eléctrica I en el electroimán de modo que:

$$x = \frac{\sin\theta}{k I^n}$$

donde n y k son constantes.

Así, la susceptibilidad magnética media de una muestra se puede definir como el valor para el cual el 50% de la muestra se ubica en la fracción magnética.

2.2 MÉTODOS EMPLEADOS EN LA SEPARACIÓN DE LOS MINERALES

Posteriormente al muestreo, las muestras de roca fueron procesadas en los laboratorios del Instituto de Ciencias Geológicas, y de Microscopía Electrónica de Facultad de Ciencias, siguiendo el diagrama presentado en este capítulo (Fig. 2.1):

1) Molienda: La reducción de las muestras se inició manualmente con el auxilio de una piqueta para posteriormente ser reducida en la trituradora de mandíbula.

2) Tamizado: Una vez fragmentadas, las muestras fueron tamizadas en la Ro-tap por 10 minutos, donde se seleccionaron los minerales retenidos en los tamices de malla 63, 125 o 250 μm (en la sección “resultados” se presenta la fracción utilizada en cada muestra).

3) Mesa Wilfley: En la secuencia, los minerales fueron procesados en la mesa Wilfley y separados en tres grupos: densos, intermedios y relaves (esta división no resulta valores de densidad absolutos, depende de las características de cada muestra). Las muestras fueron procesadas de una a tres veces en la mesa hasta que la separación haya sido considerada satisfactoria.

4) Secado: en estufa a 55° C de 16 a 20 horas, y posteriormente a una inspección en lupa de los resultados obtenidos en la mesa Wilfley, el objeto del estudio pasa a ser exclusivamente la fracción denominada “densos”.

5) Extracción los minerales ferri/ferromagnéticos: con el auxilio de un imán de mano (NdFeB), esa fracción fue denominada “magnéticos”.

6) Frantz: los minerales fueron procesados en el Separador Isodinámico Frantz, donde se optó por utilizar el equipo con incrementos de 0,1 amperes de intensidad del campo magnético.

7) Análisis óptico individual de cada una de las fracciones fueron agrupadas según su composición cuando pertinente.

8) En una única muestra fue utilizado líquido denso (LST) a fin de concentrar minerales en la fracción diamagnética. (más detalles en 4.3.2).

9) Identificación en lupa binocular: La identificación de los minerales en lupa fue la tarea más laboriosa en el proceso. Los minerales se presentan principalmente fragmentados y se buscó identificar las propiedades ópticas de cada uno de los minerales en lupa de mesa. Al mismo tiempo, se hizo uso de una linterna UVB para identificar luminiscencia natural, además de observar otras propiedades distintivas, como color de raya y resistencia mecánica (dureza de Mohs).

10) Microscopio Electrónico de Barrido: Las muestras fueron entonces preparadas para el análisis en MEB, donde se seleccionaron individualmente los fragmentos de cada mineral con distintas propiedades ópticas y magnéticas, y confeccionado el montaje de granos. Fueron hechos análisis puntuales de *Energía Dispersiva de Rayos X (EDS)* sobre los minerales, además de *Mapeo Composicional Global* de cada fracción en busca de minerales que no fueron diferenciados en lupa.

11) Cuantificación: La cuantificación de los minerales se dio por medio de comparadores visuales, donde se estimaron las proporciones de cada mineral en cada una de las fracciones separadas anteriormente, propiamente pesadas en la balanza de precisión.

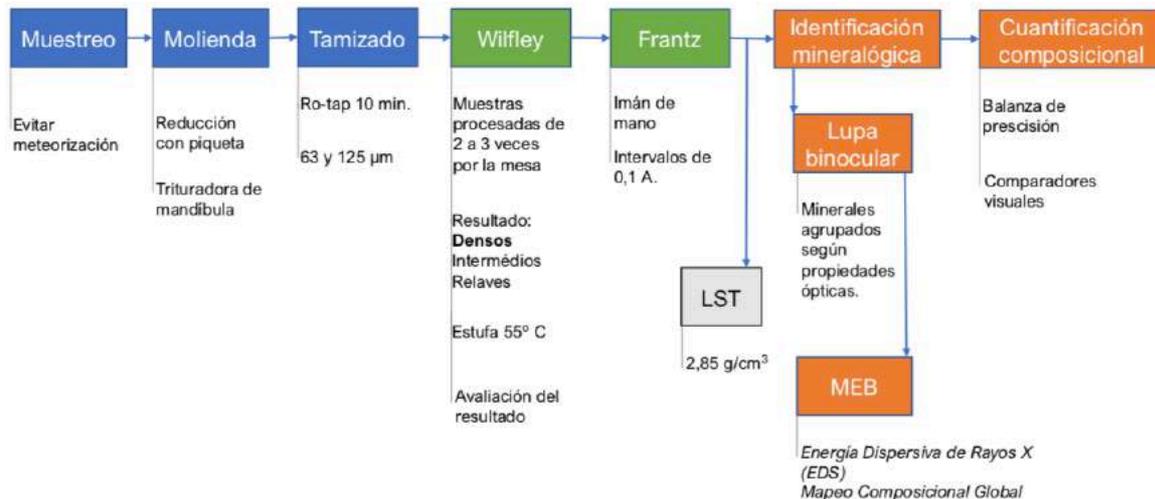


Figura 2.11: Diagrama de flujo con la metodología empleada.

3 MARCO GEOLÓGICO

La región noreste del Uruguay, que abarca los bloques Dionisio y Sierra de los Ríos (sensu Masquelin, 2006), consiste de un basamento gneísico-migmatítico intensamente deformado e intruido por varios cuerpos graníticos ediacaranos que conforman el batolito Dionisio-Sierra de los Ríos (Preciozzi et al. 1985), y por una unidad metavolcano-sedimentaria llamada Complejo Paso del Dragón (Peel, 2012). Además, en esa región del país ocurren unidades sedimentarias y volcánicas fanerozoicas correspondientes al relleno de la cuenca Laguna Merín, que no son el objetivo de este trabajo (Fig. 3.1b).

Los bloques Dionisio y Sierra de los Ríos se desarrollan al este de la zona de cizallamiento de Sierra Ballena y limitan entre sí a través de la zona de cizallamiento de Cerro Amaro (Fig. 3.1b). Al este continúan hacia territorio brasilero, mientras que al sur el bloque Dionisio se encuentra cubierto por los sedimentos de la cuenca Laguna Merín, y al norte el bloque Sierra de los Ríos está cubierto por los sedimentos de la cuenca Norte. El grado de conocimiento que se tiene sobre estos bloques es escaso, ya que se han realizado pocos estudios geológicos. Básicamente, la información disponible es a escala regional, con ausencia de trabajos cartográficos más detallados, petrológicos, geocronológicos o geofísicos.

Algunos autores consideran que ambos bloques, Dionisio y Sierra de los Ríos, son parte del Terreno Cuchilla Dionisio (e.g. Bossi *et al.*, 1998; Bossi y Gaucher, 2004; Gaucher *et al.*, 2014), mientras que otros lo consideran parte del Cinturón Dom Feliciano (Fig. 3.1a) (e.g. Oyhantçabal *et al.*, 2007, 2009; Sánchez Bettucci *et al.*, 2010; Hueck *et al.*, 2018, Peel *et al.*, 2018). Este cinturón es una mega-estructura desarrollada durante la fusión de Gondwana Occidental como resultado de la colisión entre los cratones del Río de la Plata y Kalahari (Porada, 1979; Fragoso César, 1980; Basei *et al.*, 2000).

El basamento gneissico-migmatítico ha sido correlacionado por Peel *et al.* (2018) con el Complejo Cerro Olivo (Masquelin, 2002) del Terreno Punta del Este, localizado en la porción sureste del Uruguay. De acuerdo con Peel *et al.* (2018) se trata de gneisses y migmatitas aflorantes al sur del CPD que se encuentran profundamente alterados. Las migmatitas presentan estructuras estromáticas, donde las porciones

recristalizadas cuarzo-feldespáticas son observadas. Los gneises también están profundamente alterados y muestran bandeo milimétrico, compuesto de bandas cuarzo-feldespáticas y bandas biotíticas. Tanto las migmatitas como los gneises están recortados por diques ácidos y básicos. Además, estos autores proponen que la migmatización ocurrió ca. 670 Ma.

El batolito Dionisio-Sierra de los Ríos (Preciozzi *et al.*, 1985) representa localmente al batolito Aiguá-Pelotas del Cinturón Dom Feliciano. Está conformado por granitoides calcoalcalinos de alto potasio, meta- a peraluminosos que intruyeron en el basamento gneísico-migmatítico. Litológicamente abarca monzogranitos, alcalifeldespato-granitos, sieno granitos, y sienitas (Preciozzi *et al.*, 1985; Bossi *et al.*, 1998; Gaucher *et al.*, 2014; entre otros). Algunos cuerpos han sido datados, estableciéndose un rango de edades de 640 a 570 Ma (e.g. Peel, 2012; Gaucher *et al.*, 2014; Will *et al.*, 2020). Además, las edades modelo Sm (T_{DM}) reportadas, junto a los escasos datos isotópicos Sr ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ desde 0.70817 a 0.71759) y Nd (ϵNd entre -4,2 y -6,4), permitieron proponer una participación cortical en su génesis (Peel *et al.*, 2015; Gaucher *et al.*, 2014; Will *et al.*, 2020). Asimismo, se considera un ambiente tectónico de poscolisión para su emplazamiento (e.g. Oyhantçabal *et al.*, 2009; Peel *et al.*, 2020).

El Complejo Paso del Dragón (CPD) abarca cerca de 280 Km². Está alojado al norte y oeste por el Batolito Dionisio-Sierra de los Ríos (Preciozzi *et al.*, 1985), al sur por migmatitas y gneises del Terreno Punta del Este (Preciozzi *et al.*, 1999), y es afectado por la Zona de Cizalla Cerro Amaro (Bossi y Campal, 1992).

El CPD comprende rocas ígneas plutónicas, volcánicas y sedimentarias, metamorfizadas, con relaciones estructurales intrincadas (Peel *et al.*, 2012), formando un arco de dirección N20° E a EO (Preciozzi *et al.*, 1985). Se encuentra altamente tectonizado, fracturado y plegado, con metamorfismo en facies esquistos verdes e indicios de facies anfibolita (Peel *et al.*, 2018), dividido en dos unidades litodémicas:

(a) Esquisto La Micaela (Bossi 2010) que corresponden a más del 80% del complejo y está constituido por una asociación meta-vulcano-sedimentaria con deformación múltiple. Las principales litologías son: mica-esquistos y clorita-esquistos cuarzosos; cuarcitas; y tufos metariolíticos (Peel *et al.*, 2018).

(b) Serpentinitas del Cerro La Tuna (Bossi *et al.*, 2000) que constituyen menos del 20% del complejo y abarcan rocas máficas-ultramáficas, deformadas y metamorfizadas. Peel *et al.* (2018) agrupa las litologías según su mineralogía primaria: serpentinitas compuestas de serpentina, clorita, magnetita, tremolita, talco y carbonatos; tremolita-esquistos con clorita, minerales opacos y serpentinita; talco-esquistos con minerales opacos y tremolita; clorita-esquistos con magnetita y serpentinita como accesorios; carbonatos con minerales opacos y talco; y epidoto-actinolita-esquistos y epidotitas.

Peel *et al.* (2018) interpretan el Complejo Paso del Dragón como resquicios de unidades sedimentarias y magmáticas generadas en un ambiente relacionado con un arco, que fue emplazado tectónicamente en los granitos del batolito. Su generación, deformación y metamorfismo, principalmente de edad de ediacarana, están asociados a la fusión de Gondwana occidental. La depositación se produjo después de 660 Ma basado en el análisis de circones detríticos más jóvenes de las litologías meta-volcano-sedimentarias (Gaucher *et al.*, 2011; Peel, 2012); sin embargo, Peel *et al.* (2018) sugieren que la depositación ocurre alrededor de 590 Ma, y el metamorfismo regional ocurrió alrededor de los 570 Ma, según registrado tanto en el Complejo Paso del Dragón como en Granito Sierra de los Ríos.

Además, Will *et al.* (2014) presentaron datos isotópicos y geoquímicos para anfibolitas y serpentina-fels/esquistos del litodema Serpentinitas del Cerro la Tuna, reafirmando un origen a partir de manto empobrecido sin interacción con material litosférico continental.

Ramos *et al.* (2014) han descrito varias ocurrencias de rocas metamáficas a metaultramáficas conocidas como Asociación Meta-Máfica-Ultramáfica Arroio Grande en Rio Grande do Sul, lo que sugiere la continuidad del Complejo Paso del Dragón en el sur de Brasil.

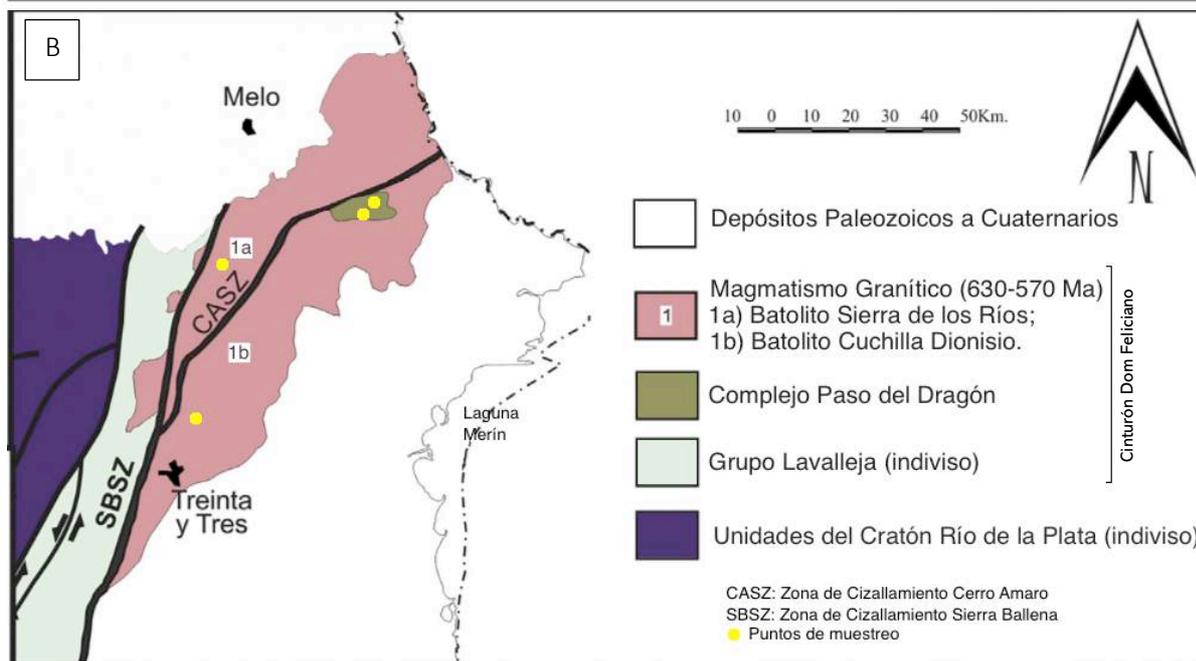
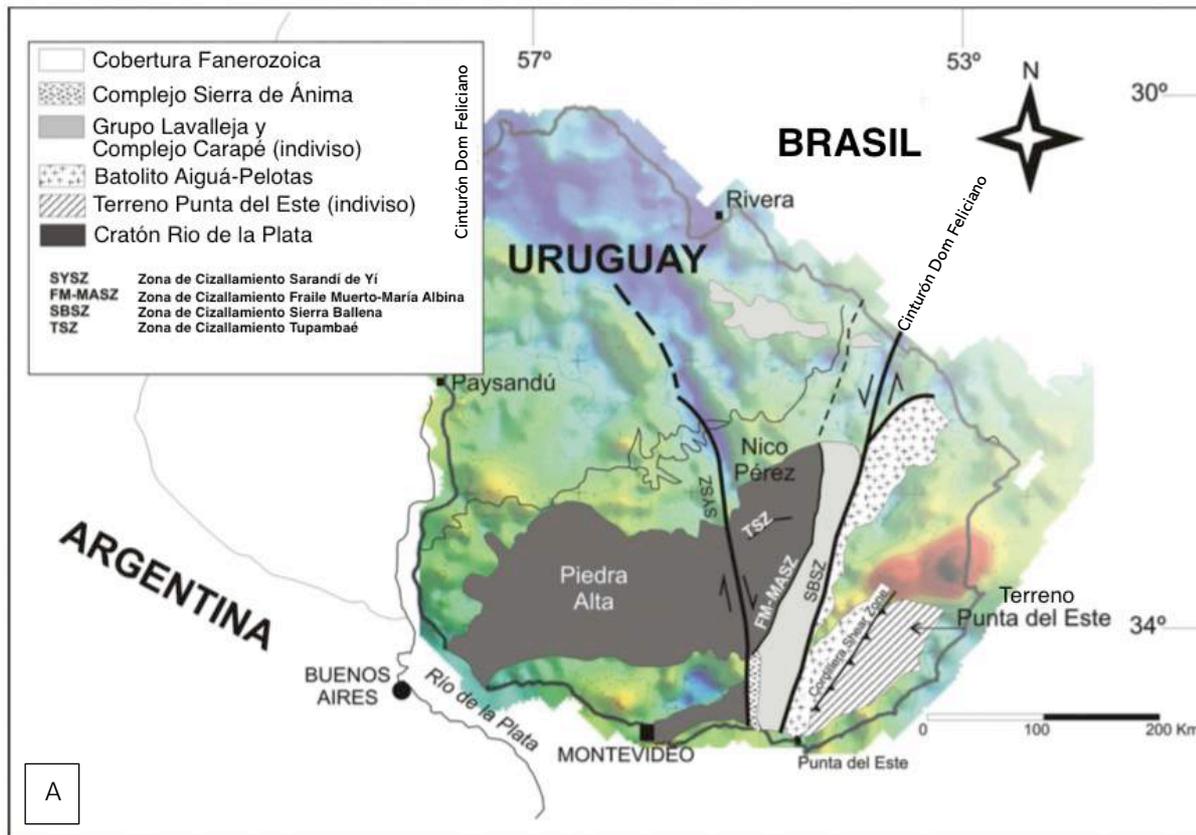


Figura 3.1: A) Contexto geológico regional del área de estudio. (Modificado de Sánchez Bettucci et al., 2012) B) Ubicación del CPD, batolitos Sierra de los Ríos y Cuchilla Dionisio. (Modificado de Peel et al., 2018)

4 RESULTADOS

Para el estudio de minerales densos se seleccionaron dos muestras pertenecientes al Complejo Paso del Dragón y dos muestras del batolito Dionisio-Sierra de los Ríos. Las muestras del CPD corresponden a una turmalinita asociada al litodema Serpentinitas del Cerro la Tuna y a un esquisto del litodema Esquistos de La Micaela. En el caso del batolito, las muestras corresponden a dos cuerpos graníticos deformados. La figura 4.1 exhibe la ubicación de cada muestra.

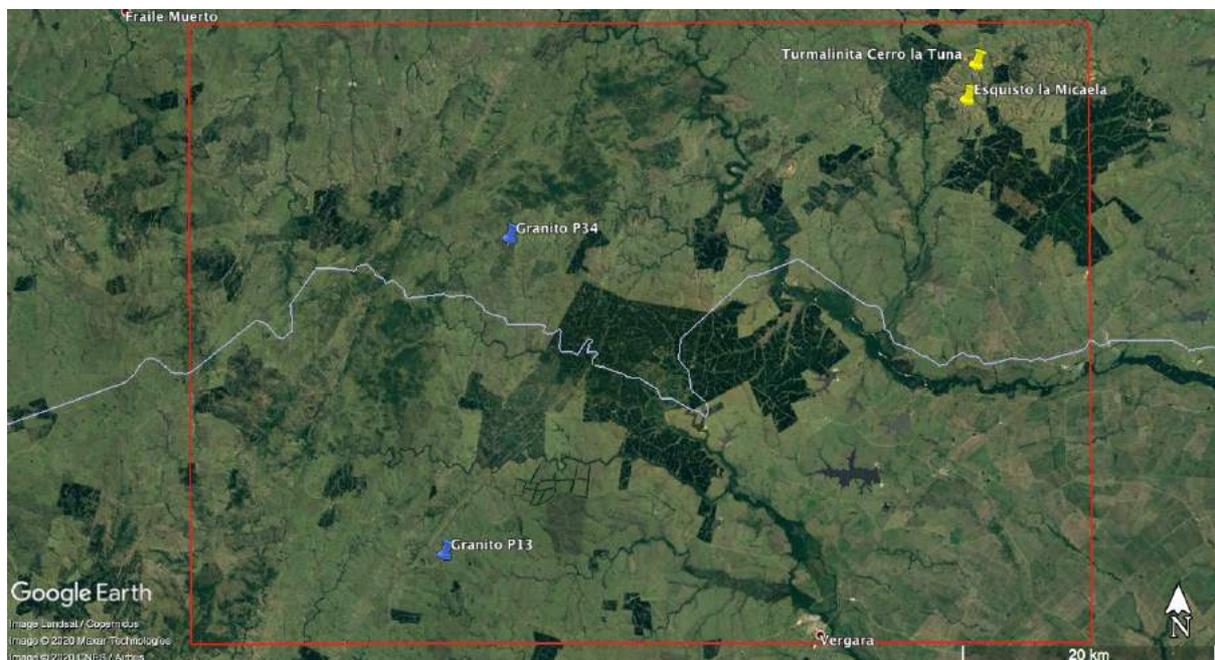


Figura 4.1: Coordenadas de los puntos de muestreo. Turmalinita Cerro la Tuna: 32°33'2.50"S, 53°48'50.77"W. Esquisto la Micaela: 32°34'33.77"S, 53°49'16.99"W. Granito P13: 32°54'21.95"S, 54°15'13.75"W. Granito P34: 32°40'49.58"S, 54°12'11.19"W.

4.1 TURMALINITA CERRO LA TUNA

La turmalinita aflora en el Cerro la Tuna como bolsones rasos, de escasas dimensiones (Fig. 4.2). La muestra de mano analizada es de color verde oscuro a negro, con algunos tonos ocre por oxidación. Está constituida por turmalina inmersa en una matriz de clorita verde claro. Se observó que las turmalinas presentan hábito prismático bien desarrollado en disposición radial, con cristales individuales de hasta 2 cm de largo.

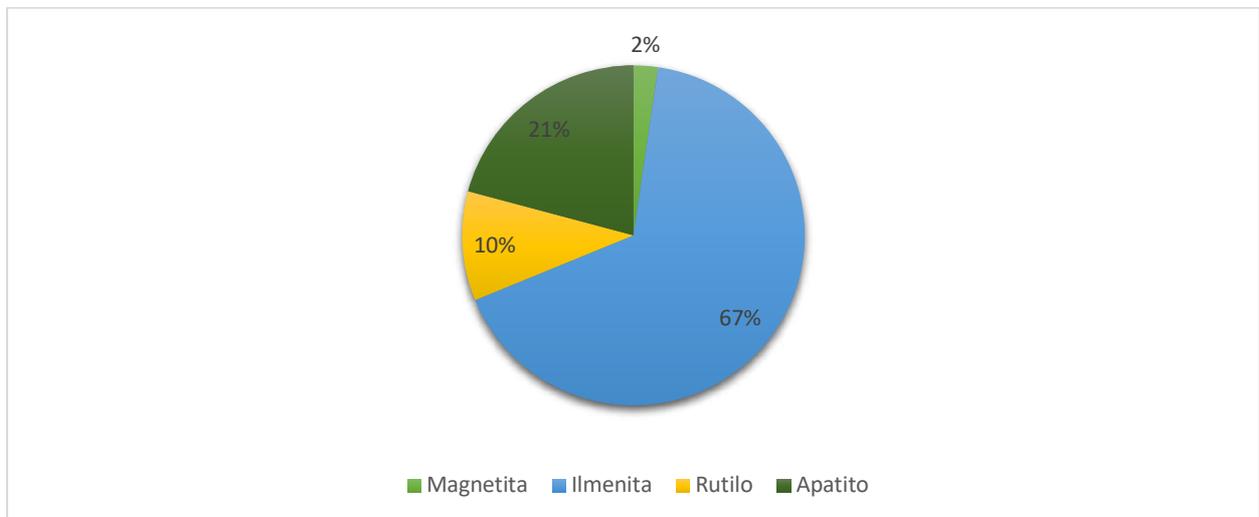


Figura 4.2: Turmalinita Cerro la Tuna en su afloramiento.

4.1.1 MINERALOGÍA

En el análisis de la composición de la roca fueron encontrados clorita y turmalina como minerales esenciales; y magnetita, ilmenita, rutilo y apatito como minerales accesorios. Estos minerales se encuentran distribuidos en las siguientes proporciones: clorita 74,49%, turmalina 25,13%, minerales accesorios 0,30%.

Con relación a los minerales accesorios, estos están distribuidos del siguiente modo: magnetita 2,31%, ilmenita 66,47%, rutilo 10,41%, y apatito 20,81% (gráfica 4.1).



Gráfica 4.1: Distribución de los minerales accesorios en la Turmalinita Cerro la Tuna.

A continuación, se presenta una breve descripción de los minerales observados en lupa y su análisis en MEB:

Magnetita

Se observan fragmentos de un mineral opaco, de hábito prismático, muy frágil, con fractura desigual, negro y de brillo metálico (Fig. 4.3 y 4.4). Algunos están oxidados.

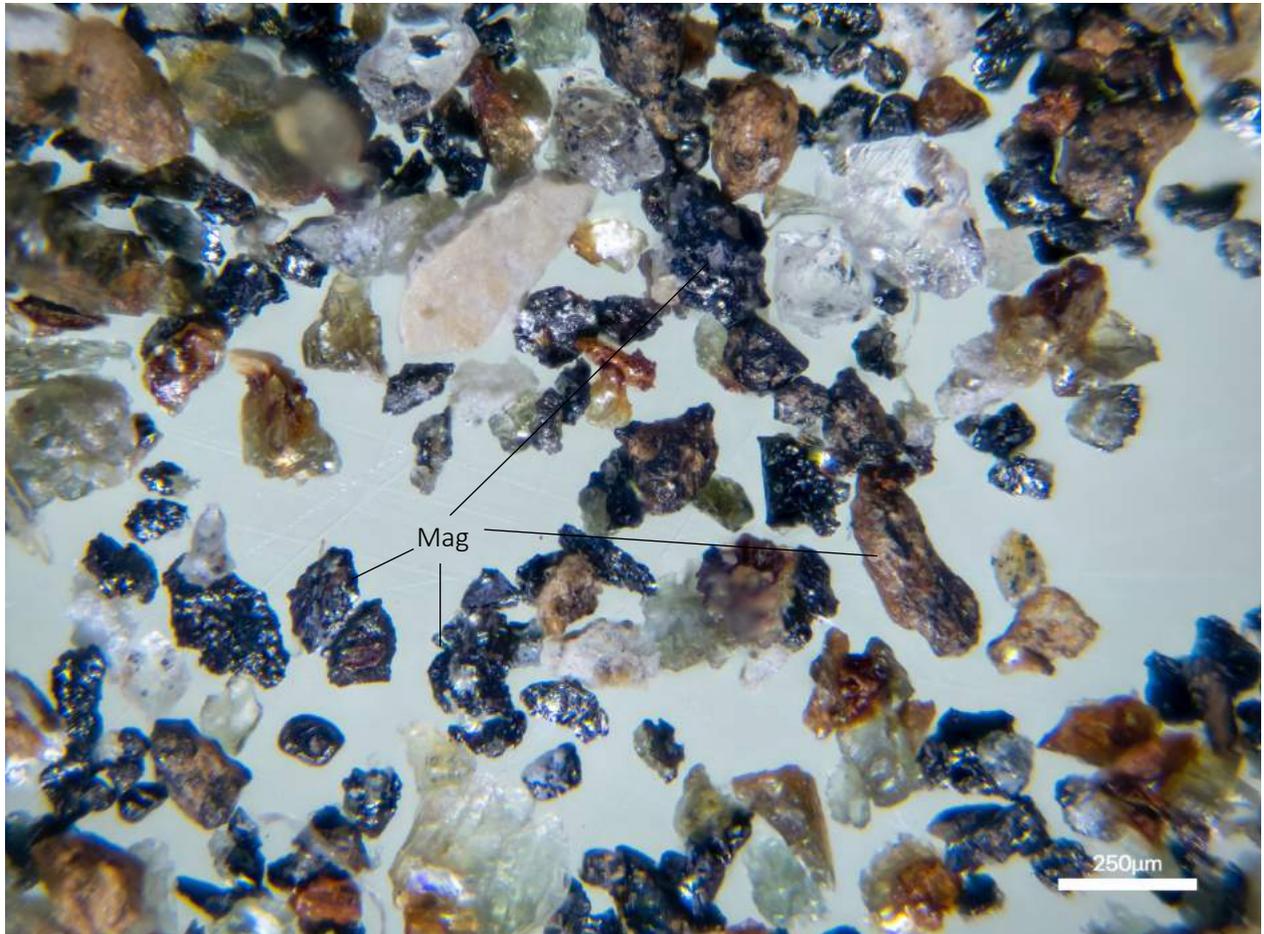


Figura 4.3: Minerales extraídos con imán de mano de la muestra turmalinita Cerro la Tuna. Magnetita (Mag).

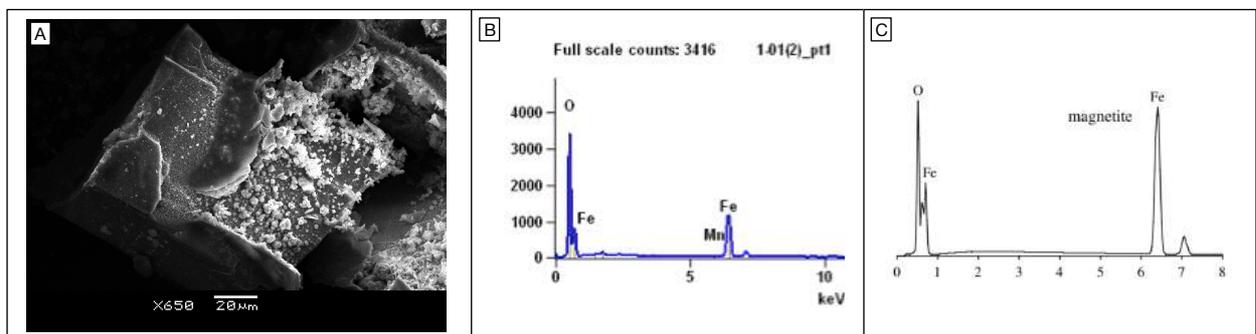


Figura 4.4: A) Imagen de grano de magnetita extraído de la turmalinita Cerro la Tuna en MEB. B) Su respectivo espectro obtenido de análisis puntual sobre el cristal. (C) Espectro patrón EDS de magnetita (Tomado de Reed, 2005).

Ilmenita

Mineral opaco, de hábito masivo, color negro y brillo metálico, con fractura subconcoidea (Fig. 4.5 y 4.6).

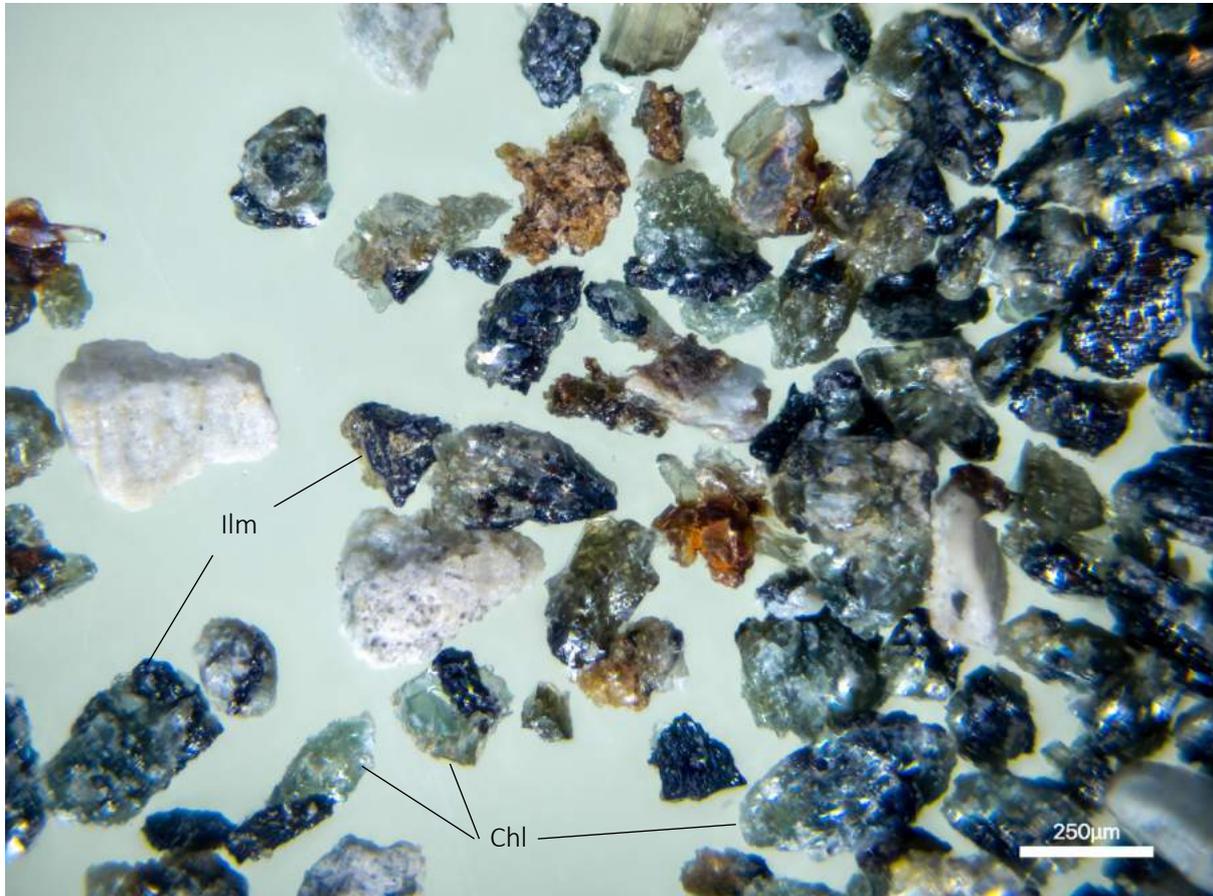


Figura 4.5: Fracción paramagnética 0,3A. Ilmenita (Ilm) adheridos a fragmentos de clorita (Chl).

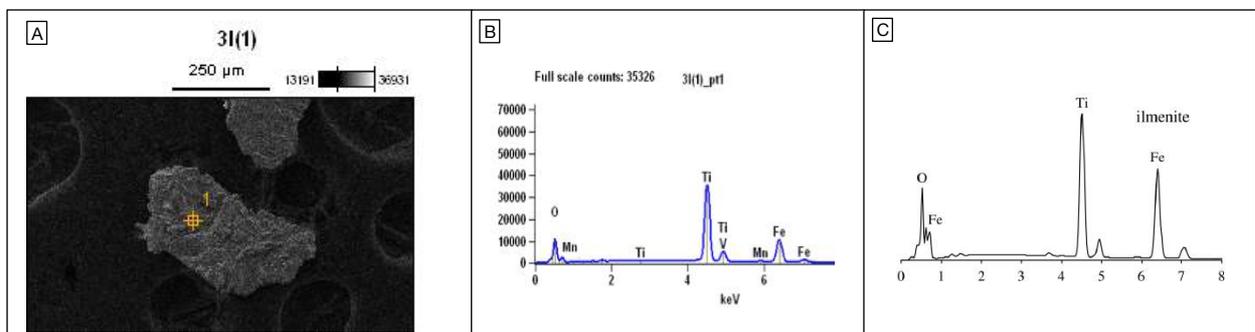


Figura 4.6: A) Imagen de fragmento de ilmenita extraído de la turmalinita Cerro la Tuna en MEB. B) Su respectivo espectro obtenidos de análisis puntual sobre el cristal. (C) Espectro patrón EDS de ilmenita (Tomado de Reed, 2005).

Rutilo

Mineral fragmentado, de color ámbar, brillo vítreo, fractura subconcoidea, presenta estrías. (Fig 4.7 y 4.8).



Figura 4.7: Foto de la fracción diamagnética. Rutilo (Rt), apatito (Ap), turmalina (Tur) y cuarzo (Qz).

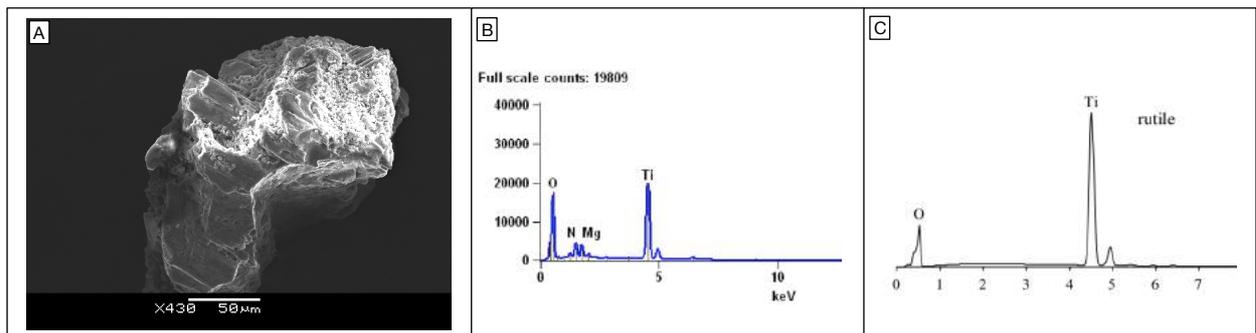


Figura 4.8: A) Imagen de fragmento de rutilo extraído de la turmalinita Cerro la Tuna en MEB. B) Su respectivo espectro obtenidos de análisis puntual sobre el cristal. (C) Espectro patrón EDS de rutilo (Tomado de Reed, 2005).

Apatito

Mineral de hábito prismático y se presentan fragmentados en su mayoría, son de color blanquecino a incoloros, de brillo sedoso, y presentan fluorescencia. (Fig. 4.7 y 4.9).

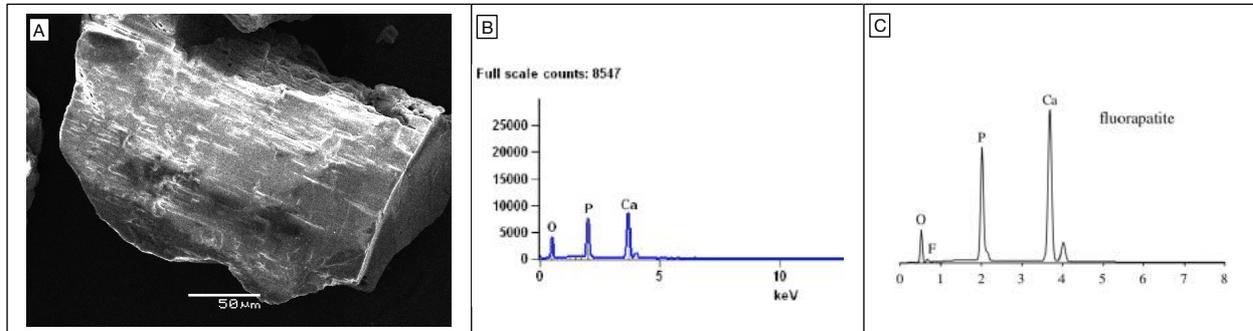


Figura 4.9: A) Imagen de fragmento de apatito extraído de la turmalinita Cerro la Tuna en MEB. B) Su respectivo espectro obtenido de análisis puntual sobre el cristal. (C) Espectro patrón EDS de fluoroapatito (Tomado de Reed, 2005).

4.1.2 CUANTIFICACIÓN COMPOSICIONAL

Esta muestra no presenta las propiedades necesarias para la concentración de minerales según sus densidades, pues no hay suficiente contraste entre los minerales componentes de la roca y no cumplen con la premisa propuesta en el capítulo 2 (2.1.4).

A pesar de haber sido procesada en la mesa Wilfley y no lograr una concentración exitosa de los densos, en este estudio se optó por analizar la totalidad de los minerales presentes en la muestra, ya que en mayoría de pueden ser considerados de alta densidad.

Fueron procesados un total de 233,0 g de muestra con tamaño de grano retenidos en los tamices de malla 63 y 125 μm.

Estos granos fueron procesados directamente en el Separador Isodinámico Frantz y clasificados en cinco fracciones (Fig. 4.10), detalladas a seguir:



Figura 4.10: Minerales constituyentes de la turmalinita Cerro la Tuna. Las fracciones en la parte superior de la foto están formadas por los minerales accesorios, mientras la parte inferior se observan los minerales esenciales. Estos minerales se encuentran agrupados según sus susceptibilidades magnéticas.

En la fracción denominada magnética, separada con el uso de un imán de mano, también se encuentran unidos otros minerales, mayormente fragmentos de clorita y cristales de cuarzo con inclusiones. Esta “contaminación” es estimada en 50% por comparación visual (Fig 4.11a) fue deducida del valor total de la fracción ferromagnética.

La fracción de 0,3 A concentra los fragmentos de ilmenita y su proporción es de 70%. (Fig. 4.11b)

La fracción 0,75 A está compuesta por clorita y fue cuantificada directamente por su peso (Fig. 4.11c).

La fracción 1,70 A está compuesta por cristales de turmalina y también fue cuantificada por su peso (Fig. 4.11d y e).

En la fracción diamagnética fueron identificados rutilo, apatito como minerales densos, y sus proporciones fueron estimadas en 30 y 60%, respectivamente. Además, fueron identificados fragmentos de cuarzo y calcita y cantidades muy bajas (Fig. 4.11f).

La cuantificación de los minerales fue realizada mediante comparación visual, y está basada en las masas de las fracciones:

- magnéticos: 0,0376 g
- 0,3 A : 0,7739 g
- 0,75 A : 161,13 g
- 1,70 A. : 54,08 g
- diamagnéticos: 0,2828 g

Se presentan fotos de las fracciones (Fig. 4.11):



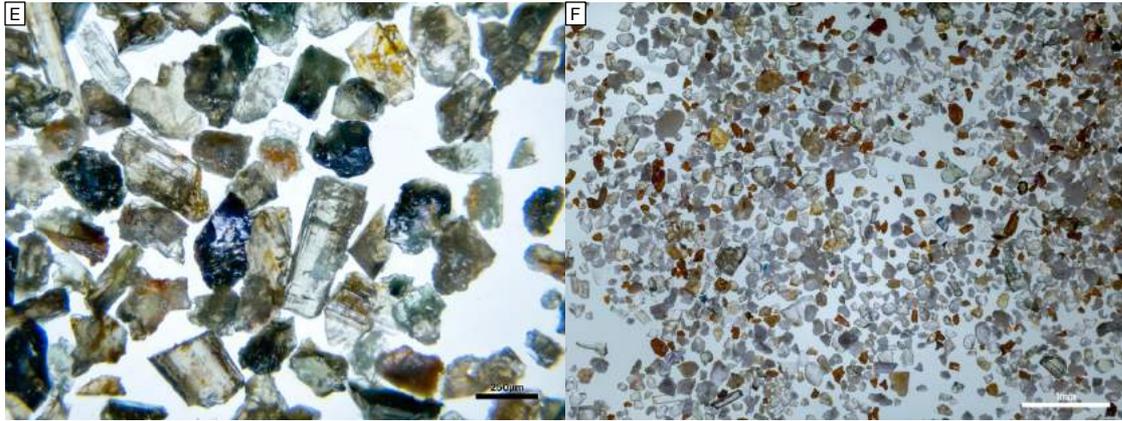


Figura 4.11: A) Fracción magnética. B) Fracción 0,3 A. C) Fracción 0,75 A. D) 1,70 A. E) Fracción 1,70 A en detalle. F) Diamagnéticos.

4.2 ESQUISTO LA MICAELA

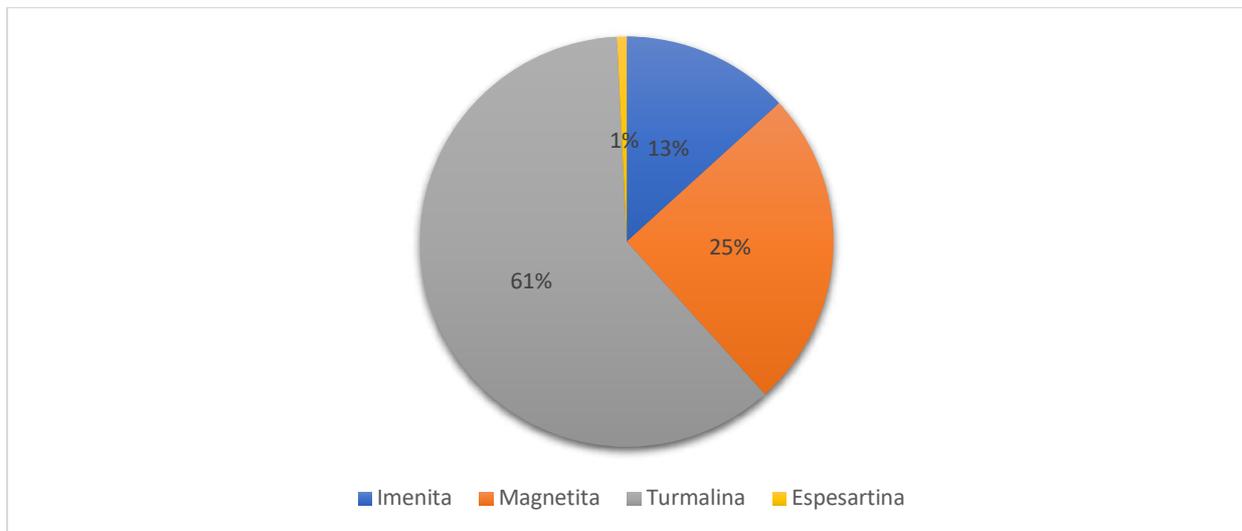
Se trata del litotipo predominante en el Complejo Paso del Dragón (Fig. 4.12). Generalmente, esta litología se encuentra con un grado de alteración importante, con colores rojizos a pardos. La muestra estudiada posee tamaño de grano fino a medio, se observa bandeado marcado por la alternancia de finas capas de composición micácea con bandas cuarzo-feldespáticas. Además, se observan *boudines* de cuarzo de tamaños milimétricos a centimétricos.



Figura 4.12: Esquisto la Micaela en su afloramiento.

4.2.1 MINERALOGÍA

Los minerales accesorios densos encontrados en esta roca fueron ilmenita, magnetita, turmalina y granate, los cuales se distribuyen en las siguientes proporciones respectivas: 13,20%, 25,16%, 60,88%, y 0,76% (gráfica 4.2). Se estima que la masa total de los minerales accesorios densos corresponde al 0,029% de la muestra utilizada.



Gráfica 4.2: proporción de los minerales accesorios en la muestra.

A continuación, se presenta una breve descripción de los minerales observados en lupa, además de los resultados obtenidos en el Microscopio Electrónico de Barrido.

Ilmenita

Mineral opaco, de color negro y brillo metálico, sin clivaje y fractura concoidea. Presenta redondez en alguno de sus granos. (Fig. 4.13 y 4.14).

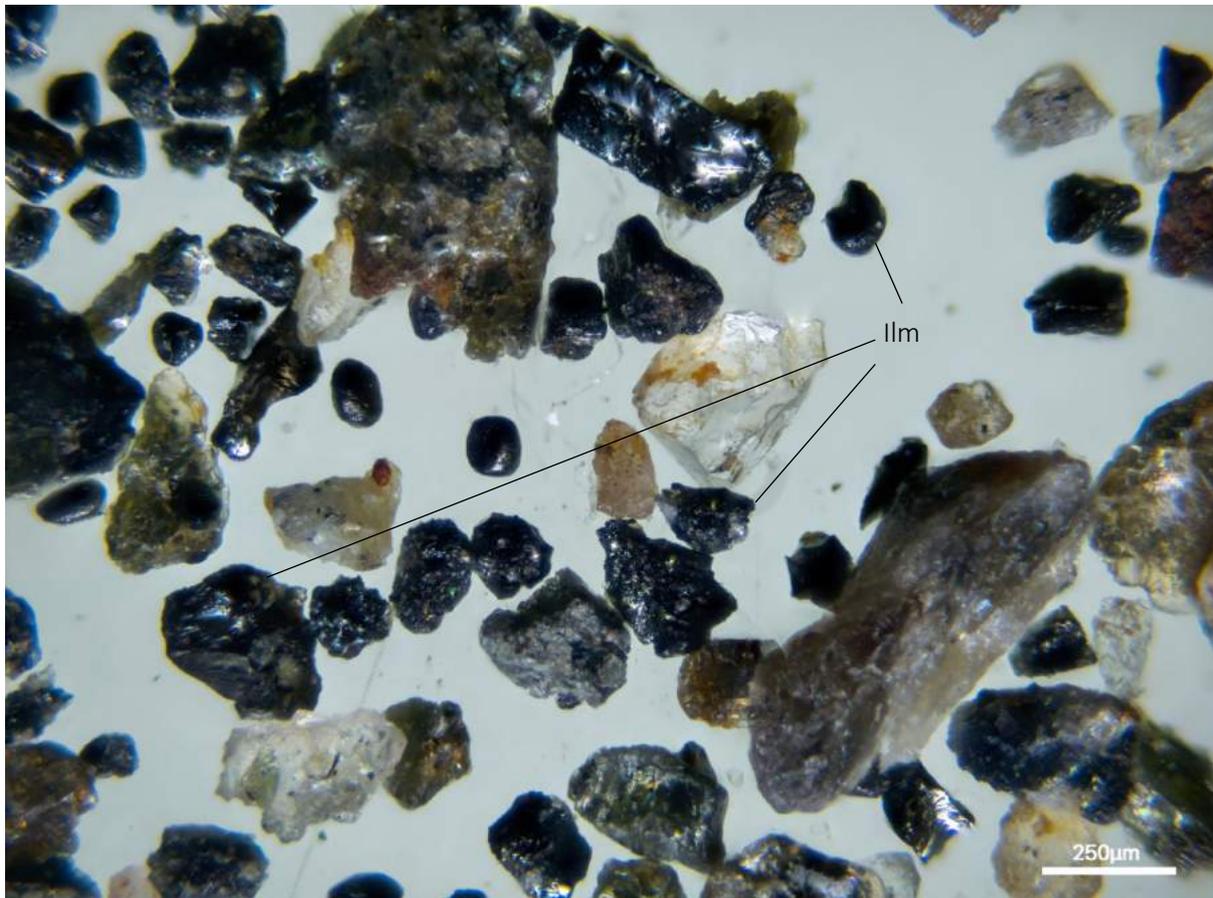


Figura 4.13: Cristales de ilmenita (Ilm). Algunos de estos cristales presentan redondez.

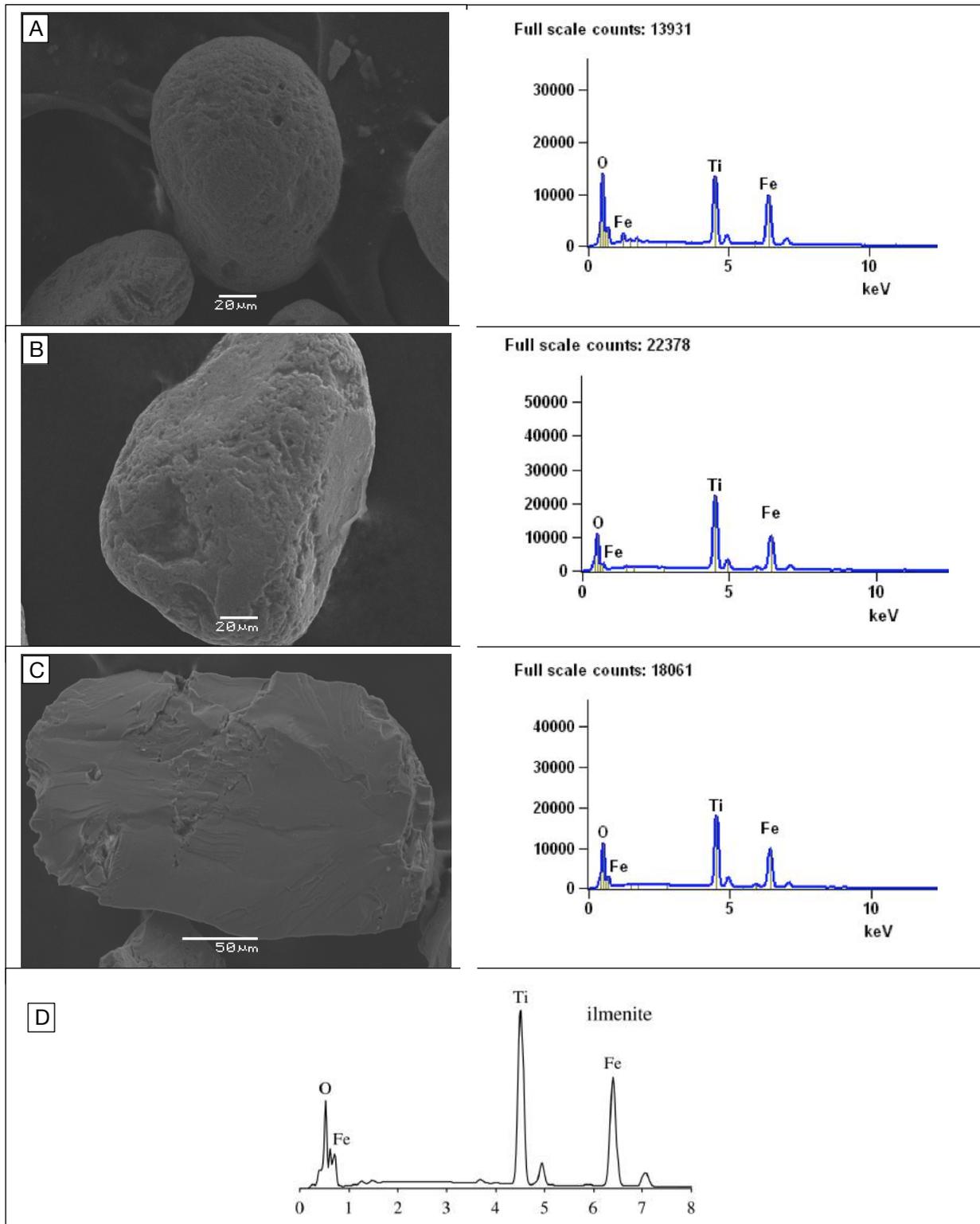


Figura 4.14: A, B y C) Imágenes de granos de ilmenita extraído del Esquisto La Micaela en MEB y sus respectivos espectros obtenidos de análisis puntual sobre los cristales (D) Espectro patrón EDS de ilmenita (Tomado de Reed, 2005).

Magnetita

Minerales opacos, macizos, de color gris oscuro y brillo metálico, oxidado en su mayoría, frágil y sin clivaje (Fig. 4.15 y 4.16).

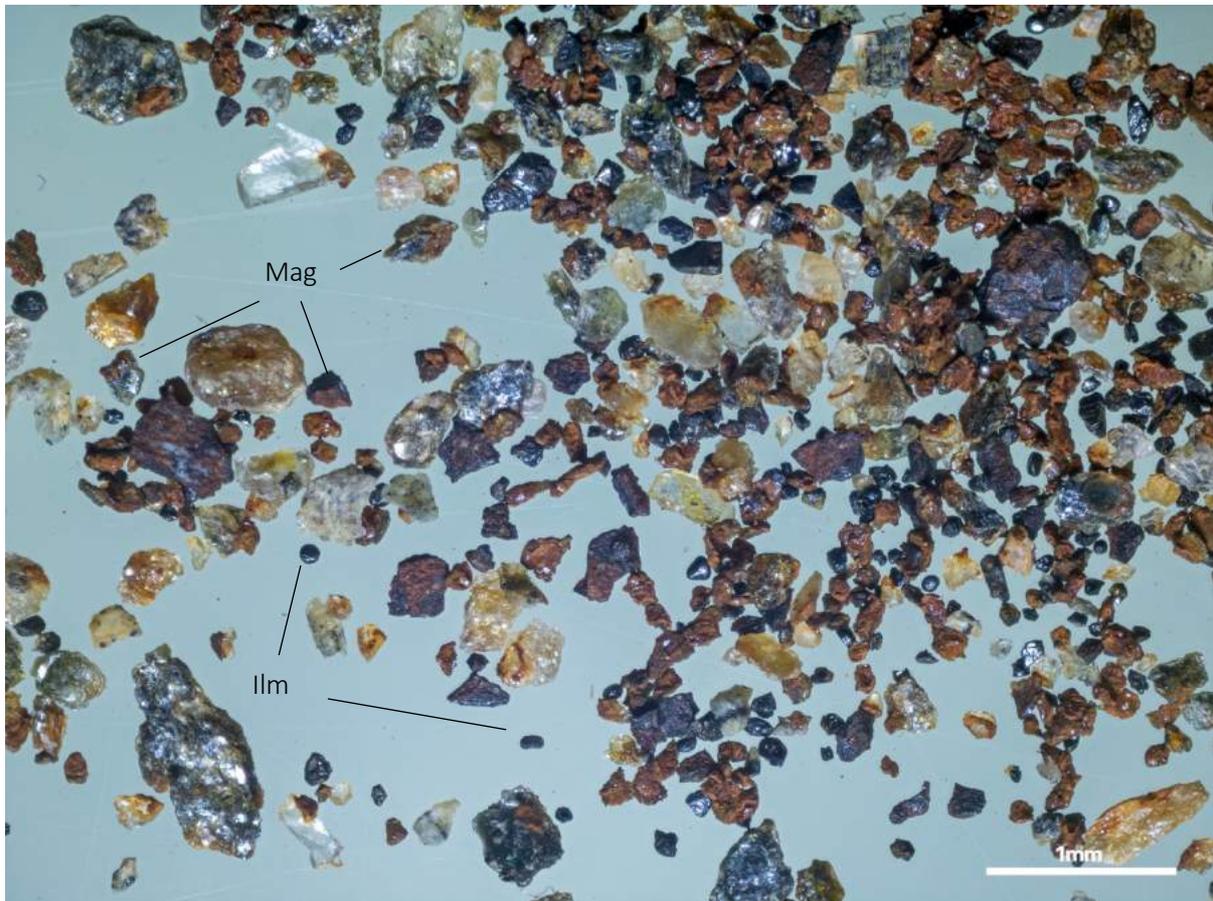


Figura 4.15: Cristales de magnetita (Mag) y ilmenita (Ilm) pertenecientes al Esquisto La Micaela.

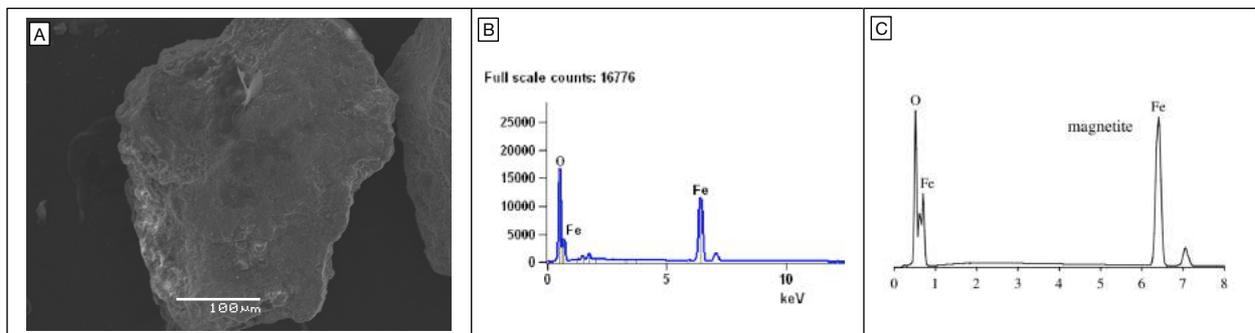


Figura 4.16: A) Imagen de grano de magnetita extraído del esquisto la Micaela en MEB. B) Su respectivo espectro obtenidos de análisis puntual sobre el cristal. C) Espectro patrón EDS de magnetita (Tomado de Reed, 2005).

Turmalina

Mineral de hábito prismático, con brillo vítreo y de color marrón, fractura concoidea y sin clivaje (Fig. 4.17 y 4.18).

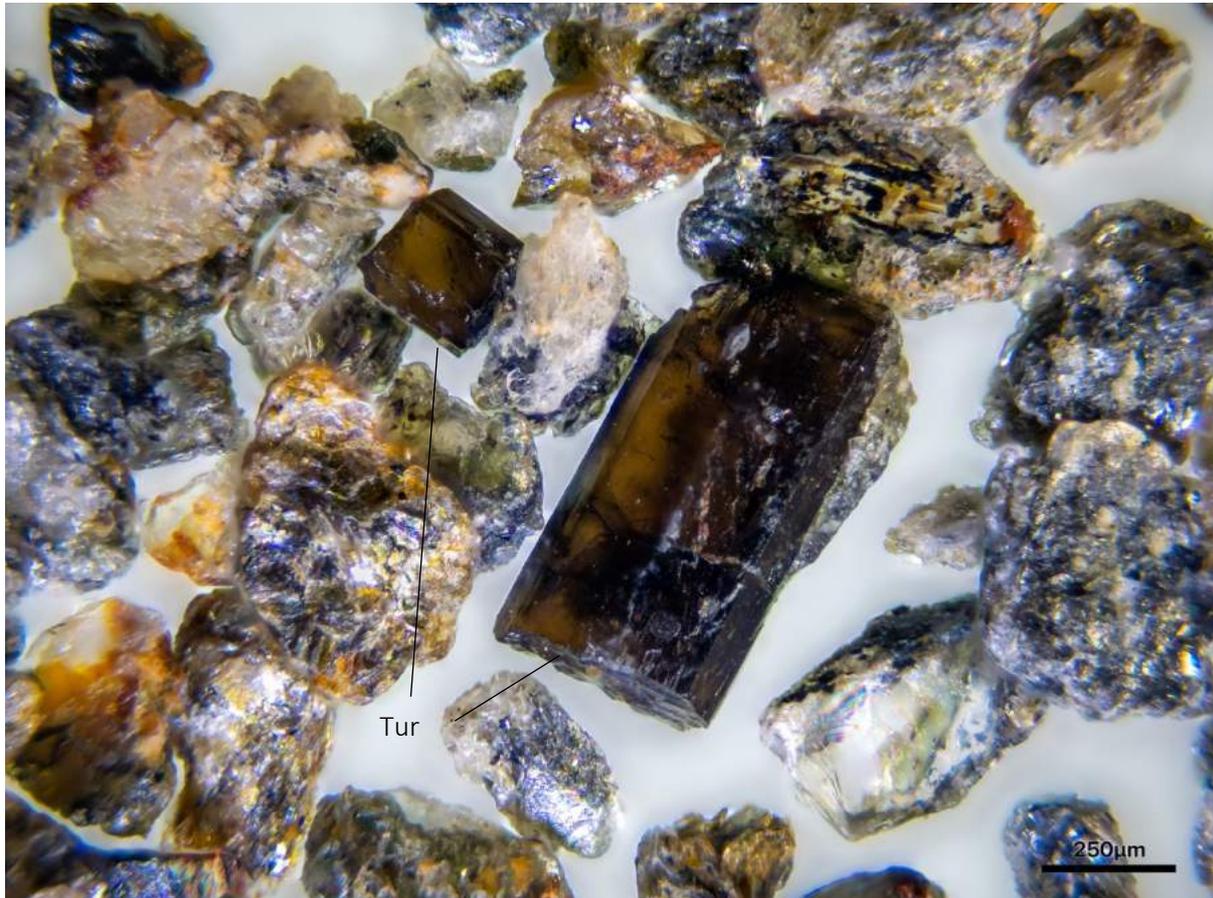


Figura 4.17: Cristales de turmalina (Tur) extraído del Esquisto la Micaela.

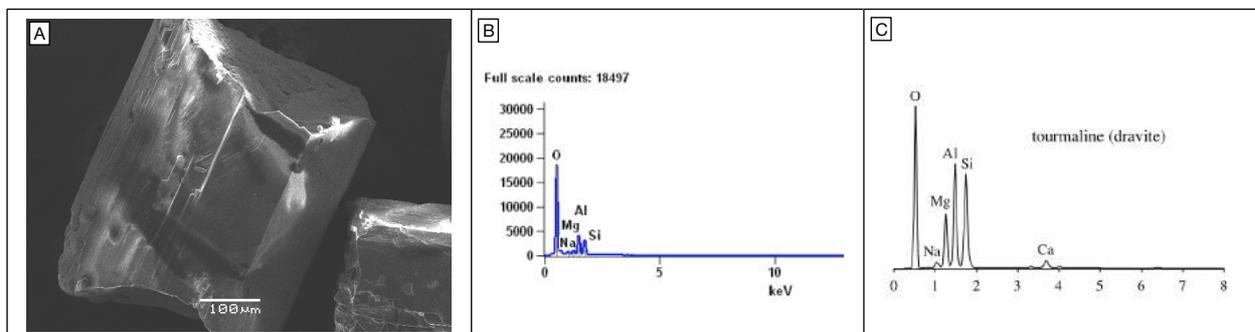


Figura 4.18: A) Imagen de grano de turmalina extraído del esquisto la Micaela en MEB. B) Su respectivo espectro obtenidos de análisis puntual sobre el cristal. C) Espectro patrón EDS de turmalina (Tomado de Reed, 2005).

Granate

Mineral translúcido, redondeado en su mayoría, de color rosado y brillo vítreo, con fractura concoidea y sin clivaje (Fig. 4.19 y 4.20). La composición de estos minerales se ubica entre espesartina y almandino.

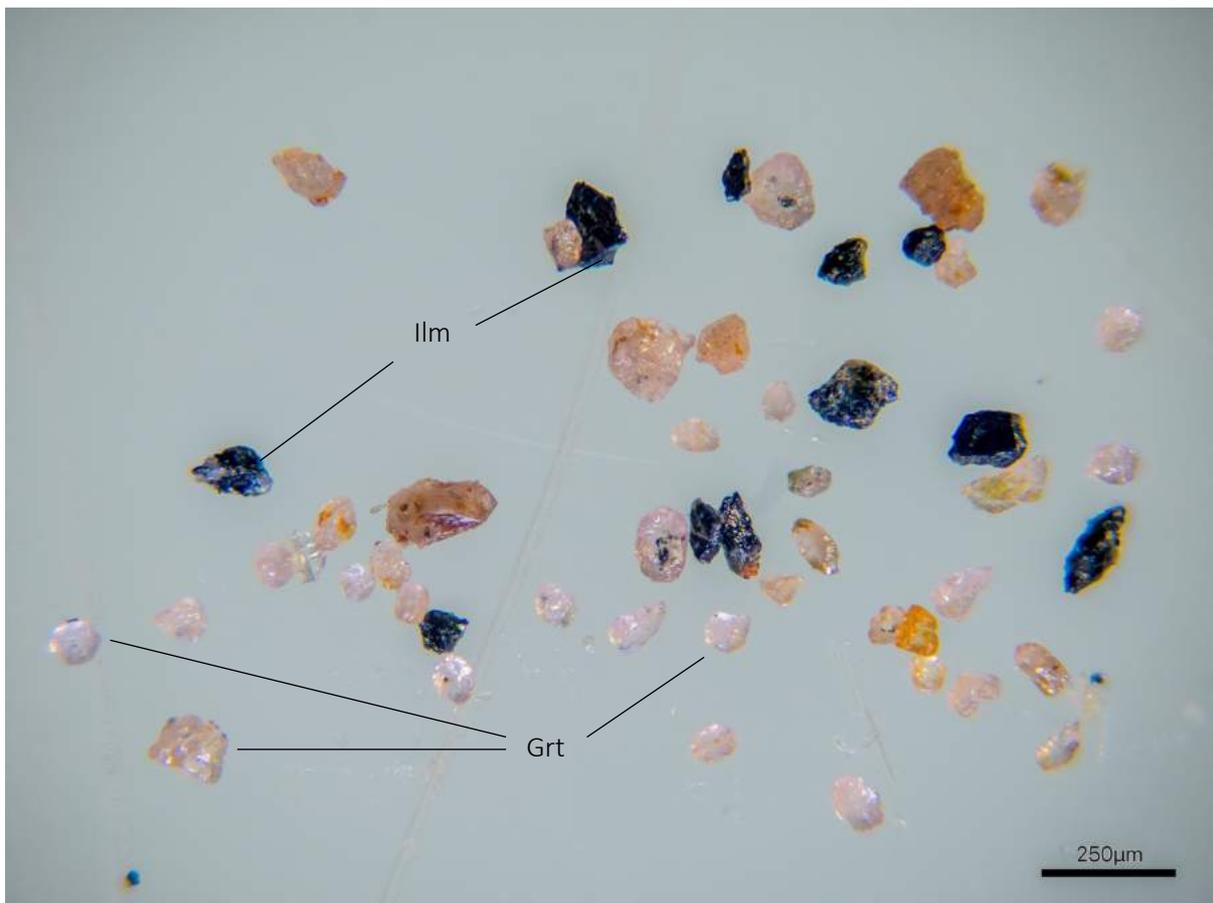


Figura 4.19: Cristales de granate (Grt) e ilmenita (Ilm) extraídos del esquistó la Micaela.

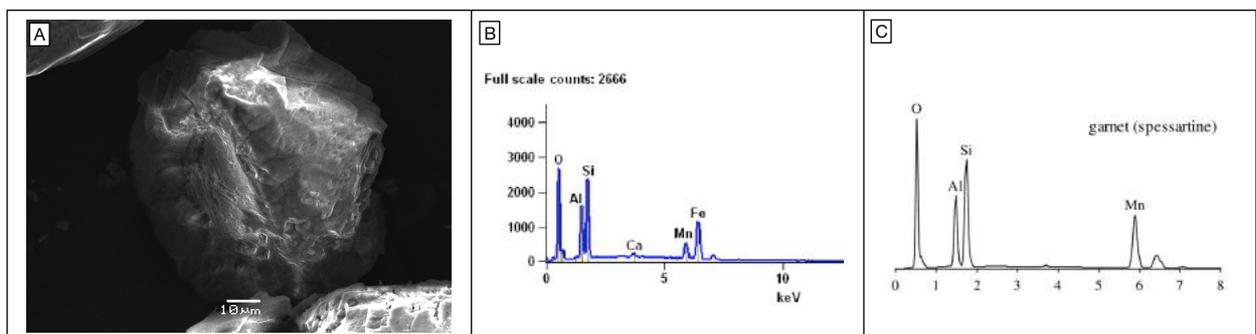


Figura 4.20: A) Imagen de grano de granate extraído del esquistó la Micaela en MEB. B) Su respectivo espectro obtenidos de análisis puntual sobre el cristal. (C) Espectro patrón EDS de espesartina (Tomado de Reed, 2005).

4.2.2 CUANTIFICACIÓN COMPOSICIONAL

En esta muestra fueron procesados 487,0 g con tamaño de grano retenidos en los tamices de malla 63, 125 y 250 μm .

Estos granos fueron procesados en la Mesa Wilfley, y separados en tres fracciones según la densidad de sus componentes. Los valores obtenidos en esa separación fueron:

- 1) Densos : 20,60 g;
- 2) Intermedios : 52,08 g;
- 3) Relaves : 388,75 g.
-

Posteriormente, los minerales de la fracción denominada densa fueron procesados en el Separador Magnético Isodinámico Frantz, donde se obtuvieron las siguientes subdivisiones:

- Magnéticos. : 0,0446
- 0,3 A. : 0,0257 g
- 0,6 A. : 1,37 g
- 0,6* A. : 0,0018 g (granate y ilmenita)
- 0,9 A. : 1,7265 g
- 1,2 A. : 6,71g
- 1,6 A. : 7,28 g
- Diamagnéticos: 2,84 g

Los fragmentos de magnetita pertenecen a la fracción denominada magnéticos y fueron extraídos con un imán de mano. Estimase, por medio de comparadores visuales, que 80% de los minerales en esta fracción son magnetita.

Los granos de ilmenita se extrajeron de la fracción de 0,3 A y su proporción en esta fracción es de 70%.

Los cristales de granate fueron extraídos en una fracción intermedia entre 0,1 y 0,6 A. Se logró separar estos minerales en una fracción exclusiva, juntamente con algunos granos de ilmenita, y estimadas sus proporciones en 60% espesartina y 40% ilmenita, respectivamente (Fig. 4.19).

Los cristales de turmalina se encuentran en la fracción de 0,90 A, y su masa fue estimada en 5% la fracción en la cual se encuentran.

Se presentan fotos de las fracciones (Fig. 4.21):

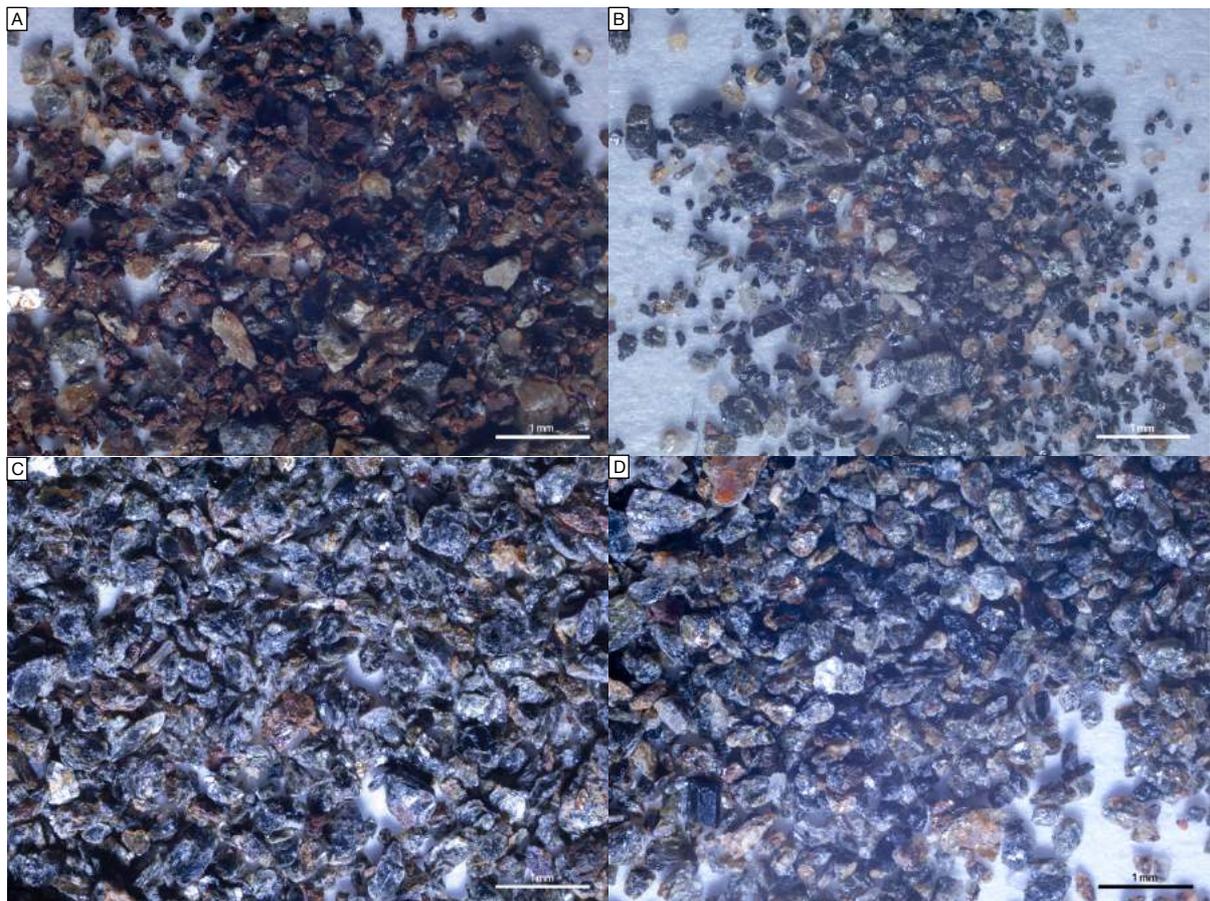


Figura 4.21: A) Fracción magnética. B) Fracción 0,3 A. C) Fracción 0,6 A. D) Fracción 1,70 A. E) Fracción 0,9 A.

4.3 GRANITO P13

Se trata de una muestra correspondiente a un granito milonítico (Fig. 4.22), con bandas de tonalidades rosadas cuarzo-feldespáticas y negras de biotita y epidoto, tomado en un gran afloramiento sobre ruta 8 y perteneciente al batolito Dionisio. El cuerpo está recortado por venas de cuarzo post-cinemáticas de hasta 2 cm de espesor, no concordantes con la foliación milonítica.

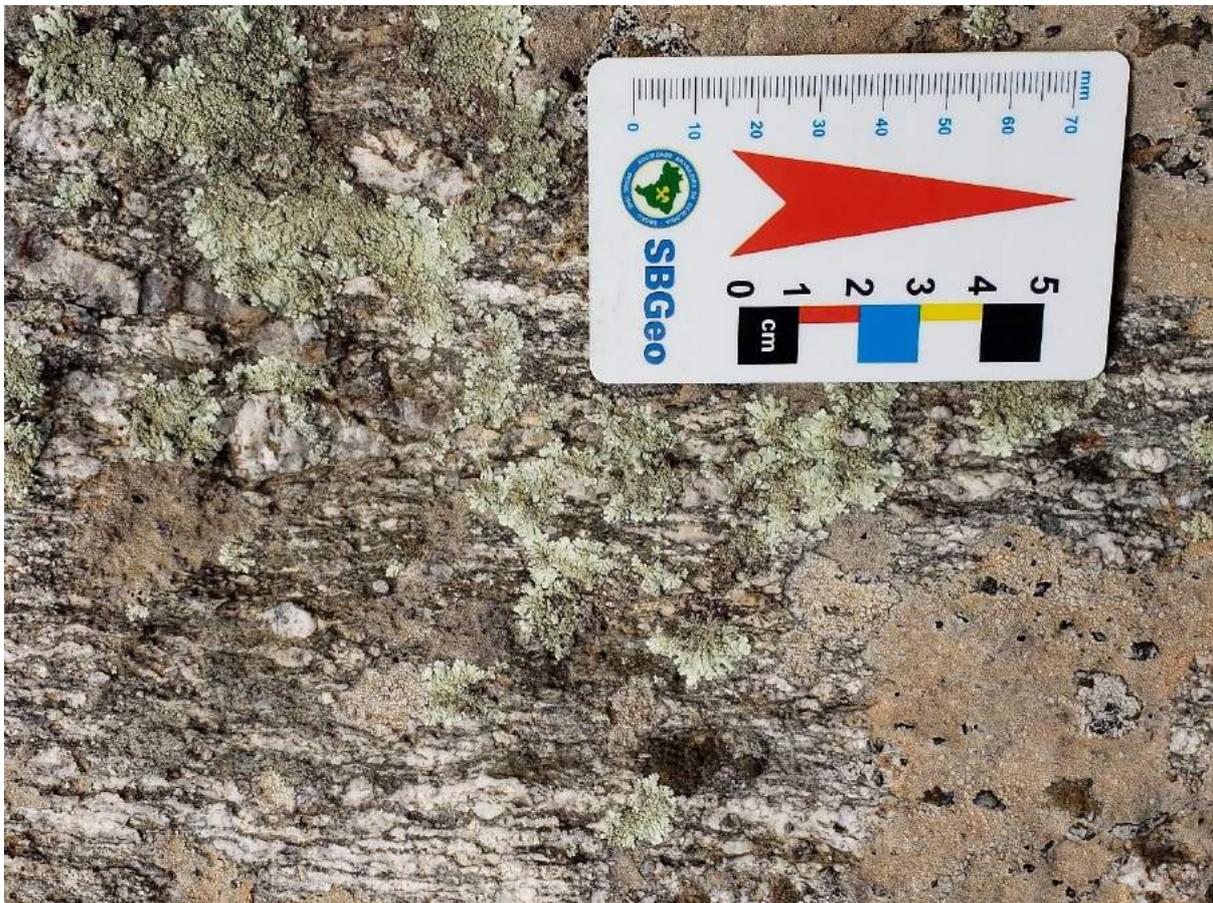
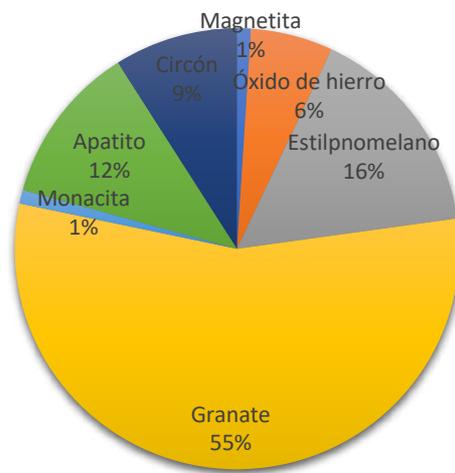


Figura 4.22: Granito P13 en su afloramiento.

4.3.1 MINERALOGÍA

En el análisis de los minerales accesorios densos que componen esta roca fueron encontrados magnetita, un óxido de hierro (magnetita/hematita), estilpnomelano, granates, monacita, apatito y circón. Se estima que estos minerales están distribuidos en las siguientes proporciones: 1, 6, 15.8, 55.5, 1, 11.7, 9% (gráfica 4.3). Y se estima que la masa total de los minerales accesorios densos corresponde al 0.466% de la muestra utilizada.



Gráfica 4.3: Distribución de los minerales accesorios en la muestra.

A continuación, se presenta una breve descripción de los minerales observados en lupa, además de los resultados obtenidos en el Microscopio Electrónico de Barrido.

Magnetita

Mineral opaco, donde no se identifica su hábito, frágil y sin clivaje, de color gris oscuro y brillo metálico, oxidados en su mayoría (Fig. 4.23 y 4.24).



Figura 4.23: Minerales separados con imán de mano del granito P13. La fracción está compuesta mayormente por fragmentos de magnetita (Mag). Se observan otros minerales como el cuarzo (Qz) y granate (Grt).

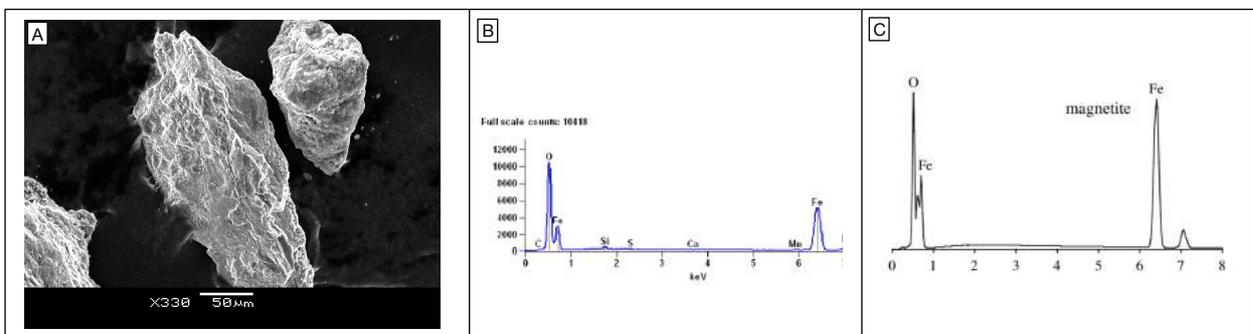


Figura 4.24: A) Imagen de grano de magnetita extraído del granito P13 en MEB. B) Su respectivo espectro obtenido del análisis puntual sobre el cristal. C) Espectro patrón EDS de magnetita (Tomado de Reed, 2005).

Óxido de hierro

Mineral opaco, de color negro y brillo metálico, fractura desigual, raya rojiza, y no es posible identificar su hábito (Fig. 4.25 y 4.26). Se encuentran de forma representativa en la muestra y presentan características distintivas de la magnetita presentada anteriormente.

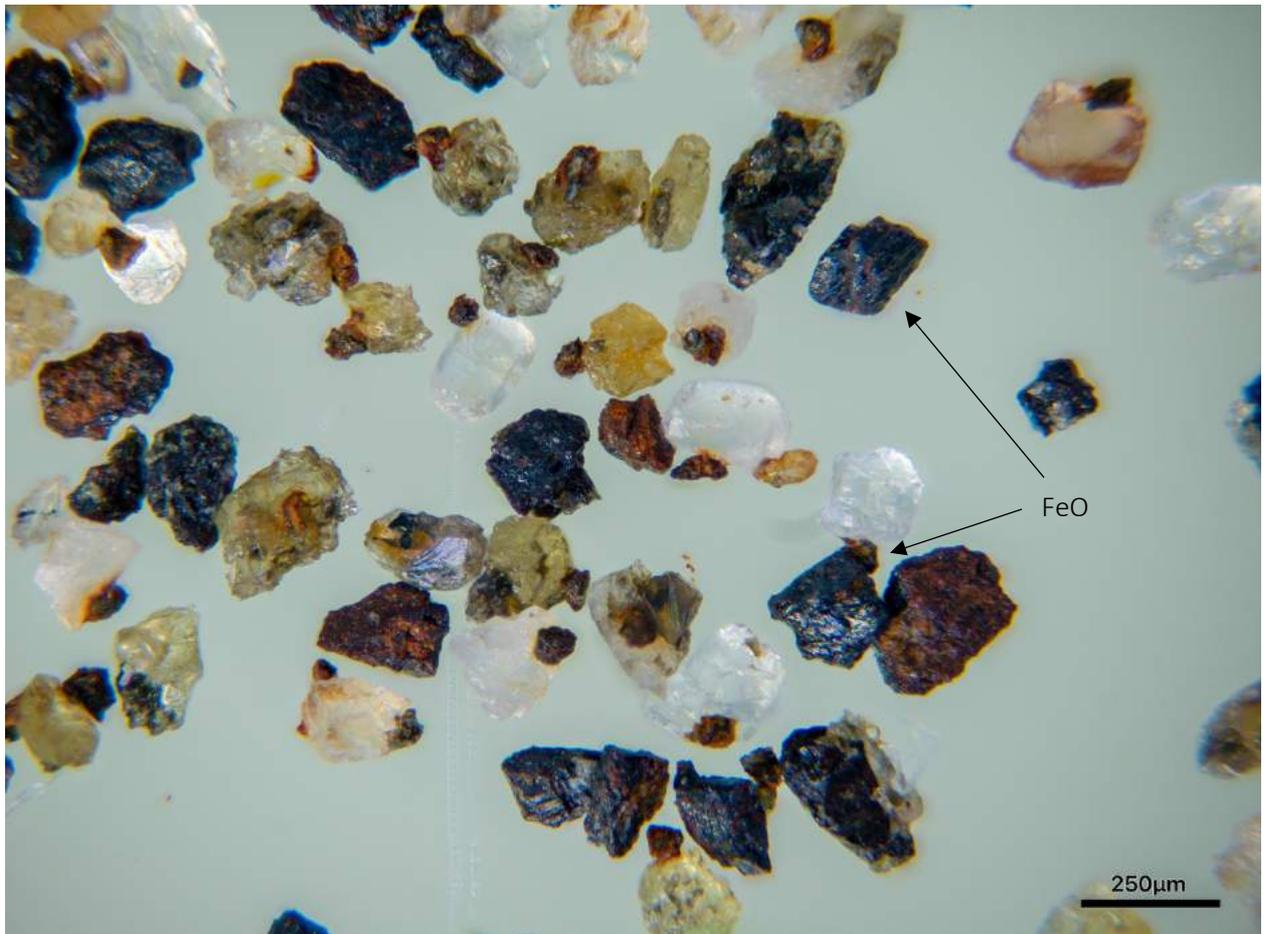


Figura 4.25: Minerales que componen la fracción paramagnética de 0.1 A. Fragmentos del óxido de hierro (FeO).

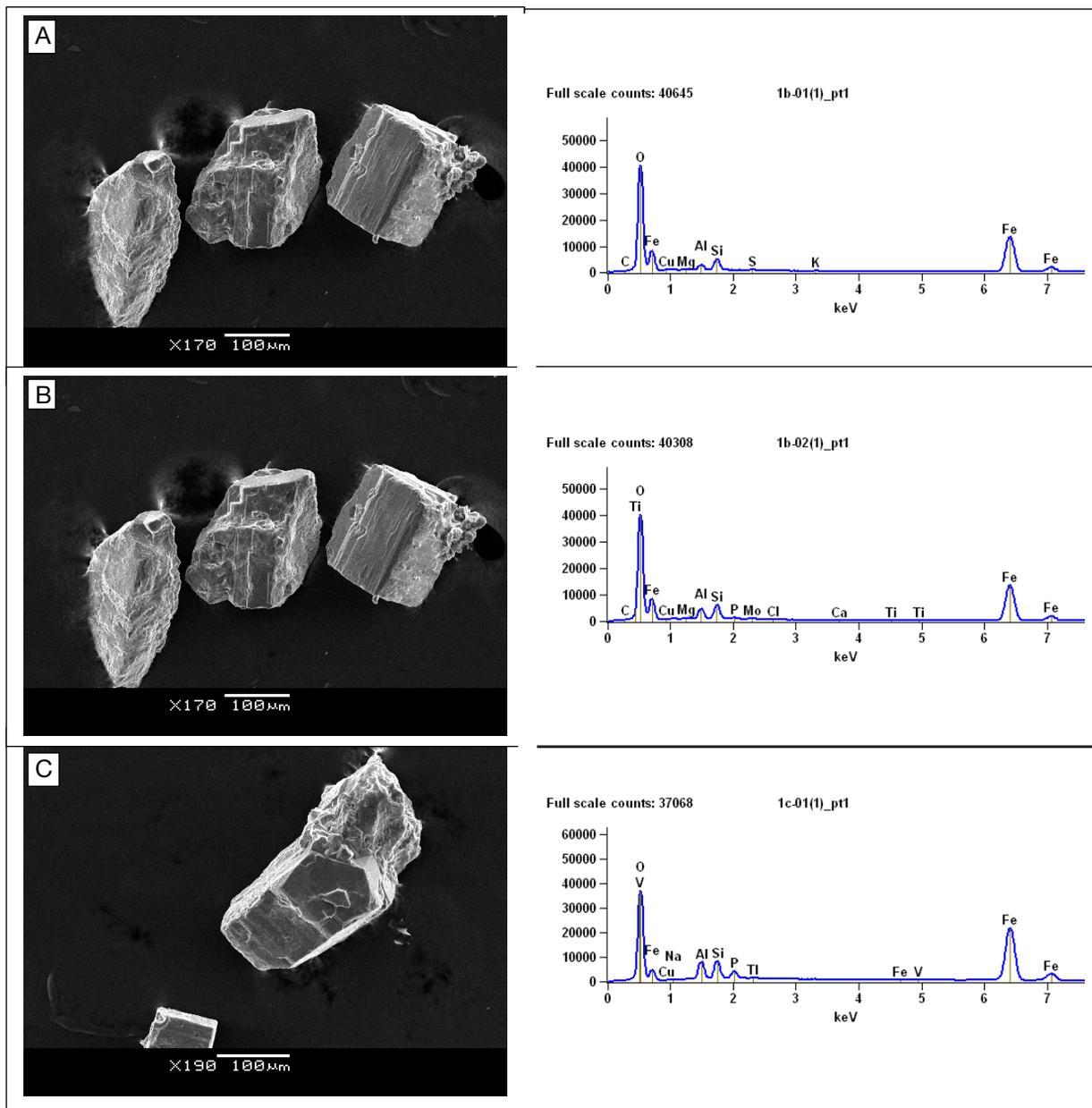


Figura 4.26: A, B y C) Imágenes de grano del óxido de hierro extraído del granito P13 en MEB y sus respectivos espectros obtenidos del análisis puntual sobre los cristales.

Estilpnomelano

Mineral filossilicático, de color negro con brillo vítreo, con clivaje y fractura concoidea a casi perfecta, raya negra (Fig. 4.27 y 4.28).

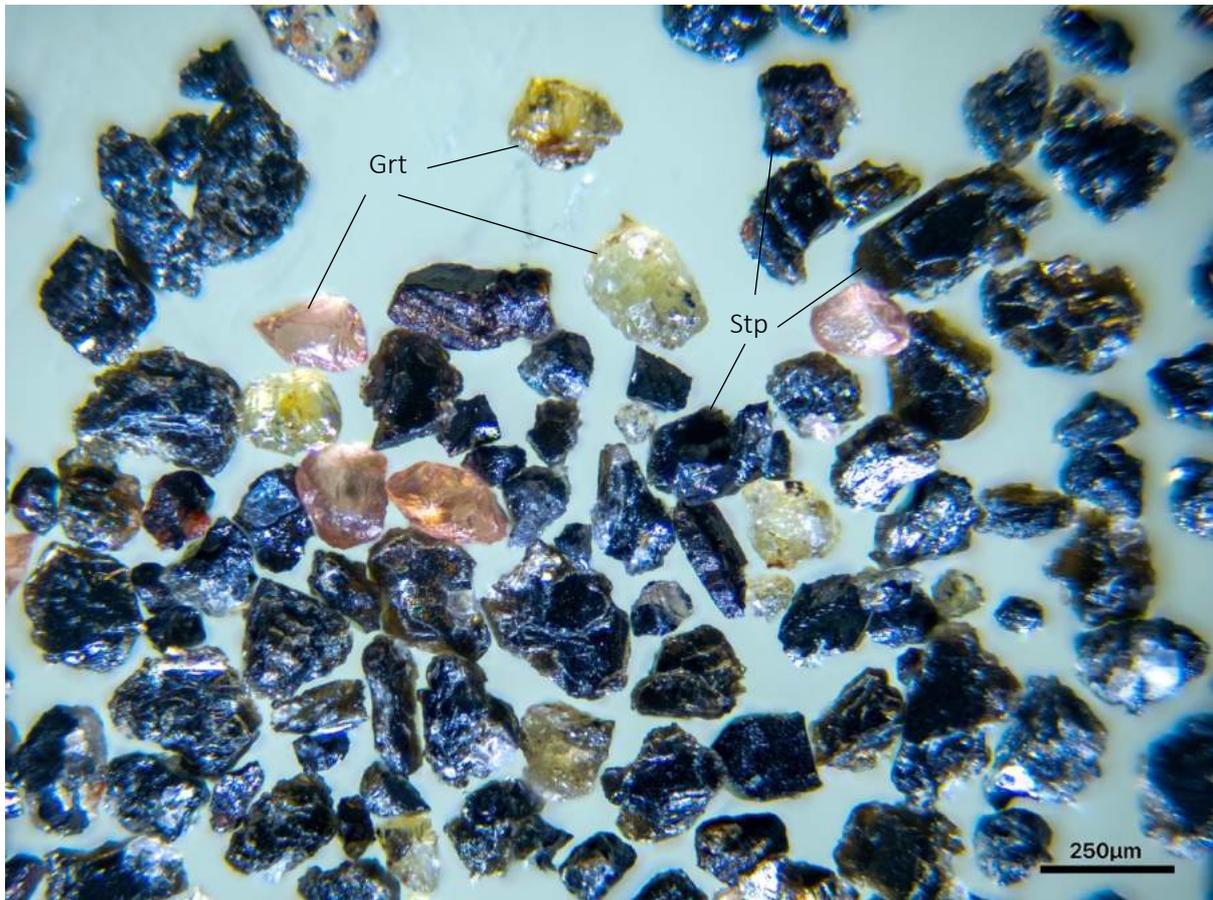


Figura 4.27: Minerales correspondientes a la fracción de 0,4A. Estilpnomelano (Stp) y granate (Grt).

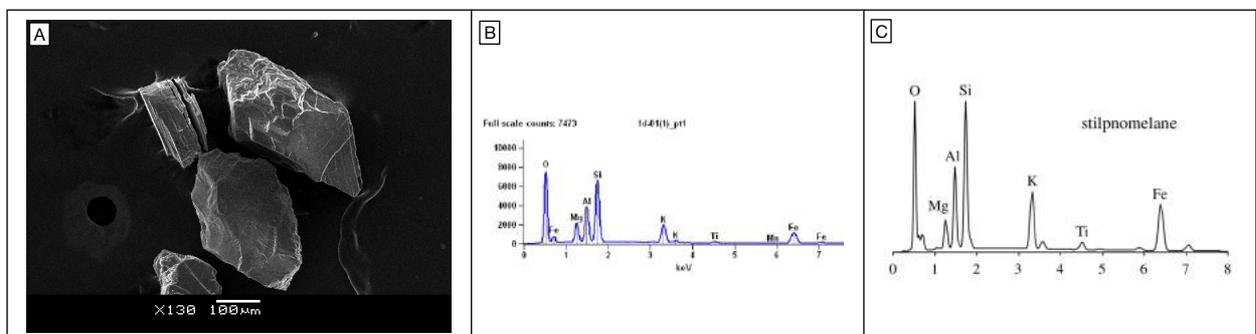


Figura 4.28: A) Imagen de cristales de estilpnomelano extraídos del granito P13 en MEB. B) Su respectivo espectro obtenido del análisis puntual sobre el cristal. (C) Espectro patrón EDS de estilpnomelano (Tomado de Reed, 2005).

Granate (Almandino – Espesartina)

Mineral translúcido, de color rosado o verdoso, brillo vítreo, sin clivaje, con fractura concoidea.

Los rosados son bien escasos y redondeados. Los verdosos son abundantes (95-5%), y no se identifica su hábito (Fig. 4.27 y 4.29).

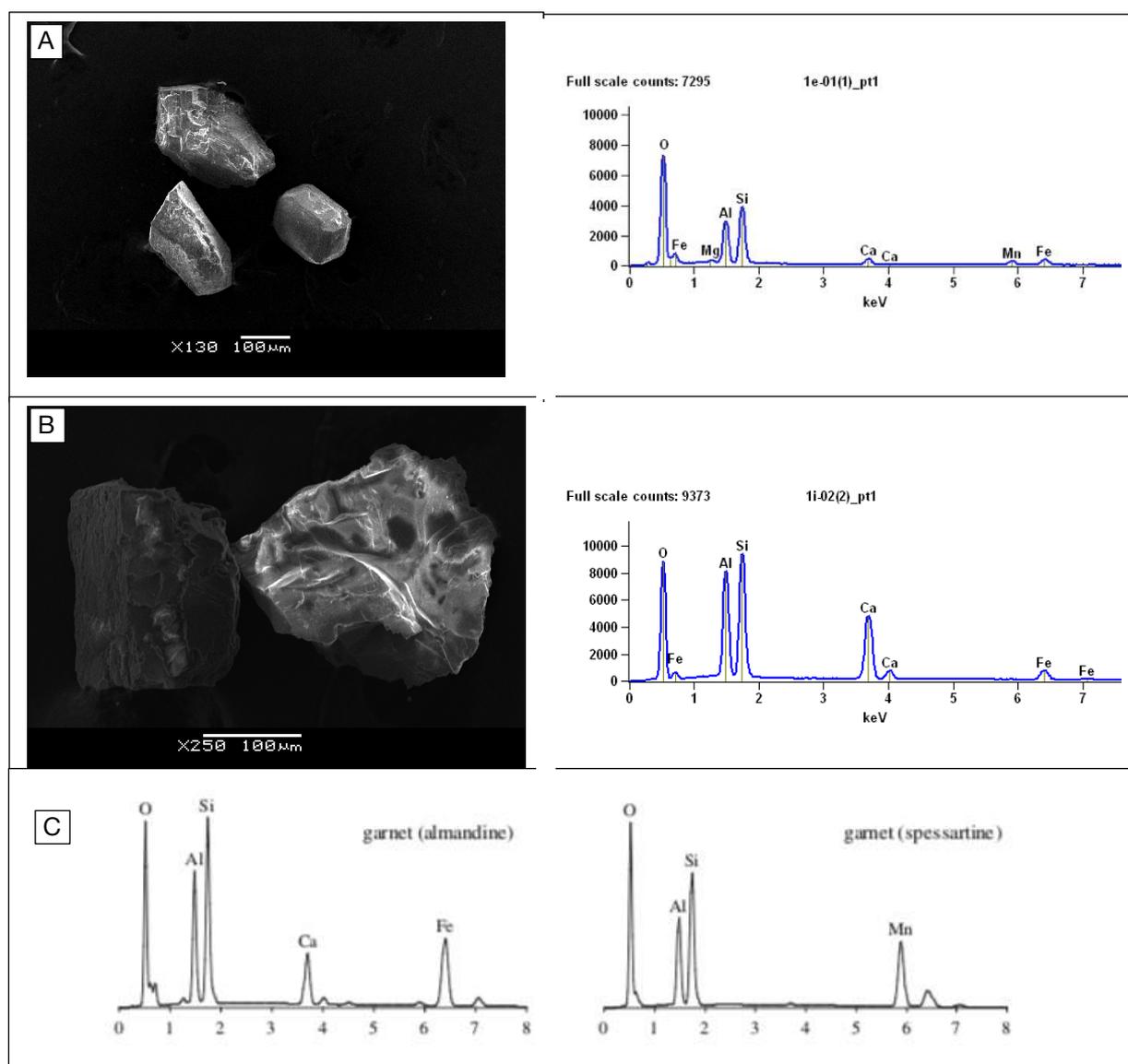


Figura 4.29: A y B) Imágenes de cristales de granate extraídos del granito P13 en MEB y sus respectivos espectros obtenidos de análisis puntual sobre los cristales (C) Espectro patrón EDS de almandino y espesartina (Tomado de Reed, 2005).

Monacita

Mineral translúcido, de color verde amarillento, brillo vítreo, fractura desigual, con clivaje (Fig. 4.30 y 4.31).

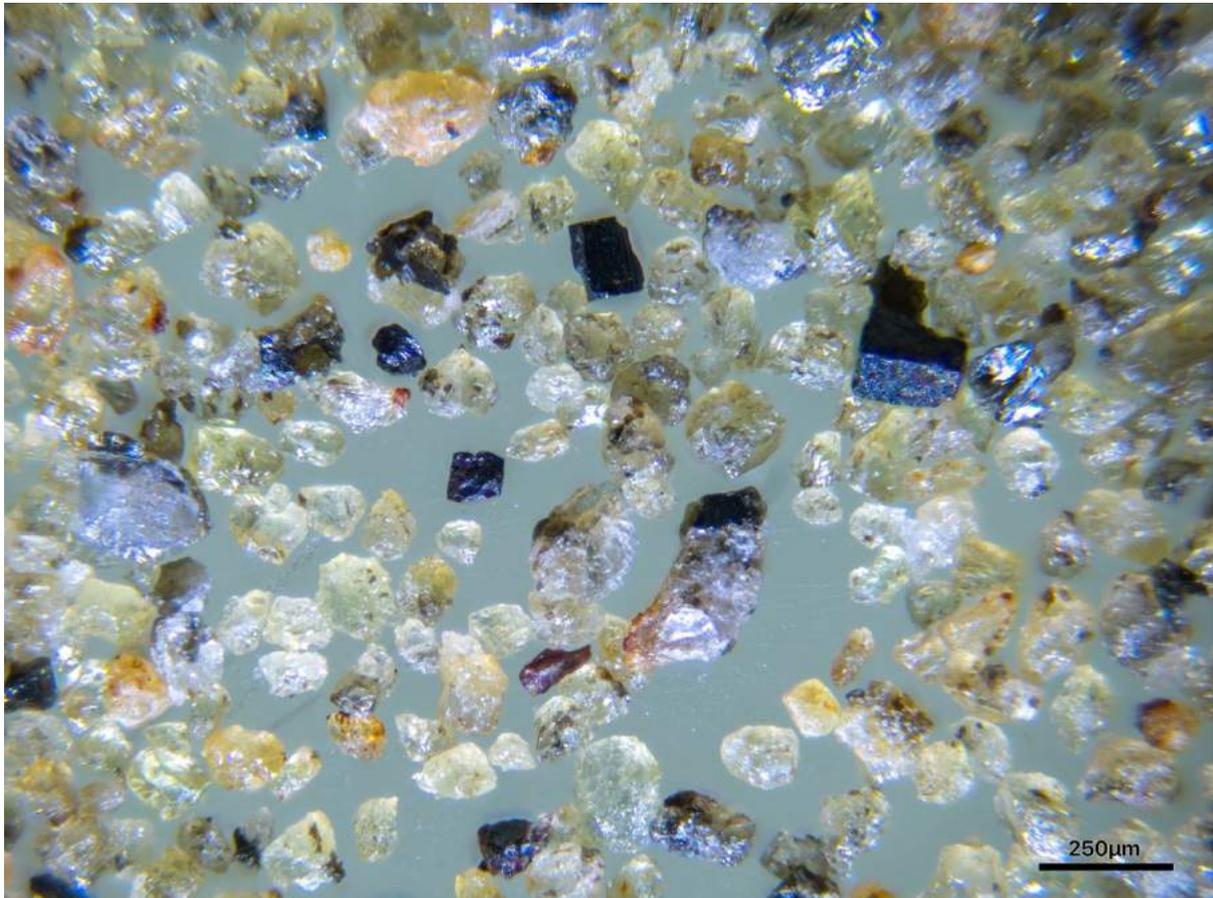


Figura 4.30: Fracción 0,9A. Los fragmentos de monacita y granate (almandino) no pueden diferenciarse en lupa. Su proporción fue estimada a través de mapeo global en MEB, y son escasos.

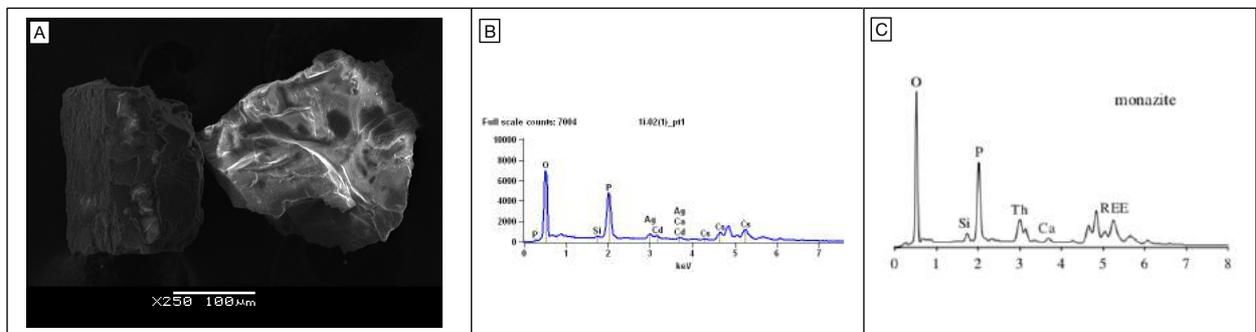


Figura 4.31: A) Imágenes de cristal de monacita extraído del granito P13 en MEB. B) Su respectivo espectro obtenido del análisis puntual sobre el cristal. (C) Espectro patrón EDS de monacita (Tomado de Reed, 2005).

Apatito

Mineral de hábito prismático, incoloro a blanquecino, de brillo vítreo o sedoso, con clivaje y fractura irregular. Se observa redondez en la mayoría de los cristales, y pueden tener inclusiones (Fig. 4.32, 4.33 y 4.34).



Figura 4.32: Minerales correspondientes a la fracción diamagnética separada con LST. Circón (Zrn) y apatito (Ap).

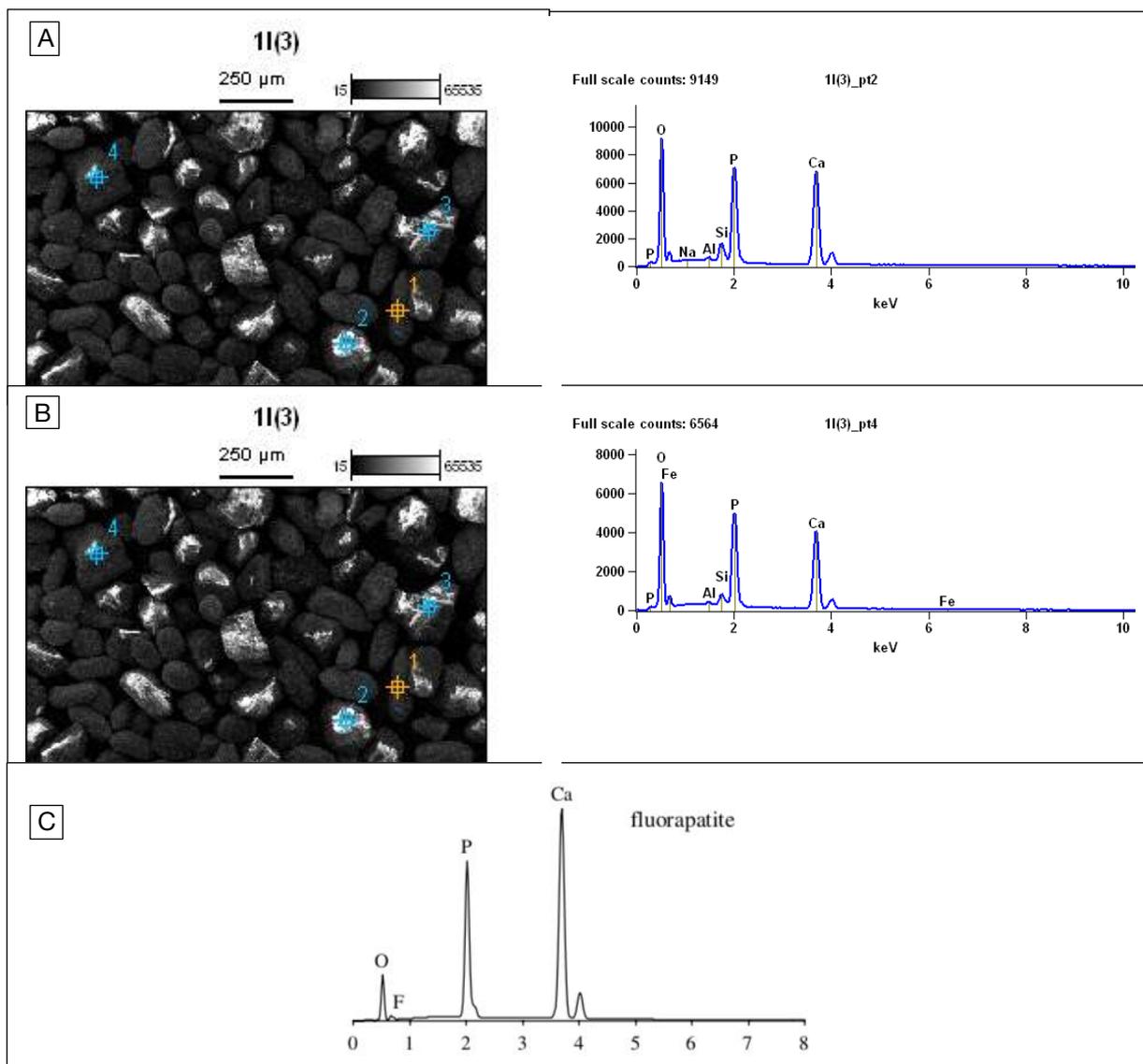


Figura 4.33: A y B) Imágenes de cristales de apatito extraídos del granito P13 en MEB y sus respectivos espectros obtenidos de análisis puntual sobre los cristales (C) Espectro patrón EDS de fluoroapatito (Tomado de Reed, 2005).

Circón

Mineral prismático bipiramidal, incoloro a amarillento castaño, con brillo sedoso, fractura desigual. Observase una gran variedad en la morfología de estos cristales, desde aciculares hasta redondeados. Algunos presentan inclusiones o están recubiertos por una pátina de óxidos (Fig. 4.32, 4.34 y 4.35).

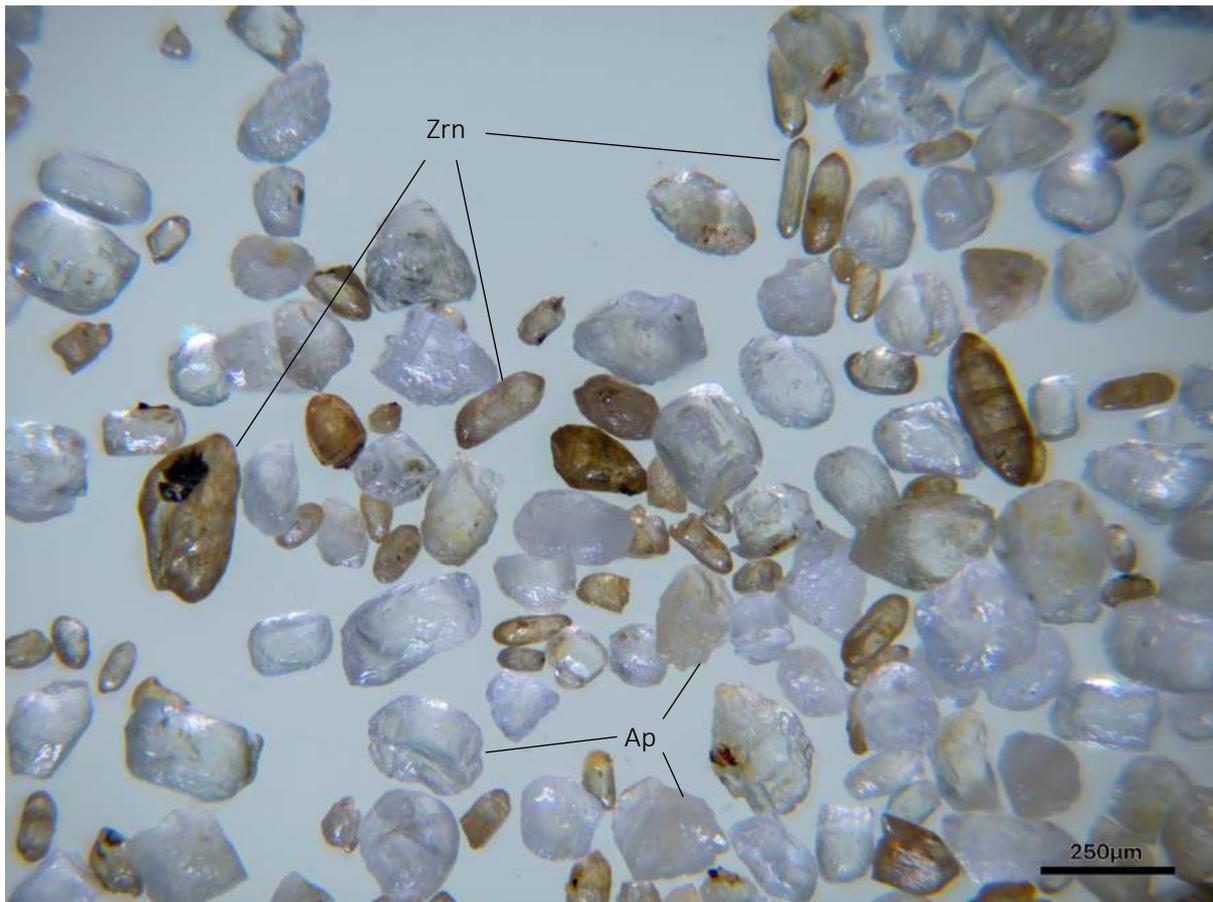


Figura 4.34: Circón (Zrn) y apatito (Ap) extraídos del granito P13. En esta fracción fue utilizado LST.

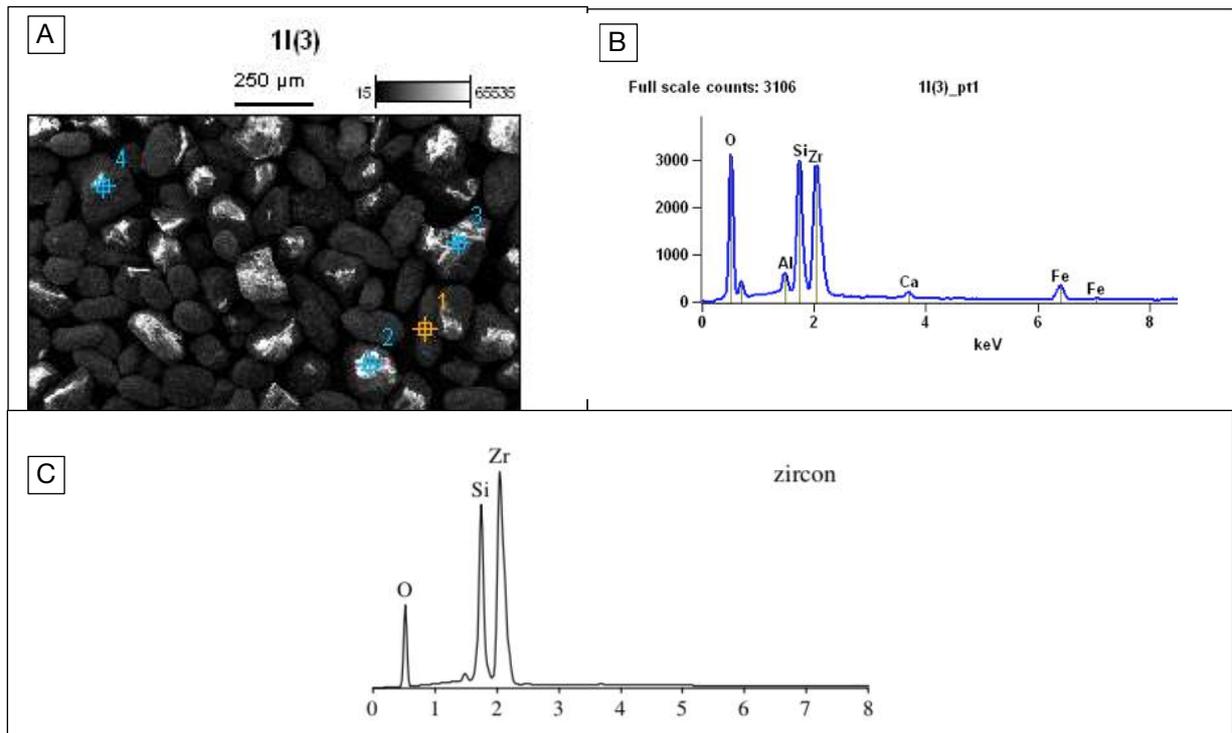


Figura 4.35: A) Imágenes del cristal de circón extraído del granito P13 en MEB. B) Su respectivo espectro obtenido de análisis puntual sobre el cristal. (C) Espectro patrón EDS de circón (Tomado de Reed, 2005).

4.3.2 CUANTIFICACIÓN COMPOSICIONAL

Fueron procesados un total 590 g de esa muestra con tamaño de grano retenidos en los tamices de malla 63 y 125 μm. Posteriormente de procesados en la mesa Wilfley los minerales fueron divididos en tres categorías:

- Densos: 4.80 g
- Intermedios: 24,80g
- Relaves: 478,0 g

En lupa, la fracción de los densos contenía todos los minerales descriptos anteriormente en los resultados, además de algunos fragmentos de cuarzo y feldespato. La fracción denominada “intermedios” está formada mayormente cuarzo y feldespato, con algunos fragmentos de estilpnomelano. La fracción de livianos está compuesta por cuarzo, feldespato, “escamas” de estilpnomelano y algunos pocos

fragmentos del óxido de hierro. No se encontró granate, monacita, apatito y circones en las fracciones consideradas de menor densidad.

La fracción de mayor interés, los densos, fueron entonces procesados en el Frantz, donde los minerales fueron subdivididos según su susceptibilidad magnética (Fig. 4.36).

- Magnéticos: 0,0370 g
- 0,1 A: 0,0071 g
- 0,4 A: 0,2590 g
- 0,5 A: 0,2116 g
- 0,9 A: 1,6775 g
- 1,5 A: 0,1504 g
- 1,7 A: 0,3204 g
- Diamagnéticos 1: 0,5370 g
- Diamagnéticos 2: 1,4670 g



Figura 4.36: Minerale de alta densidad agrupados según susceptibilidad magnética.

La fracción ferromagnética está compuesta por magnetita y otros minerales adheridos a él, en proporciones de 80 y 20%.

La fracción extraída con 0,1 A es donde se encuentra el óxido de hierro, y estimase que 50% de la fracción son otros minerales.

En 0,4 A está compuesta por estilpnomelano, granate y monacita y óxido de hierro en proporciones de 60, 25, 14, 1 y 25%, respectivamente.

La fracción de 0,5 A es de composición similar a 0,4 A, pero no tiene granates rosados, solamente los de color verdoso. Las proporciones son estimadas en 5, 39, 1 y 10%.

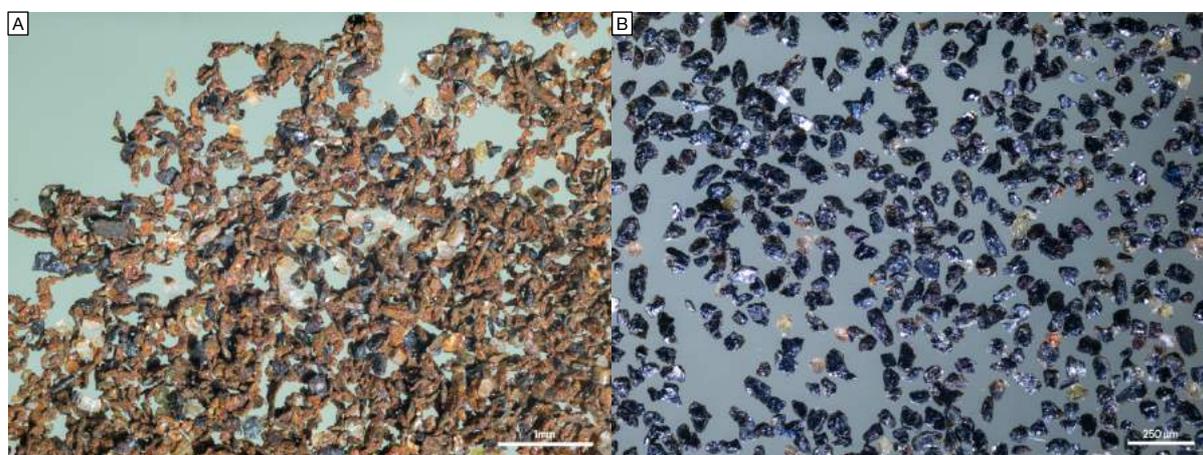
La fracción de 0,9 A también está compuesta de estilpnomelano, granate, monacita, y óxido de hierro en las proporciones de 10, 84, 1 y 5%, respectivamente.

La fracción de 1,5 A está compuesta por cuarzo y feldespato y presenta fracturas de otros minerales adheridos.

La fracción de 1,7 A presenta cuarzo y feldespato y 10% de circones, muchos de estos con inclusiones.

Los valores de proporción sirvieron de referencia para la cuantificación de los minerales accesorios densos en la roca.

En la secuencia se presentan fotos en detalle de estas fracciones (Fig. 4.37)



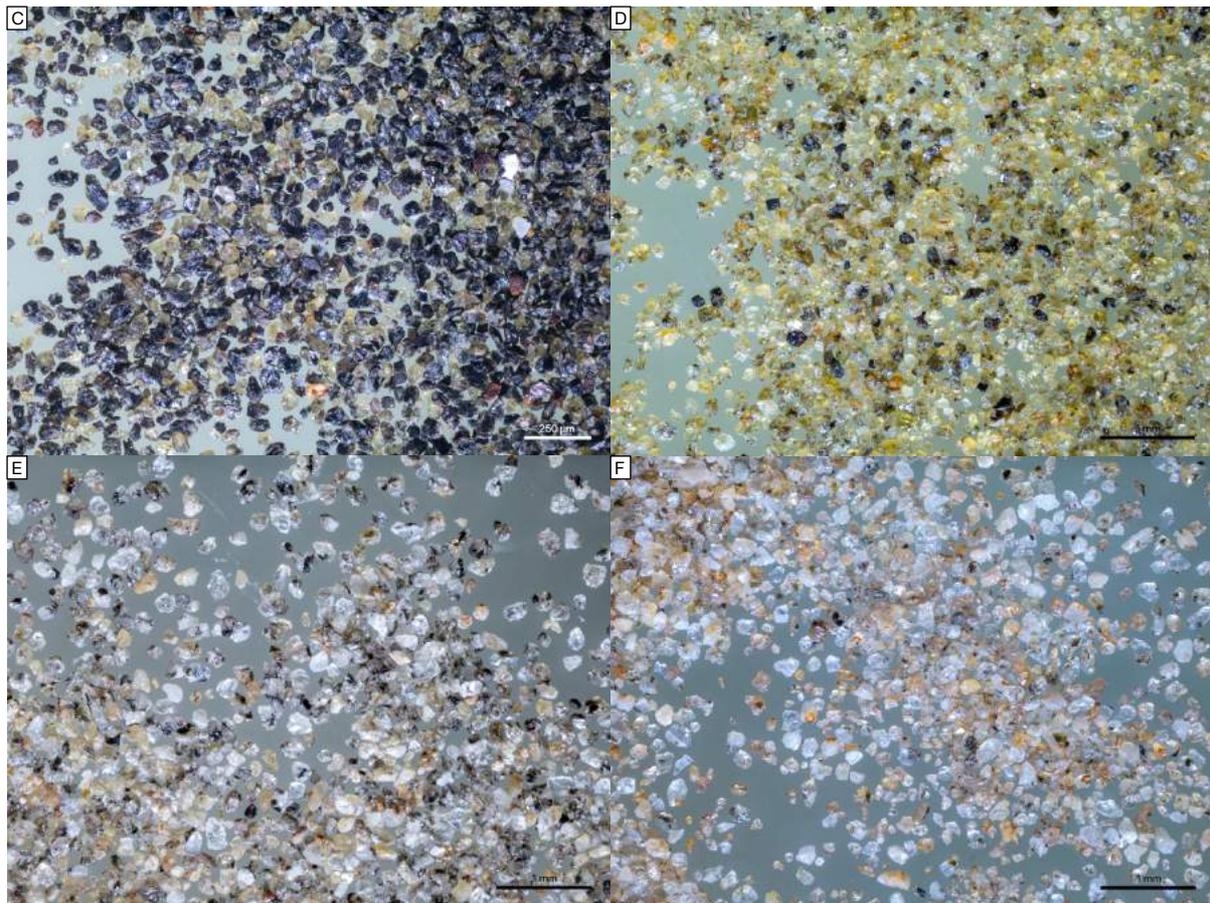


Figura 4.37: A) Fracción magnética. B) 0,4 A. C) 0,5 A. D) 0,9 A. E) 1,5A. F) 1,7 A.

Posteriormente, la fracción resultante – los diamagnéticos - fue pasada por LST donde se separaron los minerales con densidad mayor a $2,85 \text{ g/cm}^3$. Se obtuvieron dos partes (Fig. 4.38): una de mayor densidad compuesta por apatito y circón en la proporción de 60 y 40% (fracción diamagnéticos 1); y otra con cuarzo y feldespatos (fracción diamagnéticos 2).

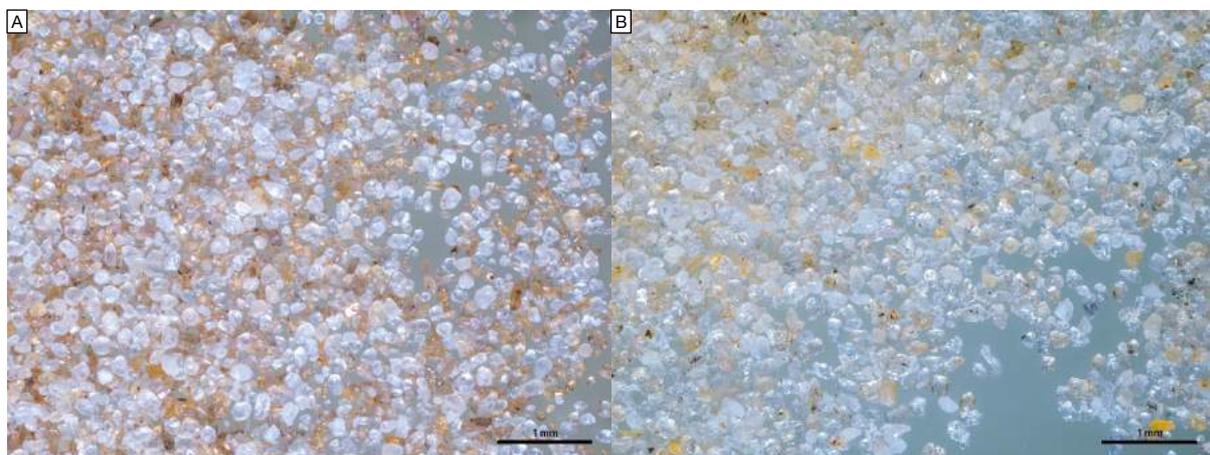


Figura 4.38: Resultado de la separación con LST. A) Diamagnéticos 1 - densos (zircón y apatito). B) Diamagnéticos 2 - ligeros (cuarzo y feldespatos).

4.4 GRANITO P34

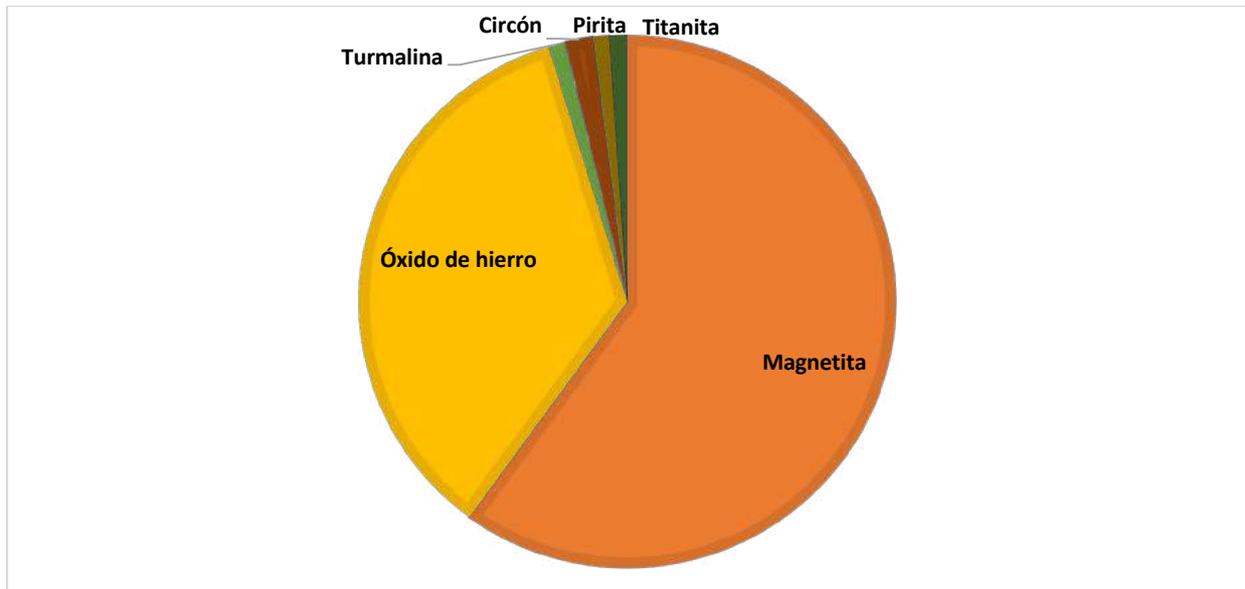
Esta muestra fue tomada en una cantera desarrollada sobre un granito de grano grueso, recortado por diques de microgabro y por venas aplíticas y pegmatíticas (Fig. 4.39). El granito es cuarzo-feldespático con escasísimos minerales máficos, de color rojo-rosado, y con variaciones a tamaños de grano medio a finos.



Figura 4.39: Granito P34 en su afloramiento.

4.4.1 MINERALOGÍA

En este granito fueron encontrados como minerales accesorios densos magnetita, óxido de hierro (magnetita\hematita), turmalina, circón, pirita y titanita. Sus proporciones corresponden a 60, 0,15, 1,70, 0,35, 0,35, y 37,45% (gráfica 4.4).



Gráfica 4.4: Distribución de los minerales accesorios en el granito P34.

La cantidad de minerales accesorios densos estimada representa 0,373% de la muestra analizada.

A continuación, se presenta una breve descripción de los minerales observados en lupa, además de los resultados obtenidos en el Microscopio Electrónico de Barrido.

Magnetita

Minerales opacos, donde no se identifica su hábito, con clivaje, de color gris oscuro y brillo metálico, raya marrón, y algunos presentan oxidación (Fig. 4.40 y 4.41).

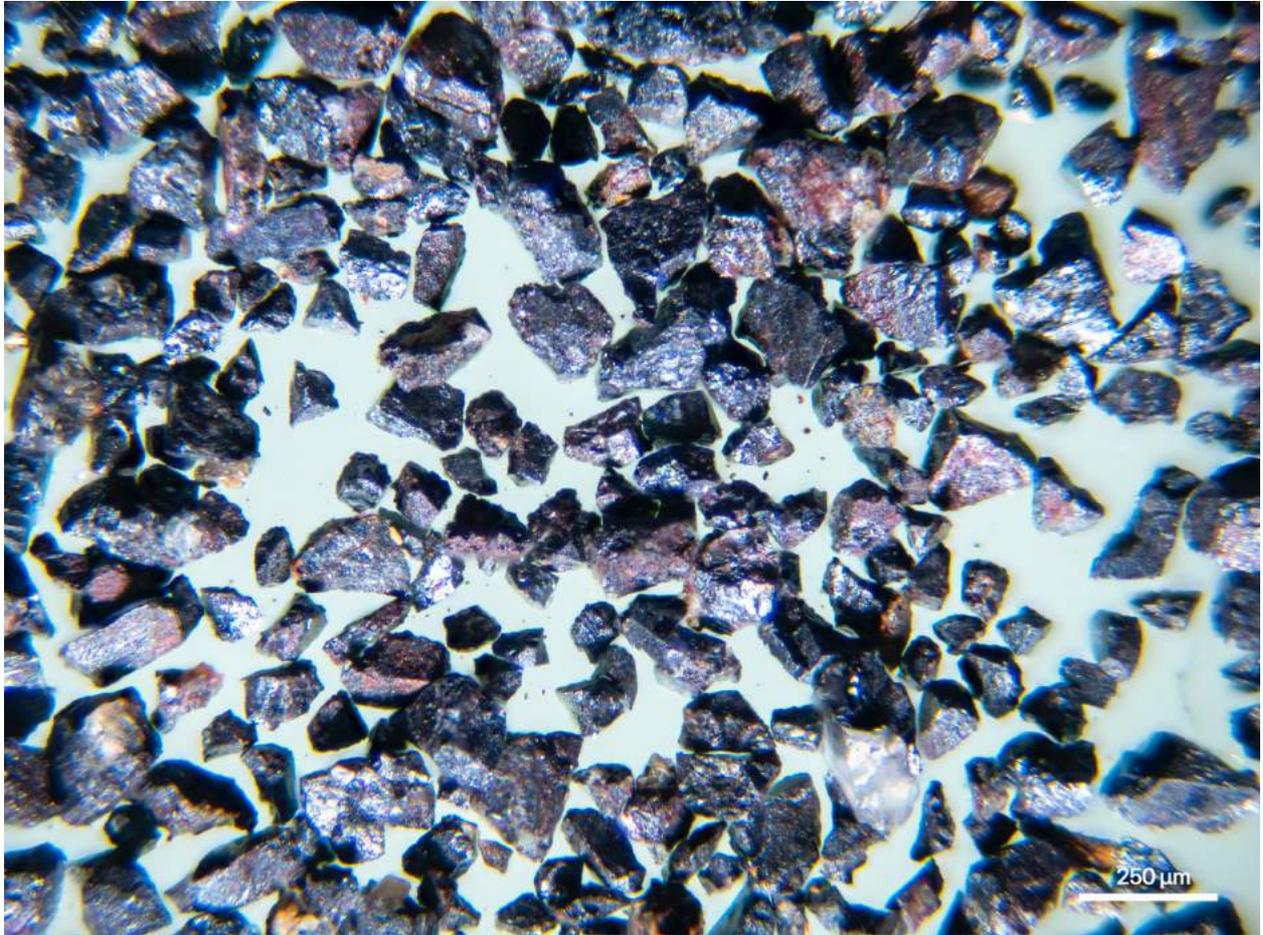


Figura 4.40: Minerales separados con imán de mano del granito P34. La fracción está compuesta mayormente por fragmentos de magnetita.

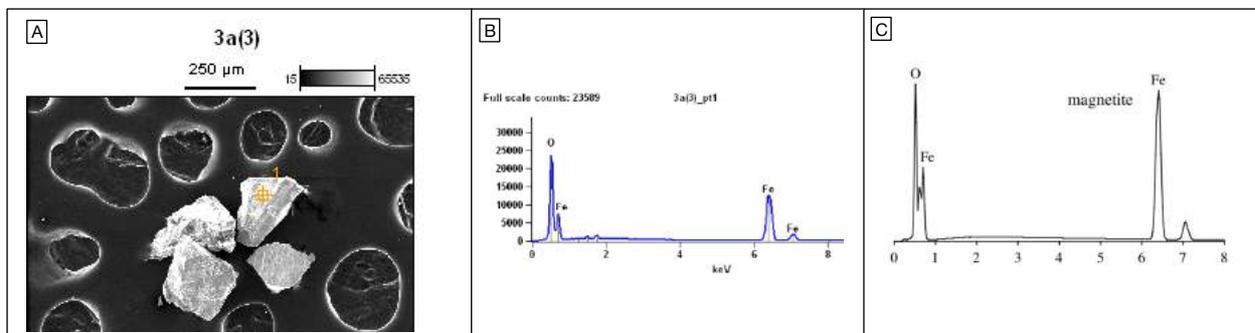


Figura 4.41: A) Imágenes de cristales de magnetita extraídos del granito P34 en MEB. B) Su respectivo espectro obtenido de análisis puntual sobre el cristal. (C) Espectro patrón EDS de magnetita (Tomado de Reed, 2005).

Óxido de hierro

Mineral opaco, de color negro y brillo metálico, fractura desigual, raya rojiza, y no es posible identificar su hábito (Fig. 4.42 y 4.43).

Exhibe las mismas características que el óxido de hierro presente en el granito P13 en 4.3.

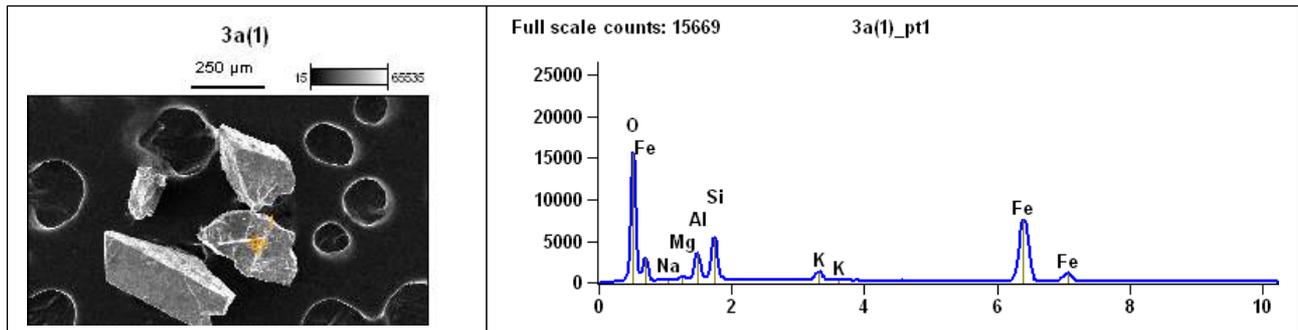


Figura 4.42: Imágenes de cristal del óxido de hierro extraído del granito P34 en MEB y su respectivo espectro obtenido de análisis puntual sobre el cristal.

Turmalina

Mineral de hábito prismático acicular, de color marrón verdoso, brillo vítreo, fractura concoidea, sin clivaje (Fig. 4.43 y 4.44).

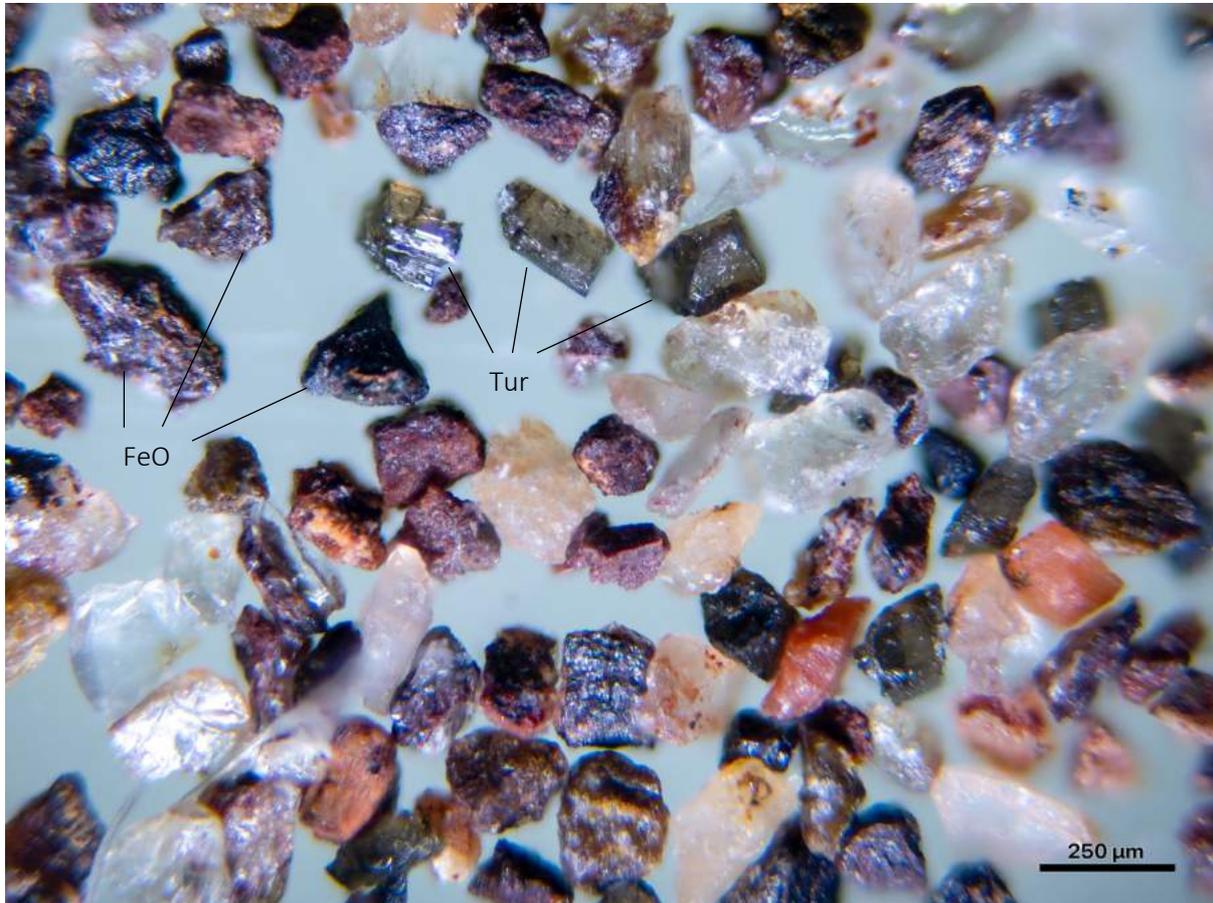


Figura 4.43: fragmentos de turmalina (Tur) y del óxido de hierro (FeO) pertenecientes al granito P34.

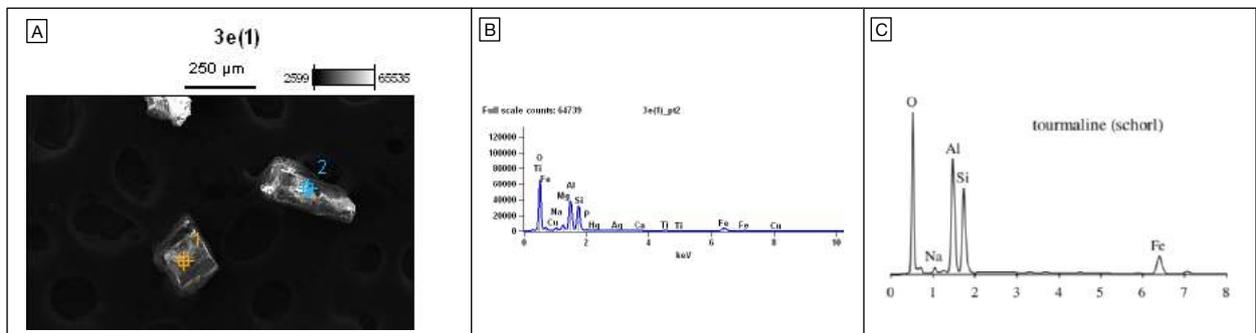


Figura 4.44: A) Imágenes de cristales de turmalina extraídos del granito P34 en MEB. B) Su respectivo espectro obtenido del análisis puntual sobre el cristal. C) Espectro patrón EDS de turmalina (Tomado de Reed, 2005).

Circón

Mineral prismático bipiramidal a subhedral, con fractura desigual, brillo satinado, algunos incoloros, rosados o rojizos. Algunos presentan inclusiones o están recubiertos por una pátina (Fig. 4.45, 4.46 y 4.47).

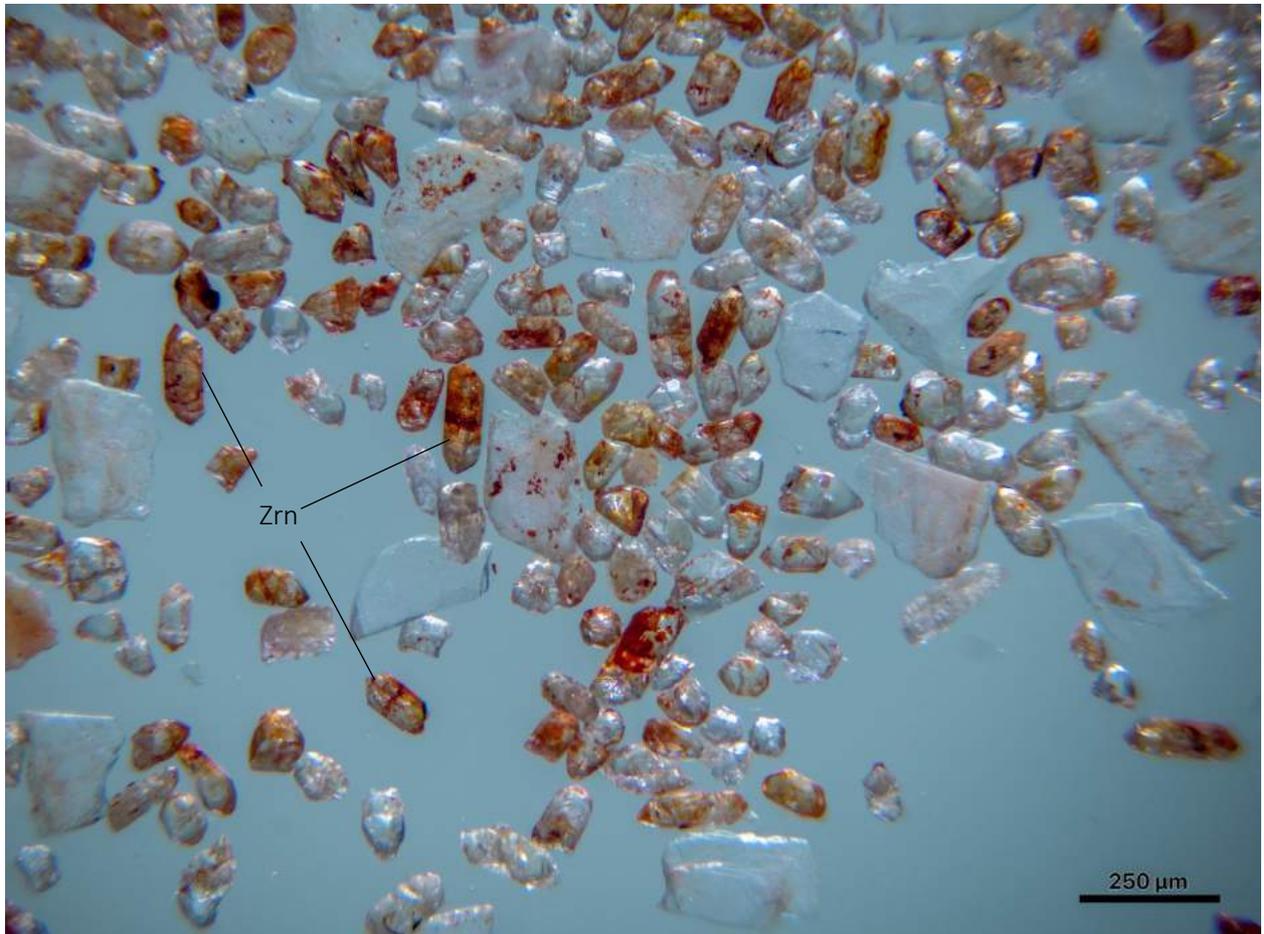


Figura 4.45: Cristales de circón (Zrn).

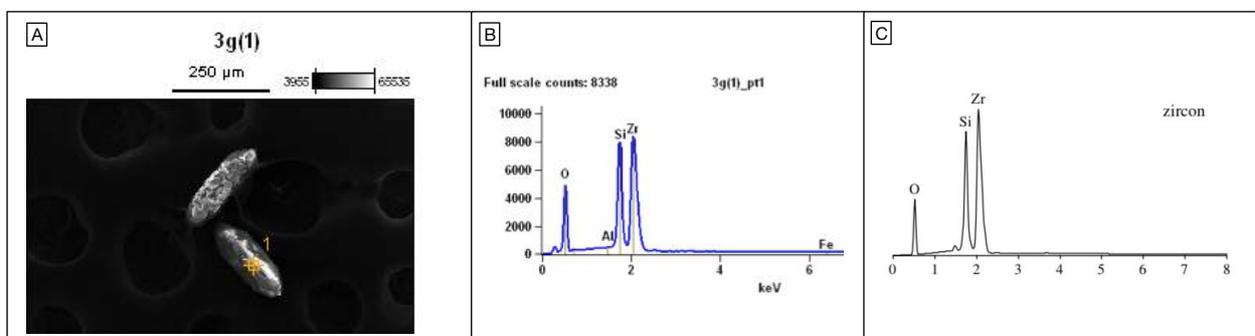


Figura 4.46: A) Imágenes de cristales de circón extraídos del granito P34 en MEB. B) Su respectivo espectro obtenido del análisis puntual sobre el cristal. C) Espectro patrón EDS de circón (Tomado de Reed, 2005).

Pirita

Presenta hábito cúbico, opaco, de color dorado y de brillo metálico, con estrías, fractura concoidea (Fig. 4.47 y 4.48).

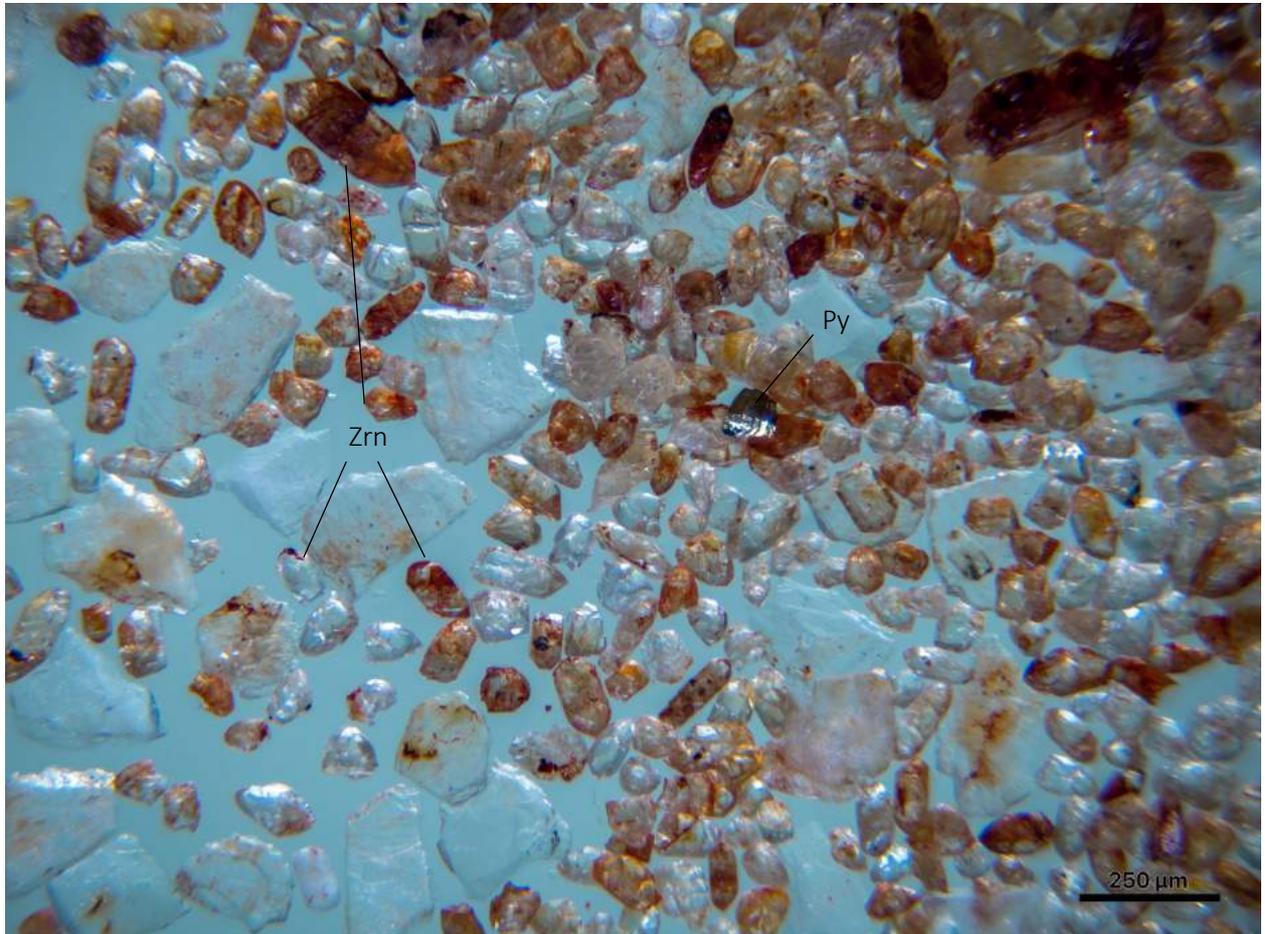


Figura 4.47: Cristales de circón (Zrn) y pirita (Py).

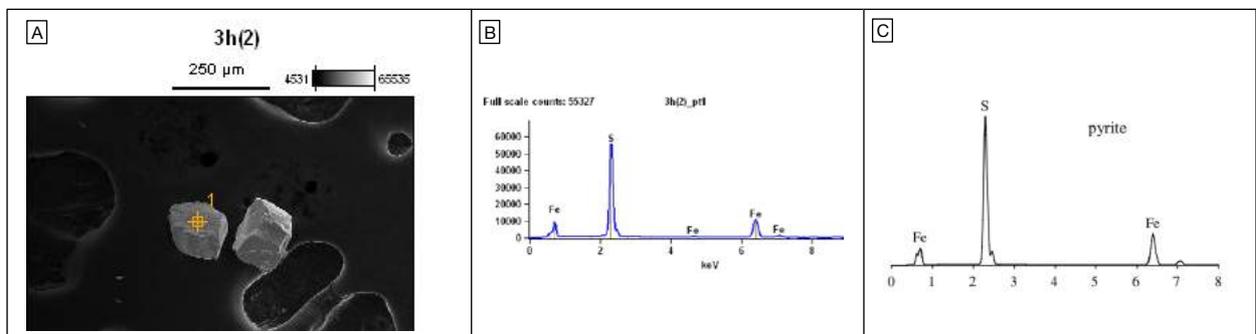


Figura 4.48: A) Imágenes de cristales de pirita extraído del granito P34 en MEB. B) Su respectivo espectro obtenido del análisis puntual sobre el cristal. C) Espectro patrón EDS de pirita (Tomado de Reed, 2005).

Titanita

Mineral incoloro y prismático. De difícil identificación (Fig. 4.49).

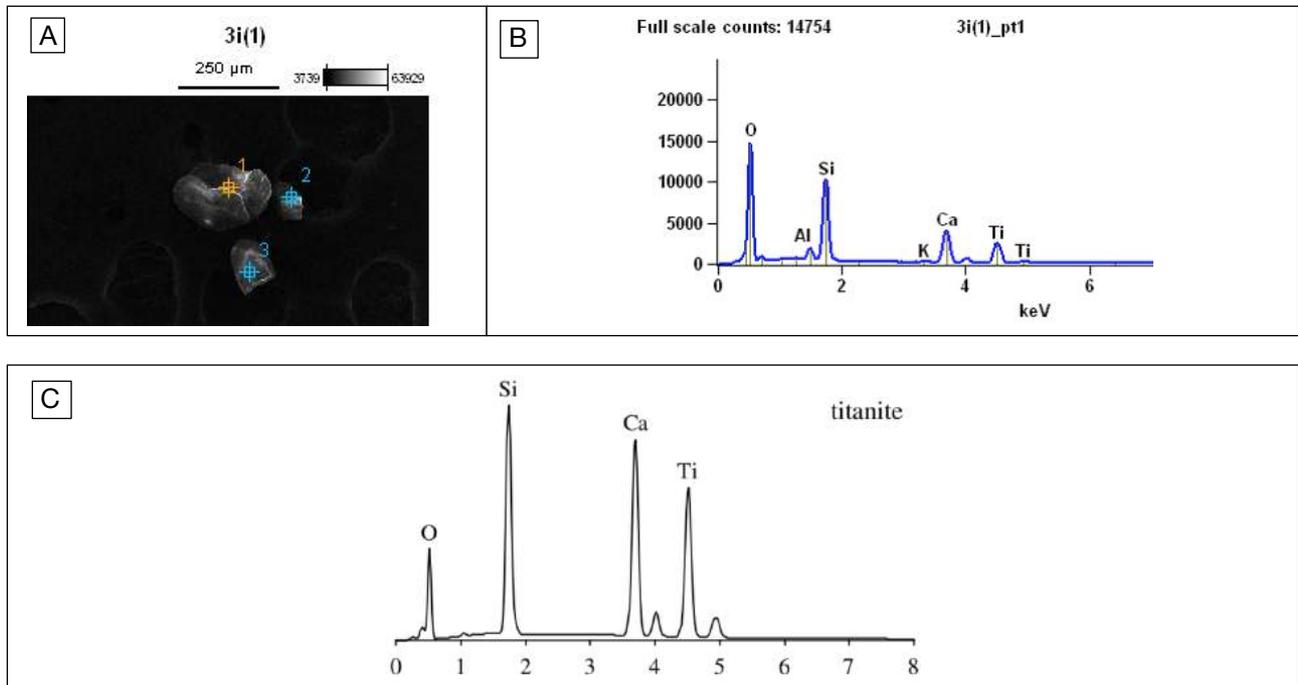


Figura 4.49: A) Imágenes de cristal de titanita extraído del granito P34 en MEB. B) Su respectivo espectro obtenido de análisis puntual sobre el cristal. (C) Espectro patrón EDS de titanita (Tomado de Reed, 2005).

4.4.2 CUANTIFICACIÓN COMPOSICIONAL

Para la concentración de los minerales de este granito fueron utilizados 504 g de muestra con tamaño de grano retenidos en los tamices de malla 63 y 125 μm.

Posteriormente, procesados en la mesa Wilfley, los minerales fueron divididos en tres categorías:

- Densos: 2,60 g
- Intermedios: 2,95 g
- Relaves: 458,0 g

Las fracciones denominadas intermedios y relaves fueron analizadas en lupa y están conformadas por fragmentos de cuarzo y feldespatos. No fueron encontrados

turmalina, circón, pirita y titanita en estas fracciones consideradas de menor densidad. La fracción de densos fueron entonces procesados en el Frantz, donde los minerales fueron subdivididos según su susceptibilidad magnética (Fig. 4.50).



Figura 4.50: Minerales densos del granito P34 agrupados según susceptibilidad magnética.

- Magnéticos: 1,1560 g
- 0,3 A: 0,6670 g
- 0,5 A: 0,0380 g
- 0,9 A: 0,0148 g
- 1,70 A: 0,0267 g
- Diamagnéticos: 0,6412 g

La fracción concentrada con el auxilio del imán de mano (magnéticos) está compuesta por 99% magnetita y otros pocos minerales adheridos.

La fracción extraída 0,3 A está compuesta por el óxido de hierro en la proporción de 99%.

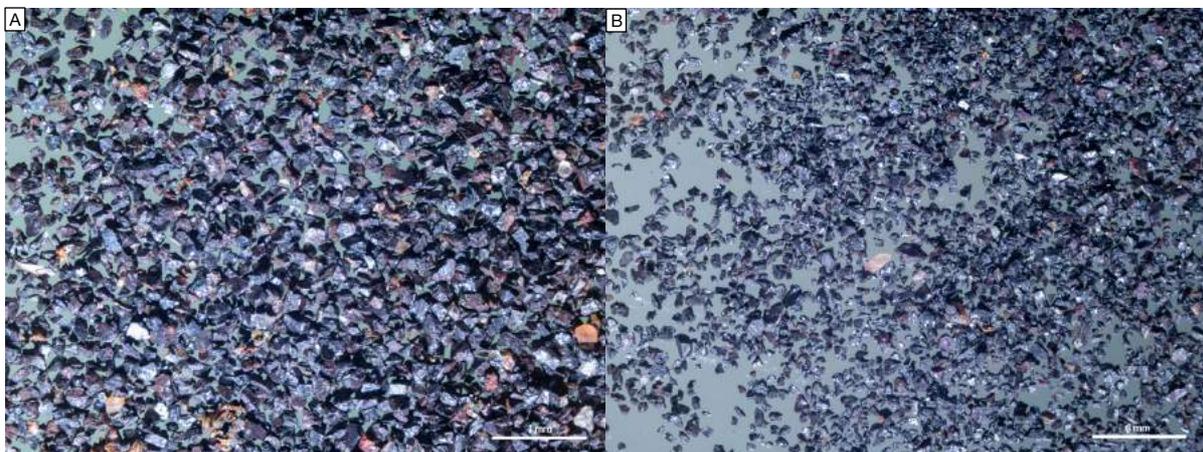
La fracción extraída con 0,5 A presenta el óxido de hierro como el mineral predominante y su proporción es de 70%, mientras los otros minerales en esta fracción son fragmentos de cuarzo y feldespatos adheridos a fragmentos opacos.

En la fracción 0,9 A se encuentran turmalina y el óxido de hierro en proporciones de 20 y 30% respectivamente, mientras los demás minerales son identificados como cuarzo y feldespato.

La fracción 1,7 A está formada exclusivamente por minerales de cuarzo y feldespato, algunos con fragmentos de minerales opacos adheridos.

En la fracción diamagnética ($>1,7$ A) se encuentran cristales de circón, pirita y titanita. Sus proporciones son 5% circones, 1% pirita y 1% titanita. La identificación y cuantificación de la titanita solamente fue posible con el análisis de mapeo global en microscopio electrónico de barrido, ya que se presentan en fragmentos y en escasa cantidad.

En la figura 4.51 se presentan fotos en detalle cada una de estas fracciones:



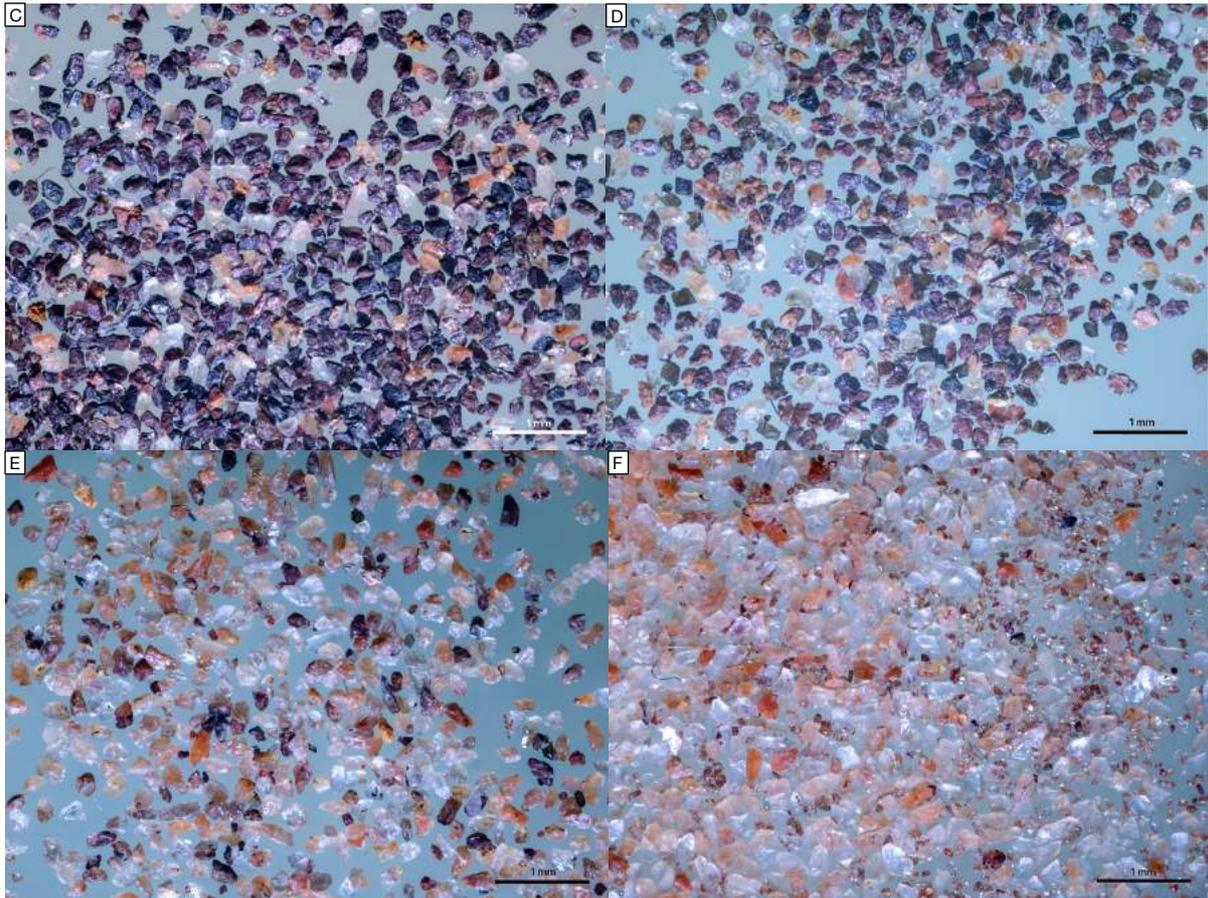


Figura 4.51: A) Fracción de minerales magnéticos. B) 0,3 A. C) 0,5 A. D) 0,9 A. E) 1,7 A. F) Diamagnéticos.

4.5 GUÍA PARA LA UTILIZACIÓN DE LOS EQUIPOS

Como parte de los objetivos propuestos, se presenta una guía introductoria para la utilización de los equipos adquiridos por el Departamento de Geología de la Facultad de Ciencias. Esta guía está basada en los manuales adjuntos a los equipos, en pesquisas *online* (Rosenblum *et al.*, 2000, Arizona Laserchron Center, 2019) y de la puesta en marcha de estos. Tiene la finalidad de aportar principios básicos sobre su funcionamiento y operación.

4.5.1 MESA WILFLEY

Preparación:

Posteriormente a la conexión de los tubos de descarga de agua en las salidas del equipo (Fig. 4.52a), la mesa debe ser lavada con detergente y esponja; una correcta limpieza de la mesa es esencial para evitar contaminaciones en la muestra, ya que este equipo es propenso a la retención de granos sobre su cubierta que pueden pasar imperceptibles debido a su pequeño tamaño e ínfima cantidad, los cuales son suficientes para comprometer el resultado de los estudios; por eso, se enfatiza dedicar la atención necesaria en esa etapa. Se recomienda que la mesa sea lavada de dos a tres veces, seguido de una inspección visual entre los rifles y los demás rincones del equipo a fin de corroborar la ausencia de contaminantes. La mesa debe ser lavada antes y después de cada uso.

Inclinación de la mesa:

El ángulo de inclinación transversal se ajusta aflojando la tuerca M16 (Fig. 4.52b) en la conexión de transmisión (llave de 24 mm).

La pendiente correcta solo se puede determinar mediante una inspección visual de la separación, ya que es dependiente de la muestra utilizada y del agua de lavado. Como regla general, cuanto mayor sea la pendiente, más limpia será la ley del

concentrado y menor será la recuperación y viceversa. Como sugerencia, la inclinación inicial puede ser ajustada entre 0,5 y 1 cm de su máximo (Fig. 4.52c).

El ángulo de inclinación longitudinal se puede ajustar usando el volante ubicado debajo de la viga de soporte en el extremo de concentrado de la mesa (Fig. 4.52d). Este ángulo solo se puede optimizar mediante prueba y error; sin embargo, cuanto más alto es el extremo, más tiempo permanece el material en la mesa, y más limpio será el concentrado.

Velocidad de carrera:

Al girar el selector de control de la caja de inversión, varía la velocidad de carrera.

En los estudios presentados en este trabajo, se utilizó como configuración inicial la posición del selector entre 60 y 70 (Fig. 4.52e), pudiendo ser reajustado posteriormente a una inspección visual del comportamiento de la muestra en la cubierta. Como regla general, cuanto más rápida la velocidad de carrera, menos tiempo la muestra permanece en la mesa.

Longitud de carrera:

La longitud de la carrera se puede ajustar con el tornillo de ajuste de la carrera ubicado debajo de la tapa en el extremo frontal del motor.

Bajar el bloque de ajuste de carrera aumenta la longitud de la carrera. Las partículas gruesas requieren una carrera más larga que las partículas más finas.

Agua de lavado:

El agua de lavado debe fluir uniformemente sobre la plataforma. Este factor es esencial para lograr una separación eficiente. La cantidad de agua de lavado solo puede ser determinada por experimentación. Un mayor volumen de agua de lavado da como resultado concentrados más limpios y menor recuperación, y viceversa. Como sugerencia inicial, abrir al máximo el flujo de agua en los *sprays* distribuidos

longitudinalmente sobre la cubierta, mientras el agua de alimentación, donde se adiciona la muestra, ubicado en el extremo inicial de la mesa, debe estar abierta entre 30 y 50% de su máximo. Aún, se deben evitar los torrentes de agua que se forman en algunas partes de la mesa (Fig. 4.52f), puesto que estos terminan expulsando de la mesa todos los minerales que pasan por allí, independientemente de sus propiedades físicas, y disminuyendo significadamente la eficiencia de la mesa. Para lograr la ausencia de torrentes, se pueden utilizar los precintos instalados para cerrar individualmente los *sprays* de agua hasta lograr un flujo uniforme sobre la mesa (Fig. 4.53a). Los ajustes de inclinación longitudinal y transversal de la mesa también contribuyen a uniformizar el flujo. Además, las variaciones en el caudal de agua en predio de Facultad en horas día pueden influenciar en el proceso y deben ser considerados cuando sea pertinente.

Alimentación:

Inicialmente, la muestra debe ser humedecida a fin de evitar que la tensión superficial del agua haga con que algunas partículas floten hacia los relaves sin haber sido influenciadas por fuerzas gravitacionales.

Algunas materias primas son "no humectantes" y requerirán la adición de un agente para ayudar a la sedimentación. Una pequeña cantidad de detergente es suficiente.

La velocidad de alimentación es una función del tamaño de las partículas y sus diferencias de densidad específicas. Esto puede variar desde unos pocos kilogramos por hora en adelante. Sin embargo, como regla general, cuanto más finas son las partículas, menor debe ser la velocidad de alimentación.

La homogenización del tamaño de los granos contribuye para una mejor respuesta de la muestra sobre la mesa.

Recuperación de la muestra:

En este estudio se optó por agrupar los resultados obtenidos en la mesa Wilfley en densos, intermedios y relaves. Esta asociación es subjetiva y las fracciones se componen de minerales retenidos en los distintos “depósitos” presentes en la mesa, donde se captan las partículas que son lavadas. El criterio utilizado se presenta en la figura 4.53b.

Para evitar pérdidas y contaminación en la fracción de mayor interés - los densos - se recuperan sobre un pedazo de papel aluminio doblado al medio, ubicado en el extremo de descarga de la mesa (Fig. 4.53c). Se debe tener el cuidado para no romper el recipiente de aluminio en su manipulación, principalmente en su colocación, lo cual implicaría la pérdida de material; incluso, se debe corroborar si no existen minerales atrapados en su interior al final del proceso.

Las demás consideraciones en esta etapa se dan principalmente con el fin de evitar contaminaciones externas, por eso se optó por disminuir la cantidad de superficies en las cuales los minerales tienen contacto. Ya que las mangueras en las salidas del equipo son pasibles de retener partículas adheridas en su superficie, se optó por retener los minerales en los “depósitos” de la mesa (Fig. 4.53d); pero en contrapartida, la pérdida de partículas ubicadas en las fracciones menos densas será mayor por el desagüe.

Una vez realizada la primera pasada de la muestra por la mesa, se analizan visualmente el resultado obtenido y se decide por procesar algunas de las fracciones nuevamente hasta lograr un resultado satisfactorio. En general, las fracciones denominadas densas e intermedias fueron procesadas de una a tres veces por la mesa durante este trabajo.

Cuando el objetivo principal es la concentración de circones, si la roca es félsica entonces los parámetros de configuración de la mesa pueden ser más agresivos, y el concentrado final será menor. En el caso de rocas máficas, es conveniente ser más conservador en esa etapa y obtener un concentrado más grande, ya que los minerales ferromagnesianos son fácilmente discriminados de los circones en la etapa de separación magnética.

Por último, se drenan individualmente las fracciones recuperadas, las cuales son transferidas a la estufa hasta que estén completamente secas.



Figura 4.52: A) Disposición de los tubos de descarga de agua de la mesa. B) Tuerca de ajuste de inclinación transversal. C) Inclinación transversal inicial sugerida. D) Volante de ajuste de inclinación longitudinal. E) Selector de velocidad de carrera. F) Torrente de agua que debe ser evitado.

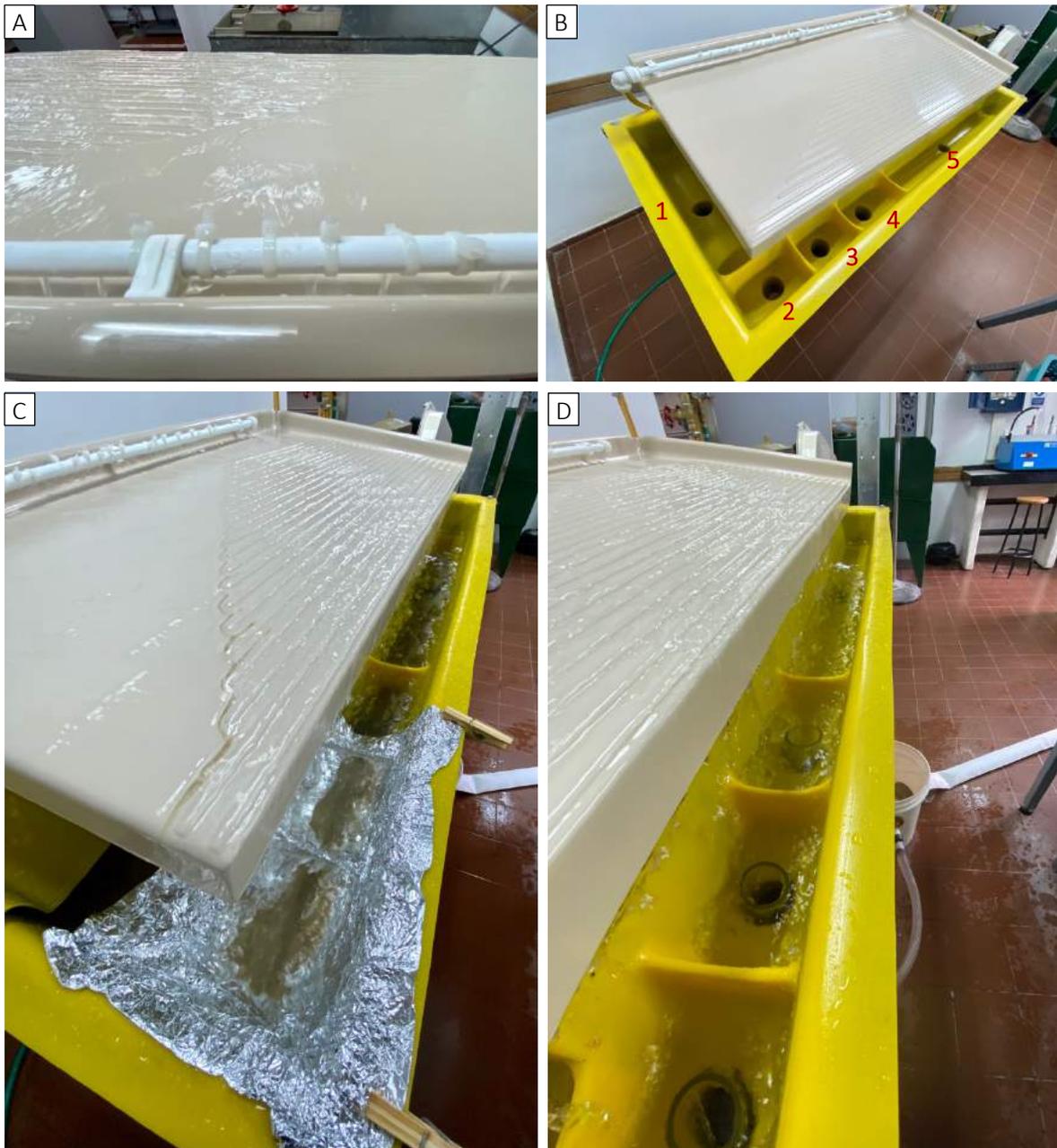


Figura 4.53: A) Precintos utilizados para controlar individualmente los *sprays* de agua. B) Criterios de clasificación de los minerales recuperados: 1, 2 y 3 minerales densos, 4 intermedios, y 5 relaves. C) Los minerales densos se recuperan sobre papel aluminio a fin de evitar contaminación y pérdidas de material. D) También con el objetivo de evitar contaminaciones, se utilizan los trozos de manguera ajustados en las salidas de agua para que los depósitos en la mesa actúen como piletas de sedimentación.

4.5.2 SEPARADOR ISODINÁMICO FRANTZ

El procedimiento descrito a seguir se refiere exclusivamente a la operación en modo inclinado, configurado para la separación de minerales paramagnéticos.

Preparación:

Antes y después de cada ejecución de muestra, el separador magnético necesita estar completamente limpiado a fin de evitar contaminaciones, para cual se realiza la limpieza utilizando aire comprimido y posteriormente alcohol. Todas las superficies que entran en contacto con la muestra deben ser cuidadosamente limpias; se debe evitar cualquier tipo de grasa, ya que ésta perjudica el deslizamiento de las partículas. Incluso la grasa de la piel es suficiente para comprometer la separación, por eso se debe evitar tocar con la mano la superficie del conducto por donde deslizan los granos (Fig. 4.54a).

Se atornilla el embudo de alimentación en el extremo superior del conducto. La velocidad de alimentación de los materiales se regula variando el espacio libre en el fondo del embudo (Fig. 4.54a) y la intensidad del controlador de vibración (Fig. 4.54b). La muestra no debe superar el 80% de la capacidad del embudo con la intención de evitar pérdidas por saltación.

La pendiente delantera (longitudinal) de la rampa (Fig. 4.54c) generalmente es de unos 25 grados para la mayoría de los granos de forma irregular. Este parámetro no es crítico, regula la velocidad de desplazamiento de los minerales y se cambia de vez en cuando para ayudar a que los granos de diferentes formas y tamaños se desplacen de modo ágil y suave por el conducto, sin saltar. Las hojas de papel en la base del equipo son útiles para verificar que no hay pérdidas de partículas por saltación (Fig. 4.54d). El aumento de la pendiente hacia adelante aumenta la velocidad con que las partículas se mueven hacia abajo por el conducto, al igual que el aumento de la intensidad de la vibración. Para un flujo uniforme de materiales, generalmente se

requiere una pendiente más pronunciada para granos finos que para granos más gruesos. La pendiente hacia adelante sería de aproximadamente 28 a 30 grados para los granos laminados, y de 20 a 25 grados para los granos redondeados.

La pendiente lateral puede ser utilizada de -2 a -30 grados, y como configuración inicial la pendiente lateral puede ser fijada en -15 grados (Fig. 4.54e). El aumento de la pendiente lateral aumenta el componente de fuerza gravitacional que se opone a la fuerza magnética; en consecuencia, la corriente requerida para hacer que un material se separe con la fracción magnética será mayor para pendientes laterales más pronunciadas.

La selección de la configuración del embudo, la orientación del imán y la intensidad de la vibración para una separación en particular requiere cierta práctica y experimentación.

Operación:

Antes de ingresar la muestra al equipo, se deben extraer los minerales con alta susceptibilidad magnética (normalmente magnetita, granos compuestos o con inclusiones) utilizando un imán de mano, preferencialmente de neodimio. Esta etapa es sumamente importante, pues estos minerales se quedarían atrapados en el conducto del separador isodinámico, obstruyendo el flujo de partículas.

Se envuelve el imán con un film o bolsa plástica a fin de evitar que los granos se queden adheridos permanentemente en el imán de mano. Se repite esta etapa de dos a tres veces si es necesario.

Antes de introducir la muestra en el embudo de alimentación, la fuente de alimentación de corriente necesita estar prendida (Fig. 4.54f), pues algunos granos comenzarán a deslizarse y no serán afectados por el campo magnético. Se gira el selector de corriente a su mínimo, se presiona el botón de output y se selecciona el amperaje deseado girando en selector de corriente, y finalmente se ajusta la

intensidad del mecanismo de vibración para que las partículas deslicen uniformemente por el conducto.

La primera pasada de muestra por el equipo es aconsejable que sea con 0,1 amperio a fin extraer cualquier partícula con alta susceptibilidad magnética que no haya sido removida por el imán de mano. Los incrementos en el campo magnético deben ser ejecutados solamente con el selector de corriente, sin variar el selector de voltaje.

Como regla general, los minerales incoloros o blancos son generalmente diamagnéticos y su extracción es superior a 1,70 amperios. Los minerales de color oscuro y opacos generalmente se extraen a menos de 1,00 amperios, y con menos frecuencia a amperajes mayores. Las diferencias entre las separaciones magnéticas en el rango de 1,30 a 1,70 amperios son generalmente poco significativas, y las fracciones contenidas en estos rangos están constituidas por granos minerales compuestos o con inclusiones.

Los incrementos en la intensidad de campo magnético deben ser de acuerdo con el objetivo del estudio. Para los minerales paramagnéticos, la intensidad del campo magnético se incrementa en pasos de 0,10 amperios hasta cubrir el rango de extracción total de la muestra.

Cuando la finalidad es la separación de circones, los incrementos en el campo magnético pueden ser de 0,3 amperios hasta que alcance la configuración más alta de 1,70 amperios, salvo cuando contienen inclusiones o variaciones en su composición química, ya que estos factores alteran su rango de extracción.

Los productos finales deben luego transferirse a frascos, etiquetarse y así quedan listos para análisis.



Figura 4.54: A) Conducto por donde deslizan los granos y embudo de alimentación. B) Controlador de vibración. C) Ajuste de inclinación longitudinal. D) Hojas de papel para chequear si hay saltación de partículas. E) Ajuste de pendiente lateral. F) Fuente de alimentación de corriente.

4.6 RECOMENDACIONES

A continuación, se discuten algunas consideraciones que influyeron en los procesos utilizados en este estudio.

Primeramente, la metodología de cuantificación de los minerales hecha a través de comparación visual es muy susceptible a errores, principalmente cuando los minerales se presentan en muy baja concentración.

La contaminación de las muestras por agentes externos es factible si no son tomados todos los cuidados necesarios durante el proceso de concentración. Fue encontrada en una de las muestras contaminación por carborundum, siendo este un material muy utilizado con otros fines en Laboratorio de Corte y Molienda de Facultad de Ciencias y también corroborado en MEB con el fragmento encontrado en la muestra Turmalinita Cerro la Tuna, donde se identifica un fragmento de color azul en la fracción diamagnética (Fig 4.11f). También fueron encontrados algunos fragmentos de viruta de acero, los cuales se suponen provenir de la trituradora de mandíbula; ya que este equipo es de difícil limpieza y puede aportar otros tipos de contaminación se debe redoblar los cuidados en su limpieza. Además, fueron encontradas concreciones de tamaños mayores a la malla de los tamices utilizados y micro-partículas de plásticos de formas muy variadas, y se considera que esta contaminación proviene de las cañerías del agua.

En el procesamiento de minerales en la mesa Wilfley se debe considerar las formas y variaciones de tamaño de los minerales, ya que estos factores influyen en la separación juntamente con la densidad.

La fracción diamagnética perteneciente a la muestra P13 fue tratada con LST a fin de diferenciar los minerales densos. A pesar de que los minerales fueron lavados tres veces con agua destilada al final del proceso, el mapeo global en MEB se vio alterado por restos del líquido denso.

Se sugiere la utilización de al menos 500 g de muestra tamizada a fin de obtener resultados representativos. También el implemento de frotis en la metodología para facilitar la identificación de los minerales, ya que esta es la etapa más extensa.

Las guías presentadas acá no sustituyen a los manuales de los equipos.

5 CONCLUSIONES

Las principales conclusiones obtenidas en este trabajo son las siguientes:

- Como resultado del análisis de las muestras fueron encontrados los siguientes minerales accesorios densos:
 - 1) Turmalinita Cerro La Tuna: magnetita, ilmenita, rutilo y apatito;
 - 2) Esquisto La Micaela: magnetita, ilmenita, turmalina y granates;
 - 3) Granito P13: magnetita, estilpnomelano, granates, monacita, apatito, circón y otro óxido de hierro.
 - 4) Granito P34: magnetita, turmalina, circón, pirita, titanita y otro óxido de hierro.
- La contaminación de la muestra en los procesos de reducción y concentración de minerales es factible de suceder en cualquiera de sus etapas, los cuales comprometerían los resultados de los análisis; siendo así, se deben tomar todas las precauciones a fin de evitarla.
- La utilización de la mesa vibratoria Wilfley es el proceso de mayor complejidad dentro de las técnicas presentadas en este trabajo. Lograr que su configuración sea acertada requiere de práctica y experiencia. Además, su operación requiere atención, revisión y ajustes frecuentes del operador. En contrapartida, la utilización del Separador Isodinámico Frantz es relativamente más dócil, y los cuidados en su operación son los establecidos en las guías de buena práctica.
- La identificación de los minerales con la lupa es una etapa extensa y propensa a equivocación. Los minerales se presentan mayormente fragmentados, e identificar y diferenciarlos entre sí puede ser laborioso.
- Los procesos utilizados en ese estudio se mostraron eficaces para la concentración de minerales, principalmente en los casos donde existe contraste entre las propiedades físicas y magnéticas de los minerales que componen la muestra.

6 BIBLIOGRAFÍA

- Arizona Laserchron Center, (2018). [online] Disponible en: <https://www.youtube.com/channel/UCyU44cZbgd_wLHuDX0WW7uQ>
- Basei M.A.S., Siga Jr O., Masquelin H., Harara O.M., Reis Neto J.M. & Preciozzi F. (2000): The Dom Feliciano Belt (Brazil–Uruguay) and its foreland (Rio de la Plata Craton): Framework, Tectonic Evolution and Correlations with similar terranes of Southwestern Africa. In: Cordani U, Thomaz F & Milani E (eds). Precambrian Evolution of South America. Intern. Geological Congress, IUGS, Rio de Janeiro.
- Bossi J., (2010). Cabalgaduras cámbricas en el sub terreno Cuchilla Dionisio (Uruguay). In: 6o Congreso Uruguayo de Geología, Minas, Uruguay. Actas CD-rom.
- Bossi J. y Campal N. (1992). Magmatismo y tectónica transcurrente durante el Paleozoico inferior del Uruguay. Gutiérrez, J., Saavedra, J., and Rábano, I., eds., Paleozoico Inferior de Ibero-América: Alicante, Universidad de Extremadura, p. 343–356.
- Bossi J., Ferrando L., Montaña J., Campal N., Morales H., Gancio F., Schipilov A., Piñeyro D. & Sprechmann P. (1998). Carta Geológica del Uruguay, Escala 1/500.000. Versión 1.0 Digital. Ed, Geoeditores S.R,L. Facultad de Agronomía.
- Bossi J. & Gaucher C. (2004). The Cuchilla Dionisio Terrane, Uruguay; an allochthonous block accreted in the Cambrian to SW Gondwana; Gondwana Research, 7 (3): 661-674.
- Bossi J., Schipilov A., (2000). Rocas ígneas básicas del Uruguay Volumen II Facultad de Agronomía. Montevideo, Uruguay.
- Burt R. (1984). Gravity Concentration Technology. Elsevier, New York, p. 340.
- Burt R. (1988). A review of gravity concentration techniques for processing fines. Production and Processing of Fine Particles, 375–385.
- Chisholm E., Sircombe K., DiBugnara D. (2014). Handbook of Geochronology Mineral Separation Laboratory Techniques.
- Corfu F., Hanchar J., Hoskin P., Kinny P. (2003). Atlas of zircon textures. In: Hanchar, J.M., Hoskin, P.W.O. (Eds.), Zircon: Reviews in Mineralogy and Geochemistry, vol. 53. Mineralogical Society of America, pp. 469–500.
- Fragoso Cesar, A.R.S. (1980). O Cráton do rio de La Plata e o Cinturão Dom Feliciano no Escudo Uruguaio-Sul-Riograndense. XXXI Congresso Brasileiro de Geologia, v.5, p.2879-2892 (Camboriú).
- Gaucher C., Bossi J., Frei R., Remus M., Piñeyro D. (2014). Terreno Cuchilla Dionisio: bloque septentrional. In: Bossi, J., Gaucher, C. (Eds.) Geología del Uruguay. Tomo 1: Predevónico. Polo, Montevideo, pp. 377-400.
- Gaucher C., Frimmel H.E., Germs G.J.B. (2011). Tectonic Events and Palaeogeographic Evolution of Southwestern Gondwana in the Neoproterozoic and Cambrian. En: Gaucher, C., Sial, A.N., Halverson, G.P., Frimmel, H.E. (Eds): Neoproterozoic-Cambrian Tectonics.

- Han K., Fuerstenau M. (2009). Principles of Mineral Processing. Society for Mining, Metallurgy and Exploration Incorporated.
- Hueck M., Oyhantçabal P., Philipp R., Basei M. and Siegesmund S., (2018). The Dom Feliciano Belt in Southern Brazil and Uruguay. *Regional Geology Reviews*, pp.267-302.
- Imhmed S. (2012). Application Of Magnetic Susceptibility Measurements To Oilfield Scale Management.
- Mange M., Wright D. (2008). Heavy minerals in use. Amsterdam. Elsevier.
- Mange-Rajetzky M. (1995). Subdivision and correlation of monotonous sandstone sequences using high resolution heavy mineral analysis, a case study: the Triassic of the Central Graben. In: Dunay, R.E., Hailwood, E.A. (Eds.), *Non-Biostratigraphical Methods of Dating and Correlation*, vol. 89. Geological Society of London Special Publication, pp. 23–30.
- Masquelin, H. (2002). A evolução estrutural e metamórfica do Terreno Punta del Este - Sudoeste Uruguaio. Tese de doutorado. Instituto de Geociências-UFRGS, 350 pp.
- Masquelin H. (2006). El Escudo Uruguayo. In: M. Ubilla and G. Veroslavsky (eds) *Cuencas Sedimentarias de Uruguay, geología, paleontología y recursos minerales: Paleozoico*. Montevideo, Uruguay: DIRAC, Fac. Ciencias. 3. 37-106.
- Oyhantçabal P., Siegesmund S., Wemmer K., Frei R., Layer P. (2007). Post-collisional transition from calc-alkaline to alkaline magmatism during transcurrent deformation in the southernmost Dom Feliciano Belt (Braziliano–Pan-African, Uruguay). *Lithos* 98:141–159
- Oyhantçabal P., Siegesmund S., Wemmer K., Presnyakov S., Layer P. (2009). Geochronological constraints on the evolution of the southern Dom Feliciano Belt (Uruguay). *J Geol Soc* 166:1075–1084
- Peel E. (2012). Petrografia, Geoquímica e geocronologia do Complexo Paso del Dragón Nordeste do Uruguai, implicações geotectônicas da evolução do Cinturão Dom Feliciano. Tese de doutoramento, Instituto de Geociências, Universidade de Sao Paulo.
- Peel E., Fort S., Viera B., de Armas I., Testoni P., Muzio R. (2020). Geochemical Features of Neoproterozoic Magmatism from NE of Uruguay (Dom Feliciano Belt). *White Iron Conferences*,.
- Peel E., Muzio R., Basei M.A.S. (2015). U-Pb zircon ages and Sr-Nd isotopic composition of Neoproterozoic magmatism, Dionisio-Sierra de los Ríos block, NE Uruguay. *Goldschmidt Conference*.
- Peel E., Sánchez Bettucci L., Basei M.A.S. (2018). Geology and geochronology of Paso del Dragón Complex (northeastern Uruguay): Implications on the evolution of the Dom Feliciano Belt (Western Gondwana). *Journal of South American Earth Sciences*, v.85, p.250-262.
- Porada H. (1979). The Damara-Ribeira orogen of the Pan-African-Brasiliano Cycle in Namibia (Southwest Africa) and Brazil as interpreted in terms of continental collision. *Tectonophysics*, v.57, p. 237-265.

- Preciozzi F., Spoturno J., Heinzen W., Rossi P. (1985). Carta Geológica del Uruguay a escala 1:500.000, Dirección Nacional de Minería y Geología, pp. 92.
- Preciozzi F., Masquelin H., Basei M.A.S. (1999). The namaqua/grenville terrane of eastern Uruguay. In: 2nd South American Symposium on Isotope Geology, Argentina, p. 338–340.
- Ramos R., Koester, E., (2014). Geologia da associação metamórfica-ultramáfica da região de Arroio Grande, sudeste do Escudo Sul-Rio-Grandense. *Pesqui. em Geociencias* 41 (1), 25–38.
- Rosenblum S., Brownfield I., (2000). Magnetic susceptibilities of minerals. Open-File Report,.
- Sánchez Bettucci L., Peel E., Oyhantçabal P. (2010). Precambrian geotectonic units of the Río de La Plata cráton. *International Geology Review*, v.52: 1, p. 32-50.
- Singh R., Bhattacharyya K., Maulik S. (1997). Gravity concentration of fines and ultrafines.
- Sivamohan R., & Forssberg E. (1985). Principles of tabling. *International Journal Of Mineral Processing*, 15(4), 281-295.
- Strong T., Driscoll R. (2016). A process for reducing rocks and concentrating heavy minerals.
- Svoboda J. (2004). *Magnetic Techniques For The Treatment Of Materials*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Tarling D., Hrouda F. (1993). *The Magnetic Anisotropy Of Rocks*. London: Chapman and Hall.
- Will T. M., Frimmel H.E., Gaucher C., Bossi J. (2014). Geochemical and isotopic composition of Pan-African metabasalts from southwestern Gondwana: Evidence of Cretaceous South Atlantic opening along a Neoproterozoic back-arc.
- Will T., Höhn S., Frimmel H., Gaucher C., le Roux P., Macey P. (2020). Petrological, geochemical and isotopic data of Neoproterozoic rock units from Uruguay and South Africa: Correlation of basement terranes across the South Atlantic. *Gondwana Research*, 80, pp.12-32.
- Wills B., Napier-Munn T. (2006). *Wills' mineral processing technology*. Oxford: Butterworth-Heinemann.