



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

**REVALIDACIÓN DE DOS DIFERENTES
TÉCNICAS DE SEPARACIÓN DE
ZIRCONES PARA OBTENER EDADES
DE ROCAS POR EL MÉTODO U-Pb**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
LICENCIADO EN CIENCIAS DE
LA TIERRA**

PRESENTA

DAVID DÍAZ ROCHA

DIRECTOR DE TESIS

**ING. JOSÉ TEODORO
HERNÁNDEZ TREVIÑO**



México, CDMX, 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

“La naturaleza es prodiga en historias. Historias evolutivas, historias geológicas, historias siderales, del micro al macrocosmos y de regreso”

(Cesar Carrillo Trueba)

“La simplicidad es la máxima sofisticación”

(Leonardo Da Vinci)

“El principio básico de los estudios geoquímicos es la pulcritud”

(José Teodoro Hernández Treviño)



Agradecimientos:

A mi familia, que siempre me apoya sin importar que. Soy muy afortunado por tenerlos.

Al LUGIS del IGF de la UNAM, y a todo su personal, todos son unas mentes brillantes y son un orgullo para la universidad y el país.

A mis sinodales, gracias por todas sus correcciones, su tiempo y su paciencia para conmigo y este trabajo.

Sobre todo, gracias a José Teodoro Hernández Treviño, “Teo”, tu ingenio e inventiva son gigantescos y están atrás de este trabajo. Lo único más grande en ti, es tu corazón. Gracias por ayudarme en mis momentos difíciles.

Índice

	<u>Pag.</u>
Índice de Figuras	1
Índice de Tablas	6
Resumen	7
Capítulo 1. Introducción	8
1.1 Generalidades	8
1.2 Objetivos	11
Capítulo 2. Marco teórico	12
2.1 Geoquímica isotópica	12
2.2 Geocronología	15
2.3 Edades relativas y absolutas	16
2.4 Obtención de edades absolutas	18
2.5 Separación de minerales	22
2.6 Propiedades físicas y químicas de los zircones	23
2.7 Datación de zircones por el método U-Pb por LA ICP-MS	26
Capítulo 3. Marco experimental	32
3.1 Metodología	32
3.2 Hipótesis	33
Capítulo 4. Zona de estudio	33
4.1 Tronco de Totoltepec	33
4.2 Mapa de la zona	36
Capítulo 5. Trabajo de campo	38
5.1 Colecta de muestras	38

Capítulo 6. Trabajo de laboratorio	40
6.1 Descripción macroscópica y petrográfica de las muestras	40
6.2 Preparación de concentrados de Minerales Pesados	48
6.3 Separación de zircones por mesa Wilfley	48
6.3a Quebrado y Trituración de la muestra	49
6.3b Tamizado de la muestra	52
6.3c Mesa Wilfley	55
6.3d Separador magnética	60
6.3e Separación por densidad en Líquidos Pesados	62
6.3f Concentrado de zircones por separación manual utilizando microscopio estereoscópico con sistema de luz de doble polarización.	68
6.4 Teoría del método de separación de zircones por decantación	71
6.4a Antecedentes	71
6.4b Quebrado y Trituración de la muestra	72
6.4c Tamizado de la muestra	72
6.4d Separación de minerales por densidad	74
6.4e Separación de minerales pesados por bateo	75
6.4f Concentrado de zircones por separación manual utilizando microscopio estereoscópico con sistema de luz de doble polarización.	78
6.5 Obtención de edades por método U-Pb	80
Capítulo 7. Resultados	81
7.1 Cantidad y tamaño de zircones obtenidos con cada método	81
7.2 Edades obtenidas para la muestra TD1703 con cada método	83
7.3 Comparación de las edades obtenidas con método	87
Capítulo 8. Discusión	87

Capítulo 9. Conclusiones	88
9.1 Ventajas y desventajas del método por mesa Wilfley	90
9.2 Ventajas y desventajas del método por decantación	91
9.3 Recomendaciones	92
Bibliografía y Referencias	93
Anexos	99
Anexo 1	99
Anexo 2	101
Anexo 3	103
Anexo 4	107

Índice de Figuras.

	<u>Pág.</u>
1 Tabla de nucleídos mostrando todos los isótopos conocidos coloreados por sus distintas propiedades en relación con su número de protones y de neutrones	13
2 Curva de desintegración radioactiva	21
3 Clasificación tipológica de Zircones en escala geotermométrica (Pupin, 1980)	25
4 Cadenas radioactivas de los isótopos inestables ^{238}U , ^{235}U , y ^{232}Th con sus respectivos productos de decaimiento intermedios y finales	28
5 Diagrama de concordia para los sistemas isotópicos $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ y $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ para un caso hipotético	31
6 Mapa del área de estudio	36
7 Columna estratigráfica del área de estudio	37
8 Recolección de muestras a) Conjunto de tamices o cribas para separar una muestra de roca granulada (No. 20, 40, 60, 80, 100 y 120). b) Tamizadora mecánica maraca Tyler Ro-Tap®	39
9 Muestra TD1701. Muestra de mano	40
10 Muestra TD1701. Fotomicrografías de textura y minerales representativos	41-42
11 Muestra TD1702. Muestra de mano	42

12	Muestra TD1702. Fotomicrografías de textura y minerales representativos	43-44
13	Diagrama ternario Streckeisen (QAFP) para la clasificación de rocas ígneas	45
14	Muestra TD1703. Muestra de mano	46
15	Muestra TD1703. Fotomicrografías de textura y minerales representativos	47
16	Diagrama ternario Folk (QFL) para la clasificación de areniscas	48
17	Diagrama de las etapas del método de separación de zircones por mesa Wilfley	49
18	Equipo usado para el descoste y quebrado de muestras de roca	49
19	a) Prensa Hidráulica de 50 ton. b) Detalle de disco de acero	50
20	a) Disco de acero templado siendo limpiado con cepillo de cerdas metálicas. b) Equipo montado	51
21	a), b) y c) Secuencia de imágenes donde se puede observar como la muestra es quebrada, fragmentada y finalmente granulada y pulverizada. d) . Muestra pulverizada siendo pasada por el colador de 3mm de abertura	51-52
22	a) Tamices con la muestra (No. 20, 40, 60, 80, 100 y 120). b) Tamizado centrifugo	54
23	Baño de ultrasonido usado para limpiar los tamices	54
24	Vista en microscopio (0.67X) de los tamices	54-55
25	Esquema de la mesa Wilfley y su funcionamiento	57

26	a) Equipo usado para la separación con mesa Wilfley y Alimentador por vibración marca Syntron®. b) Nivel para determinar el ángulo de inclinación de la mesa.	58
27	Equipo de mesa Wilfley siendo lavado	59
28	Mesa Wilfley trabajando	59
29	a) Muestras secándose con la lámpara de lámpara de luz infrarroja. b) Muestras Secas y clasificadas dentro de las cajas petri	60
30	Susceptibilidades magnéticas de minerales comunes para el separador magnético isodinámico Frantz	61
31	a) Proceso de separación de fracciones ferromagnéticas usando el imán y la bolsa plástica. b) Bolsa conteniendo la fracción magnética	62
32	Esquema de la separación de minerales por líquidos pesados a), b) y c) Secuencia de imágenes donde se puede observar como la muestra es quebrada, fragmentada y finalmente pulverizada	65
33	Preparación de la solución de politungstato de Sodio Muestra pulverizada siendo pasada por el colador	66
34	Probeta y densímetro de flotación usado para determinar la densidad de la solución politungstato de sodio	66
35	a) Separación de minerales en proceso por líquidos pesados. b) Fracciones pesadas y ligeras separadas por el politungstato de sodio	67
36	Cajas de petri conteniendo la fracción pesada y ligera de una fracción de la muestra TD1702 (Cuarzo-diorita)	68

37	Equipo utilizado en la separación por Hand Picking	69
38	a) Cristal zircón (Señalado con un círculo rojo. b) Concentrado de zircones correspondiente a la muestra TD1701, Wilfley 7	70
39	Colecta de zircones usando una pipeta y una caja petri de 40mm	70
40	Zircones de la muestra TD1701, Wilfley 7	70
41	Zircones de la muestra TD1702. a) Tamiz:100, Wilfley:5. b) Wilfley 7	71
42	Zircones de la muestra TD1703. a) Tamiz:120, Wilfley:5. b) Wilfley 7.	71
43	Diagrama de las etapas de la metodología de separación de zircones por decantación	72
44	a) ejemplos de coladores de plástico usados para tamizar y tamaño de abertura de malla. b) Apertura de trama(φ) igual a 0.6mm = 600 μm	73
45	Tamizado de muestra usando coladores de plástico	73
46	Esquema del proceso de separación de las fases pesadas y ligeras	74
47	Esquema del proceso de separación de minerales pesados por decantación	76
48	Proceso de Decantación para la muestra TD1702 (Cuarzo-diorita)	77
49	Movimiento realizado para concentrar los zircones en el centro de la caja petri	78
50	Zircones de la muestra TD1701	79

51	Zircones de la muestra TD1702	79
52	Zircones de la muestra TD1703	80
53	Ejemplo de zircones de la muestra TD1703 (arcosa lítica) montados en resina epóxica para datación por el método de U-Pb mediante LA ICP-MS	81
54	Gráfica de tamaños representativos de zircones de cada muestra obtenidos por ambos métodos de separación	82
55	Gráfica de los tamaños promedio de los zircones de cada muestra obtenidos por ambos métodos de separación	83
56	Diagrama de concordia $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ y $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ de los zircones obtenidos por el método de mesa Wilfley de la muestra TD1703	84
57	Gráfica de distribución de edades contra número de zircones fechados para el método de mesa Wilfley de la muestra TD1703	84
58	Diagrama de concordia $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ y $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ de los zircones obtenidos por el método de decantación de la muestra TD1703	85
59	Gráfica de distribución de edades contra número de zircones fechados para el método de decantación de la muestra TD1703 (Arcosa-Lítica) de la unidad Piedra Hueca	85

Índice de Tablas

	<u>Pag.</u>
1 Principales propiedades físicas de los zircones.	24
2 Principales propiedades ópticas de los zircones (bajo microscopio de luz polarizada)	24
3 Tipo de rocas encontradas en el plutón de Totoltepec según el carácter ácido de su composición, y su edad	34
4 Relación entre las texturas y el tamaño de roca necesario para el proceso de molienda	38
5 Descripción de muestras y coordenadas geográficas de sitios de muestreo	39
6 Pesos obtenidos para cada muestra	40
7 Clasificación de tamices por su número, su abertura en mm y el tamaño de sedimentos que pueden separar	52-53
8 Líquidos pesados comúnmente usados y sus densidades	63
9 Tabla de cantidades de zircones para cada método de separación	81
10 Tabla de tamaños (Eje más largo) representativos para cada método de separación	81
11 Tabla de edades obtenidas con cada método de separación para la muestra TD1703 (Arcosa-Lítica) de la unidad Piedra Hueca.	87

Resumen

En la presente tesis se evaluaron dos métodos de separación de minerales pesados para comparar sus características y corroborar su efectividad en la obtención de zircones para análisis geocronológicos por el método de U-Pb. El primero de los métodos se fundamenta en el uso de la mesa de concentración Wilfley. Debido a su extensa aplicación, este método se ha estandarizado para la separación de minerales pesados como el zircón. El segundo método se fundamenta en técnicas de decantación y el uso de bateo tipo gambusino de la muestra mediante una capsula de porcelana. Las características que se comparan entre ambos métodos son el tiempo de trabajo requerido, la cantidad y volumen de los cristales obtenidos, la instrumentación utilizada, la pulcritud, el riesgo de contaminación de la muestra, los resultados de los estudios geocronológicos, y el impacto ambiental por gasto de agua. Para tal objetivo se colectaron dos muestras de rocas ígneas del plutón de Totoltepec y una roca sedimentaria de la unidad Piedra Hueca.

Se realizó la separación de zircones de cada muestra aplicando ambos métodos de separación. Los zircones de la muestra de roca sedimentaria perteneciente a la unidad Piedra Hueca fueron fechados por el método de U-Pb para obtener tanto la edad de los zircones como la edad máxima de sedimentación. Se observó que el tiempo de trabajo con el método de separación por decantación es menor en un 69% que el método de separación por mesa Wilfley. La cantidad de agua que se utiliza en el método de decantación se reduce en un 99% en comparación con el método por mesa Wilfley. Se observó que la cantidad de zircones obtenidos por el método por mesa Wilfley fue mayor en un 30% más que por el método por decantación. Los cristales individuales de zircón obtenidos por mesa Wilfley tienen un volumen mayor en promedio que los volúmenes de los cristales obtenidos por decantación. Por su parte, los zircones obtenidos con el método por decantación presentan una mayor variedad en tamaños. Esto quiere decir que parte de la muestra se perdió al usar la mesa Wilfley. En cuanto a la forma de los zircones no se observaron diferencias significativas. El método por mesa Wilfley representa un riesgo mayor de contaminación de los concentrados minerales.

Las edades de los dos eventos intrusivos que originaron las rocas del tronco de Totoltepec están representadas dentro del rango de edades obtenidas para los zircones detríticos de la

muestra de roca sedimentaria. Sin embargo, la edad más representada dentro de la población es más antigua. Esto se debe a que parte del material detrítico proviene de otras fuentes además del plutón de Totoltepec. Las edades obtenidas, tanto de la edad de deposición como la edad de los zircones detríticos de la muestra separados con ambos métodos de separación coinciden estadísticamente entre sí. Por lo anterior se concluye que ambos métodos resultaron igualmente efectivos para obtener zircones para hacer dataciones por el método U-Pb.

Capítulo 1. Introducción

1.1 Generalidades

En la actualidad los estudios geocronológicos son cada vez más requeridos tanto en el ámbito científico para la datación de eventos geológicos, como en la industria minera para la determinación de edades de mineralización y búsqueda de yacimientos (Tosdal et al., 1999; Pereyra, 2003, Schaaf, 2011;). Las técnicas más precisas para obtener edades absolutas de rocas en la actualidad son las que se basan en la medición de cantidades de isótopos de elementos radioactivos de ocurrencia natural y la dinámica del decaimiento radioactivo, proceso en el que se transforman de isótopos inestables a estables (Allègre, 2008).

Se le llama cadena radioactiva al conjunto de las diferentes etapas en las cuales una cierta cantidad de isótopos inestables ceden energía y se transforman progresivamente en isótopos estables, ya sea del mismo elemento o de elementos distintos con un número atómico menor. Cuando estas cadenas son usadas para realizar dataciones se les llama “geocronómetros”. Los geocronómetros más usados son los sistemas U-Th-Pb (Uranio, Torio, Plomo), Rb-Sr (Rubidio, Estroncio), K-Ar (Potasio, Argón), Ar-Ar (Argón-Argón), Sm-Nd (Samarium, Neodimio) y Lu-Hf (Lutecio-Hafnio). (Allègre, 2008).

Actualmente el método de datación por U-Pb es el más utilizado en estudios de geocronología debido a su versatilidad para obtener edades absolutas de eventos y procesos de formación de rocas ígneas y metamórficas. Para rocas sedimentarias se obtienen edades máximas de sedimentación (Allègre, 2008; Meza, 2010). Los alcances analíticos del método por U-Pb permiten obtener edades absolutas de alrededor de 4500 Ma (edad aproximada de la Tierra)

(Wilde et al., 2001; Allègre, 2008) hasta pocos millones de años. Cabe mencionar que la edad aproximada de la formación del sistema solar (~4560 Ma) se obtuvo usando isótopos de plomo ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$) vs ($^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$), también conocido como método Pb-Pb sobre material meteorítico (Bouvier y Wadhwa, 2010; Meza, 2010), edades similares se han obtenido con los sistemas Rb-Sr, Sm-Nd y K-Ar.

Los métodos de fechamiento han ido evolucionando y mejorando continuamente tanto en sus técnicas analíticas como en sus protocolos de tratamiento de muestras. (Geyh y Schleicher, 1990; Schaaf, 2011). El método de U-Pb es uno de los que presenta más cambios significativos al implementarse los equipos de ICP-MS (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry) con sistemas de ablación láser para el tratamiento de muestras. Esta mejora deriva en los equipos LA-ICP-MS (Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry) que son muy usados en estudios geocronológicos (Allègre, 2008; Scott y Gauthier, 1996; Schaaf, 2011). Anteriormente era común el uso de Espectrómetros de Masas de Ionización Térmica o TIMS (Thermal Ionization Mass Spectrometry) para estudios de geocronología en zircones. Aunque su uso se ha reducido con el tiempo, las edades absolutas obtenidas por este equipo son más exactas y precisas, con error de aprox. 0.1%. (Allègre., 2008; Schaaf, 2011). La técnica actual más precisa para fechamientos por el método U-Pb actualmente es la que se utiliza Ablación química para ionización térmica o CA-TIMS (Chemical Ablation – TIMS) sobre zircones de rocas magmáticas sin núcleos heredados (Mattinson, 2005).

Los minerales más comunes para la obtención de edades por el sistema U-Th-Pb son el zircón y la monacita (Davis et al., 2003), esto se debe a las propiedades físicas y químicas de estos minerales como son su resistencia ante el intemperismo físico y químico, así como su capacidad de retener elementos traza como el U, Th y Pb en su estructura cristalina (Finch y Hancher, 2003; Solari et al., 2014). Para estudios de geocronología en zircones, las técnicas analíticas que utilizan equipos de última generación como son el SHRIMP™ (Sensitive High Resolution Ion Microprobe), el Triton™ Multicollector - TIMS o el Neptune Plus™ Multicollector - LA-ICP-MS requieren de una cantidad relativamente baja de cristales para poder realizar dataciones. Por ejemplo: Se requiere un mínimo de 50 cristales para edades de cristalización de rocas ígneas y meta-ígneas. En rocas sedimentarias y meta-sedimentarias se

requiere un mínimo de 50 a 150 cristales para edades máximas de sedimentación. (Schaaf, 2011; Hernández et al., 2012; Ortega-Obregón et al., 2014). En el caso de los análisis por TIMS, usando el método de ionización térmica, es posible obtener la edad de cristalización de una roca ígnea con una cantidad de 10 a 15 zircones. (Scott y Gauthier, 1996; Lowenstern et al., 2000; Allègre., 2008; Schaaf, 2011). En México los equipos usados para hacer análisis de geocronología en zircones son LA-ICP-MS y TIMS (Schaaf, 2011; Solari y Tanner, 2011). Las técnicas analíticas mencionadas requieren concentrados minerales separados con absoluta pulcritud, esto quiere decir que los concentrados no contengan minerales ajenos a la muestra que se analiza. La pulcritud de los concentrados es un aspecto importante que se tiene que considerar para evitar errores en las edades obtenidas.

El tiempo de separación también es un factor importante porque los equipos modernos pueden analizar varias muestras en períodos de tiempo relativamente cortos. (Geyh y Schleicher, 1990; Meza 2010; Strong y Driscoll, 2016).

Existen diferentes técnicas y metodologías de separación mineral, usadas tanto en campos de ciencia como de la ingeniería de minas (Kelly y Spottiswood, 1990). El método más usado para separar y concentrar cristales de zircón se fundamenta en el uso de la mesa separadora Wilfley, el separador magnético Frantz® y la separación por densidad mediante líquidos pesados (Chisholm et al., 2014; Strong y Driscoll, 2016). Para realizar una separación de minerales pesados que sea eficiente y pulcra, usando el método por mesa Wilfley, se debe seguir un proceso riguroso de descontaminación del equipo de trituración, separación y sus instalaciones (Hernández et al., 2012; Strong y Driscoll, 2016). El flujo de agua que se requiere para el uso de la mesa Wilfley es de 6 a 12 litros por minuto y el tiempo promedio mínimo para efectuar la separación que es de una a tres horas.

Otro método de separación de minerales pesados por densidad que es eficiente para obtener minerales pesados como cristales de zircón, se basa en la aplicación de la técnica manual de decantación por bateo. Este método es similar a las técnicas utilizadas por los gambusinos del siglo XIX para obtener metales preciosos. En el presente trabajo de tesis se referirá a este método como método por decantación.

Para poder realizar estudios geocronológicos más eficientes y confiables de isotopía en zircones, es necesario el desarrollo de técnicas de separación mineral que garanticen la pulcritud de los concentrados minerales. A sí mismo se debe considerar la mejora de los tiempos de separación, el rendimiento costo-espacio y la reducción del impacto al medio ambiente.

1.2 Objetivos

1. Utilizar el *método de separación de minerales pesados por mesa Wilfley* y el *método de separación por decantación* para obtener concentrados de zircones de tres diferentes muestras de roca con el fin de comparar las características de ambos métodos y determinar sus ventajas, desventajas y alcances. La característica que se compararán entre los dos métodos serán las siguientes:

- El tiempo invertido en cada método.
- La capacidad de separación y concentración en cuanto a formas cristalinas y tamaños de los zircones separados.
- La pulcritud de los concentrados de zircones que se usaran para estudios de geocronología por el método de U-Pb.
- El impacto ambiental de cada método relativo al volumen de agua y el uso de material desechable.

2. También se pretende presentar el método por decantación como una técnica confiable que puede ser usada en estudios que requieran las ventajas que de ella se demuestren. Supliendo en tales casos al método por mesa Wilfley, separador magnético Frantz y líquidos pesados.

3. Realizar análisis geocronológicos sobre una roca sedimentaria de la unidad Piedra Hueca (muestra TD1703) para obtener su edad máxima de deposición y las edades de sus zircones detríticos. Las edades se obtendrán por el método de U-Pb y se compararán entre sí los resultados obtenidos para los zircones separados por cada método. A su vez, estas edades se compararán con las edades obtenidas en estudios anteriores para determinar si existen diferencias significativas entre ambos métodos.

Capítulo 2. Marco teórico

2.1 Geoquímica isotópica.

La Geoquímica es definida como la ciencia que estudia el origen, la distribución y la evolución de los elementos químicos contenidos en los minerales formadores de las rocas y en los productos derivados de ellas, así como en la biosfera, la hidrosfera y la atmósfera. Por su parte la Geoquímica Isotópica es la ciencia que estudia a los diversos isótopos de elementos contenidos en la Tierra. Los isótopos o nucleídos son de ocurrencia natural y pueden ser estables o inestables. Los isótopos inestables se utilizan para obtener edades absolutas, así como reconstruir el proceso de diferenciación de la corteza y el manto terrestres, mientras que los isótopos estables aportan información acerca de los procesos de fraccionamiento de los sistemas geológicos o biológicos (Geyh y Schleicher, 1990).

Principios de la geocronología:

El fenómeno de decaimiento radiactivo o radioactividad fue descubierto a finales del siglo XIX por Henri Becquerel. La teoría que describe este fenómeno fue publicada desde principios del siglo XX por Marie y Pierre Curie junto al propio Becquerel. Sus estudios en este campo les merecieron a los tres el premio nobel física en 1903. (Faure y Mensing, 2005; Allègre, 2008). La radioactividad es el fenómeno por el cual isótopos inestables radiactivos se transforman en isótopos estables radiogénicos mediante la emisión de partículas subatómicas (radiación o decaimiento radioactivo). Los isótopos que entran en un proceso de decaimiento también se conocen como radionucleidos o radioisótopos. Se le llama decaimiento debido a que los radionucleidos pierden masa y energía hasta alcanzar la estabilidad. De todos los nucleídos conocidos hasta ahora (aprox. 2500) solo 270 son estables (Faure y Mensing, 2005) (Figura 1).

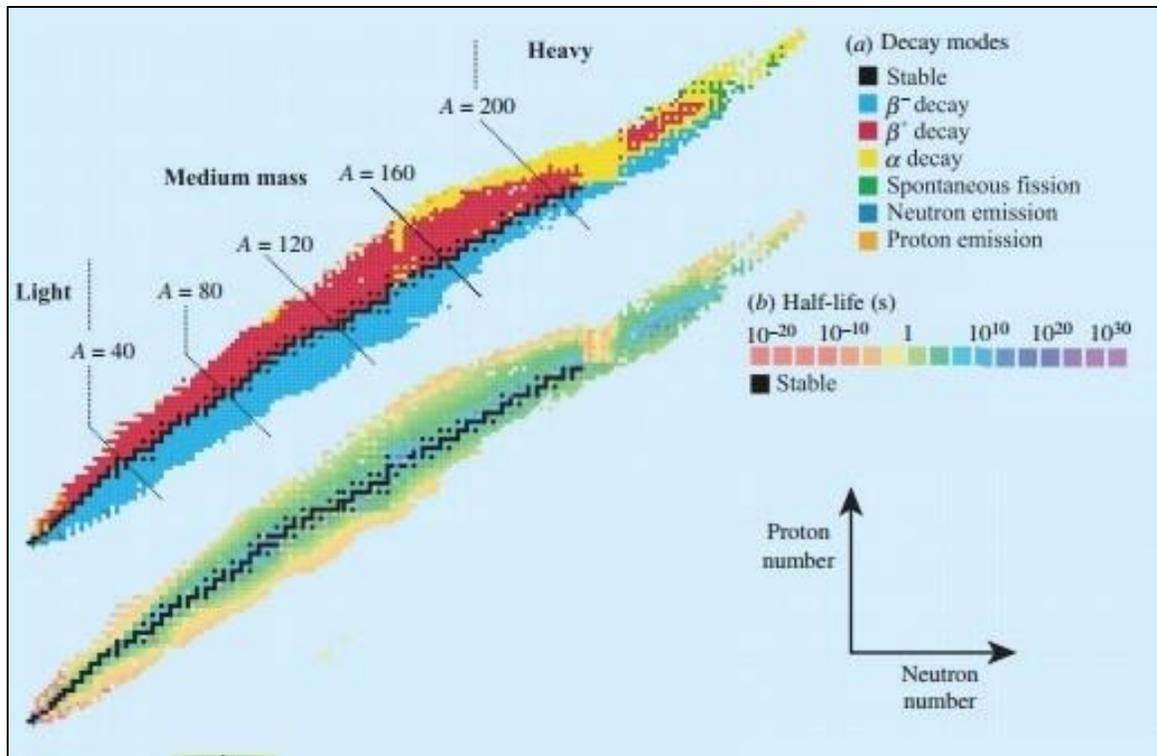


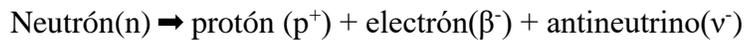
Figura 1. Tabla de nucleídos mostrando todos los isótopos conocidos coloreados por sus distintas propiedades en relación con su número de protones y de neutrones. (a) Modo de decaimiento. (b) Vida media de desintegración (Modificada de: Simpson y Shelly, 2017).

El decaimiento radioactivo se da de manera aleatoria pero exponencial, por lo que solo puede definirse para poblaciones de radionúclidos. La vida media de un isótopo inestable es el periodo durante el cual la mitad del material decaerá para transformarse en otro isótopo más estable. La proporción entre el isótopo radioactivo (Isótopo padre) y su producto de decaimiento (Isótopo hijo) varía de manera predecible. Este es el fundamento de la datación basada en la medición de relaciones isotópicas. Al compararse la proporción de isótopos padres y la de isótopos hijos, y al conocerse la tasa de decaimiento, se puede calcular el tiempo que ha pasado desde que inició el decaimiento hasta el momento de la medición.

Existen varias formas en la que un radionucleido puede decaer. Algunos pueden hacerlo de dos o tres formas distintas pero lo más común es lo que hagan de una sola forma. Como resultado, existirán cambios en el número de protones (N) y el número de neutrones (Z). Se han descubierto 4 tipos distintos de decaimiento que se resumen a continuación:

Decaimiento beta negativo (β^-)

Se dan en isótopos con exceso de neutrones. Uno de los neutrones en exceso se fragmenta en un electrón y un protón. El núcleo inestable emite de forma espontánea una partícula β^- (electrón). Para satisfacer la ley de la conservación de la masa y energía, la emisión del electrón es acompañada por la emisión de un antineutrino, que comparte el momento y la energía del decaimiento.

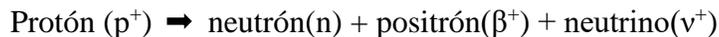


Para compensar el nuevo estado de carga positiva del átomo, éste captura un electrón. Como resultado, el isótopo padre se transforma en un isótopo hijo de otro elemento con mayor número atómico, pero igual número de neutrones (Isobaro).



Decaimiento beta positivo (β^+)

Se da en isótopos con carencia de neutrones. Uno de los protones en exceso se fragmenta en un neutrón y un positrón o partícula β^+ (partícula igual al electrón, pero con carga positiva).

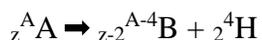


Para satisfacer la ley de la conservación de la masa y energía, la emisión del positrón es acompañada por la emisión del neutrino producido por la fragmentación del protón. Como resultado, el isótopo padre se transforma en un isótopo hijo de otro elemento con menor número atómico, pero igual número de neutrones.



Decaimiento alfa (α)

Se da en isótopos con carencia de neutrones y con $Z > 58$. El núcleo inestable emite un núcleo de helio ${}_2^4\text{H}$ (Ion H^+), calor y energía. Como resultado, el isótopo padre se transforma en un isótopo hijo de otro elemento con menor número atómico y menor número de neutrones.



Fisión espontanea e inducida.

La fisión de átomos es una reacción que inicia cuando sus neutrones adquieren una cantidad de energía suficiente. Como resultado de la reacción se producen dos isótopos de distinta masa. Los isótopos productos de la fisión se dan en series de parejas. Por ejemplo, un átomo de uranio puede dividirse en un núcleo de Kriptón acompañado de un núcleo de Xenón; o en un núcleo de Bromo acompañado de un núcleo de Yodo.

La fisión también produce la emisión de varios neutrones, rayos gamma (γ) y otras partículas nucleares. La reacción completa produce una gran cantidad de energía (aprox. 200 MeV por fisión de un solo átomo). La fisión espontánea ocurre para isótopos de elementos muy densos. La fisión inducida se produce al bombardear los isótopos con neutrones, protones, partículas α , rayos γ o rayos x. La energía liberada por un proceso de fisión inducida es aprovechada en los reactores de plantas eléctricas nucleares (Faure y Mensing, 2005; Allègre, 2008).

Radiación gamma (γ)

Es una clase de radiación electromagnética de alta frecuencia (10^{19} Hz) relacionada a fotones de alta energía. Esta clase de radiación es producida por isótopos inestables como una forma de liberar energía. Acompaña a la emisión de partículas alfa o beta, y por lo tanto está relacionada con dichos procesos de decaimiento. La exposición directa a la radiación gama puede tener afectaciones sobre organismos vivos en sus tejidos y células (Lawson, 1999).

2.2 Geocronología

La geocronología es definida como la rama de la geología relacionada con la datación de las formaciones rocosas y eventos geológicos. (Oxford University Press. 2007). Más ampliamente, se puede definir a la geocronología como una subdisciplina de la geoquímica, la cual se encarga de la obtención de edades (relativas o absolutas) de la materia que compone a la geosfera, incluyendo a los meteoritos y la materia orgánica. Por lo tanto, el objeto de estudio de la geocronología puede incluir tanto a eventos arqueológicos, como geológicos en general. Con base en las relaciones de edad y características de la materia de la litosfera, se

puede hacer dataciones de eventos involucrados en la formación o transformación de dicha materia. Como ejemplos de estos eventos están la cristalización de rocas ígneas a partir de un magma preexistente, el comienzo y la tasa de sedimentación de una roca sedimentaria, el proceso de metamorfismo de un protolito, diversos eventos tectónicos (subducción, fallamiento, vulcanismo, formación de orogenia, etc.) o el impacto de un asteroide. Los estudios de geocronología solo pueden realizarse sobre la materia que pueda ser directa o indirectamente observada y manipulada. Esto reduce los objetos de estudio de geocronología actual a las rocas, minerales, materia orgánica y meteoritos que pueden encontrarse en la corteza terrestre (Zeuner, 1952; Allègre, 2008). La geocronología trabaja principalmente con las propiedades físicas y químicas de los materiales que estudia., siendo las químicas las más importantes para obtener edades absolutas. Existen minerales que contienen ciertos elementos químicos que debido a su naturaleza como radionucleidos son ideales para usarse en análisis geocronológicos. Las rocas poseen una composición mineral variable y no todos los minerales contienen elementos necesarios para un análisis de geocronología. Por lo tanto, aquellos minerales que si contienen dichos elementos deben ser separados. (Strong y Driscoll, 2016). Para este propósito se cuenta con una variedad de técnicas y de equipos especializados.

2.3 Edades relativas y absolutas

Edades Relativas. Son las edades que se obtienen mediante la comparación con otros eventos ocurridos antes y/o después del evento que se busca datar. Así pues, las edades relativas no son cifras absolutas en unidades de tiempo, sino que son rangos de tiempo o de eventos entre los cuales se ubica un suceso estudiado. (Pereyra, 2003). Los métodos más usados para obtener este tipo de edades son la litoestratigrafía (o estratigrafía) y la bioestratigrafía. (Geyh y Schleicher, 1990). En los inicios de la geología las cartas de tiempo geológico se construían solo con base en edades relativas. Cuando se argumentaba que algún evento se dio en un periodo de tiempo determinado (ej. Cámbrico, Jurásico, carbonífero, etc.) se refería a que dicho evento sucedió entre un periodo más viejo y otro más joven. Sin embargo, existía incertidumbre acerca de las edades expresadas en unidades de tiempo. La edad de la tierra era un tema de debate y las discusiones sobre estas cuestiones no se resolvieron hasta el siglo XX gracias al descubrimiento y desarrollo de la radioactividad (Allègre., 2008).

Las edades relativas se obtienen mediante los principios de la litoestratigrafía y la construcción de columnas estratigráficas en la que los eventos geológicos inferidos se acomodan cronológicamente de abajo (los más antiguos) hacia arriba (los más recientes) (Pereyra, 2003). Los principios que se usan para la litoestratigrafía fueron establecidos por el anatomista y geólogo holandés Niels Stensen (Latinizado como Nicolaus Steno y Castellanzado como Nicolás Steno) a mediados del siglo XVII en Italia. En estos principios se enuncian las leyes que se deben de seguir para la construcción de columnas estratigráficas con base a las observaciones de los afloramientos observados en campo. Sus tres principales postulados se resumen a continuación: **El Principio de superposición** que establece que una secuencia de sedimentos sigue un arreglo secuencial temporal donde los estratos más jóvenes se depositan sobre los más viejos. Por lo que mientras más abajo se encuentre un estrato dentro de la secuencia será más viejo que los estratos que se hallan sobre de él; **El Principio de horizontalidad original** que establece que los estratos se depositan progresivamente de manera horizontal por lo que cualquier alteración observada en una secuencia sedimentaria se debe a fenómenos posteriores a la formación de dicha secuencia y **El principio de relación de corte** que establece que si un cuerpo o discontinuidad atraviesa cortando a algún estrato rocoso, este tuvo que haberse formado después que el estrato al que corta (Koutsoukos, 2005; Pereyra, 2003).

Edades Absolutas: Son las edades medidas en unidades de tiempo de las rocas y eventos geológicos desde su origen hasta la medición. (Pereyra, 2003). Los estudios geocronológicos más precisos y desarrollados para obtener edades absolutas se basan en el estudio y medición del decaimiento de isótopos radioactivos contenidos en ciertos minerales y son realizados en laboratorios de geoquímica isotópica (Allègre, 2008). Para que un estudio de geoquímica isotópica sea confiable, es de vital importancia que los concentrados de minerales sean pulcros, es decir, que estén no contaminados por agentes externos, esto con el fin de evitar errores en los análisis de los componentes químicos de los minerales (Schaaf, 2011; Hernández et al., 2012).

2.4 Obtención de edades absolutas.

Los principios de fechamiento absoluto fueron desarrollados por Bertram Boltwood a principios del siglo XX mientras estudiaba el uranio radiactivo y el plomo radiogénico presentes en alnas rocas. Observó que la relación de cantidad de ambos elementos era similar para rocas con edades similares. Con base en sus observaciones hizo una estimación de la tasa decaimiento de uranio y calculó el tiempo en que comenzó el proceso de decaimiento. La tasa de decaimiento de un isótopo inestable es proporcional al número de átomos (N) presentes en un tiempo (t), tal que:

$$(1) \quad -\frac{dN}{dt} = \lambda N$$

Donde N es el número de átomos radioactivos presentes. El símbolo negativo (-) se usa debido a que la cantidad de átomos padre decrece con el paso del tiempo. λ es una constante de decaimiento que representa la probabilidad de que un átomo decaiga dentro de un intervalo de tiempo dado. El valor de esta constante es característico para cada isótopo. La expresión λN también es conocida como tasa de decaimiento.

Reacomodando los términos en (1) e integrando se obtiene:

$$-\int \frac{dN}{N} = \lambda \int dt$$

$$(2) \quad -\ln N = \lambda t + C$$

Donde $\ln N$ es el logaritmo base e de N y C es la constante de integración, tal que:

$$(3) \quad C = -\ln N_0$$

Donde N_0 es la cantidad de átomos radiactivos en un tiempo inicial (t_0).

Po lo tanto, sustituyendo (3) en (2):

$$(4) \quad -\ln N = \lambda t - \ln N_0$$

Despejando N de (4) obtenemos:

$$(5) \quad N = N_0 e^{-\lambda t}$$

Esta es la ecuación básica que describe cualquier proceso radioactivo y muestra que el número de átomos radioactivos decrece exponencialmente con el tiempo. La constante de decaimiento (λ) de un radionucleido está relacionada con su vida media ($T_{1/2}$). La vida media es el tiempo requerido para que la mitad de un número dado de átomos de un radionúclido decaiga. Tomando $t=T_{1/2}$, $N=1/2N_0$ y sustituyendo en (5):

$$\frac{1}{2}N_0 = N_0^{-\lambda T_{1/2}}$$

Despejando $T_{1/2}$, Se obtiene:

$$(6) \quad T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

Esta ecuación describe la relación entre la vida media de un radionúclido y su constante de decaimiento. Generalmente el número de núcleos radioactivos decae en proporción de 2 a 1 con los radiogénicos después de cada vida media. Para obtener la cantidad de núcleos radiogénicos producto del decaimiento se utiliza la siguiente ecuación:

$$(7) \quad D = N_0 - N$$

Donde D (*Daughter*) representa la cantidad de núcleos radiogénicos asumiendo que el decaimiento se dio en un sistema cerrado, es decir, sin pérdida de átomos radioactivos ni radiogénicos. Para determinar D en función del tiempo (t) y N_0 , se sustituye la ecuación (5) en (7), tal que:

$$(8) \quad D = N_0(1 - e^{-\lambda t})$$

Esta ecuación describe a D en función del tiempo (t) y de la cantidad de núcleos radiogénicos (D) en un tiempo inicial (N_0). Se puede observar que el decaimiento se da de forma exponencial (Figura 2). Para describir a D en función de núcleos radioactivos presentes cualquier instante (N) se utiliza la siguiente ecuación: Se despeja N_0 de la ecuación (5) y se sustituye en (7), tal que:

$$(9) \quad D = N(e^{-\lambda t} - 1)$$

Para determinar el número total de núcleos radiogénicos (D) en función la cantidad inicial en un instante $t=0$ (D_0), y la cantidad final (D) se usa:

$$(10) \quad D = D_0 + D$$

Para determinar D en función del tiempo (t) y D_0 , se sustituye la ecuación (9) en (10), tal que:

$$(11) \quad D = D_0 + N(e^{-\lambda t} - 1)$$

Con esta ecuación se puede determinar la edad isotópica de en función de la cantidad de núcleos radioactivos (N) y radiogénicos (D y D_0). Despejando a t de (11) se obtiene:

$$(12) \quad t = \frac{1}{\lambda} \ln \left[\frac{D-D_0}{N} + 1 \right]$$

Esta ecuación es fundamental para obtener edades isotópicas gracias a que D y N pueden ser medidos mediante espectrometría de masas sobre la muestra. El valor D_0 puede ser asumido o determinado de muestras de la misma edad. Para relacionar la ecuación anterior (10) con la vida media de un núcleo inestable (6) se usa la siguiente ecuación:

Debido a que: $T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$, entonces:

$$(13) \quad t = \frac{T_{1/2}}{\ln 2} \ln \left[\frac{D-D_0}{N} + 1 \right]$$

Usando la ecuación anterior se puede construir la siguiente gráfica (Figura 2):

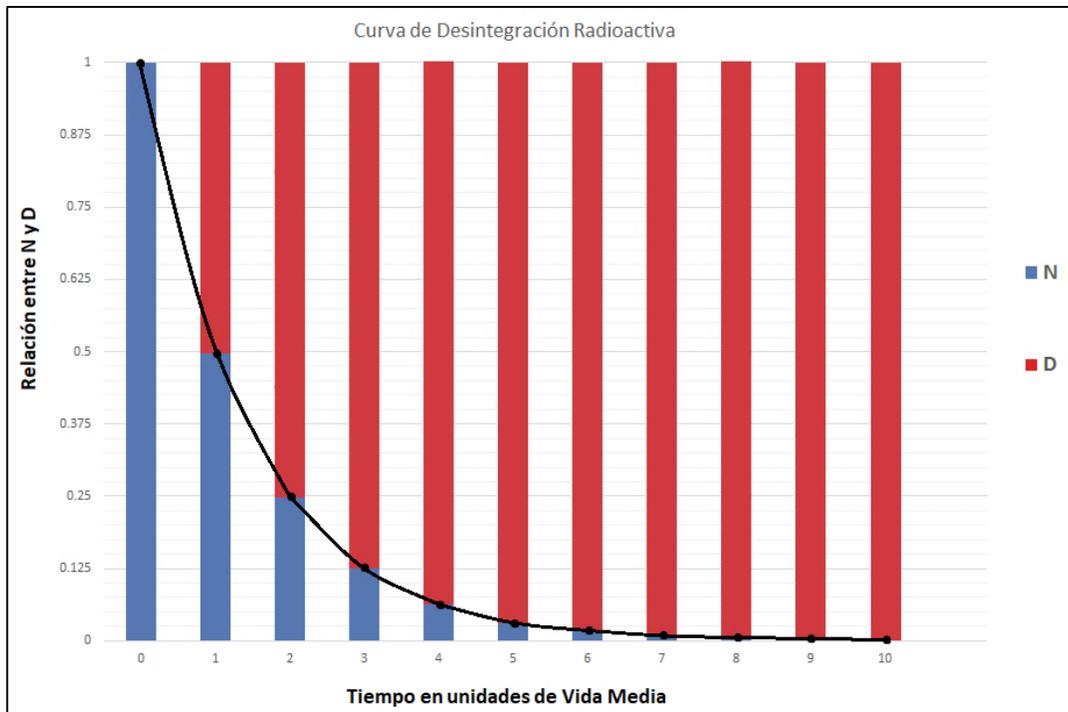


Figura 2. Curva de desintegración radioactiva. Muestra la relación en cantidades de núcleos radioactivos (**N**) y la formación del núcleo radiogénicos (**D**) dentro de un proceso de decaimiento relacionado respecto al tiempo en unidades de vida media. Se observa que el decaimiento es exponencial respecto al tiempo. Después de cada periodo de vida media la mitad de los núcleos radioactivos se transforma en núcleos radiogénicos y así sucesivamente.

Para obtener una edad isotópica confiable se deben satisfacer las condiciones siguientes:

- El sistema debe estar cerrado, es decir, que no existe pérdida ni ganancia de núcleos radioactivos ni radiogénicos en la muestra.
- Las mediciones de D y de N deben ser representativas de la muestra.
- El valor de D_0 , ya sea asumido o calculado, debe ser confiable.
- El valor de λ debe ser conocido y confiable.
- **La muestra que se va a fechar no debe estar contaminada y debe contener los isótopos adecuados en su composición mineral. Esto requiere que el tratamiento previo al análisis isotópico sea lo más pulcro posible.**
- El equipo e instalaciones de laboratorio deben estar bien adaptadas e igualmente descontaminadas. Para isotopía se deben usar criterios de química ultrapura.

La temperatura en el que un mineral no intercambia isótopos con el medio se llama temperatura de cierre, en este punto los isótopos quedan integrados (atrapados) dentro de la estructura mineral y la relación en cantidad de isótopos padres e hijos no cambia dentro del mismo a partir de entonces. Si el mineral es sometido a temperaturas más altas que la temperatura de cierre, este abre nuevamente su sistema isotópico liberando isótopos estables e inestables que retenía. Si un mineral se enfría debajo de la temperatura de cierre nuevamente entonces se puede obtener la edad de la recristalización. Este tipo de procesos es común en rocas metamórficas. Así mismo, en procesos metamórficos, las edades obtenidas de distintos minerales de una misma roca pueden ser distintas ya que corresponden a edades de los distintos procesos a los que fue sometido el protofito. Considerando lo anterior, para obtener una edad geocronológica confiable se debe seleccionar adecuadamente los minerales en relación con el evento que se desea datar y el método isotópico a usarse.

Existen diferentes sistemas isotópicos para fechar rocas, pero el que se considerará en el presente trabajo es el de U-Pb.

- Sistema Uranio-Torio-Plomo (U – Th – Pb): Este es el método con el que puede fechar material con edades mayores a las del sistema solar (meteoritos) hasta pocos millones de años. Junto con el método Sm-Nd es el geocronómetro más usado para fechar todo tipo de rocas. El método U-Pb en zircones es el método usado en la presente tesis, por lo que se abundará sobre el más adelante (Capítulo 2.8). Otros sistemas isotópicos usados comúnmente para geocronología son: Rubidio-Estroncio ($^{87}\text{Rb} - ^{87}\text{Sr}$), Potasio-Argón y Argón - Argón ($^{40}\text{K} - ^{40}\text{Ar}$, $^{39}\text{Ar} - ^{40}\text{Ar}$), Samario-Neodimio ($^{147}\text{Sm} - ^{143}\text{Nd}$), Lutecio-Hafnio ($^{176}\text{Lu} - ^{176}\text{Hf}$) y trazas de fisión de Apatito (Faure y Mensing, 2005; Hernández et al., 2012).

2.5 Separación de minerales.

La separación de minerales es una actividad que se desarrolla junto con la cultura humana y sirvió para separar y obtener materiales para la fabricación de herramientas o por su valor ornamental como el hierro, el oro, la plata o el cobre. Las técnicas de separación de minerales actualmente son utilizadas en disciplinas de las Ciencias de la Tierra, en particular en Geoquímica. Los minerales de interés para estudios de geocronología deben ser separados del resto de componentes de la muestra de roca.

Para separar minerales básicamente se debe fragmentar la muestra de roca hasta que sus componentes minerales sean disgregados individualmente. Posteriormente, se utilizan una serie de técnicas que aprovechan ciertas propiedades físicas de los minerales como su morfología, susceptibilidad magnética y propiedades ópticas. Es poco frecuente el aprovechamiento de las propiedades químicas como en el caso de la metalurgia extractiva. En todo caso se busca la eliminación de la masa de minerales que no son de interés, llamados material de desecho o “ganga” en el caso de la industria minera (Kelly y Spottiswood, 1990; Strong y Driscoll, 2016).

El proceso de separación de minerales comprende la primera etapa de un estudio geocronológico y es de vital importancia que se realice correcta y pulcramente. Un mal tratamiento puede generar problemas como pérdida de muestra o contaminación que afecten los análisis. Aunque existen varios métodos de separación mineral, se puede decir que todos siguen tres operaciones básicas que son: la reducción de tamaño, la separación y el posterior tratamiento del producto deseado y del desecho. El proceso de reducción de tamaño de la roca dependerá del tamaño de partícula buscada y se clasifica como trituración o molienda. En esta etapa se utilizan herramientas como mazos, molinos, prensas hidráulicas, etc., para fragmentar la roca.

Para separar una mezcla de sólidos se usan procesos de cribado, concentración, separación magnética etc. (Para el caso de fases sólidas y líquidas se usan procesos de sedimentación, filtración, centrifugado, flotación o evaporación). Idealmente, un proceso de separación aprovecha una sola propiedad de los minerales que se desea obtener. Sin embargo, en la práctica, debido a la complejidad y diversidad de los minerales en una muestra, es común que se utilice más de un tratamiento. Existe también el criterio económico, en donde se argumenta que un procesamiento mineral solo debe hacerse si el producto que se obtendrá producirá un beneficio económico mayor al invertido, donde se incluye la extracción, procesamiento, transporte y venta (Kelly y Spottiswood, 1990)

2.6 Propiedades físicas y químicas de los zircones.

Los zircones ($ZrSiO_4$) pertenecen al grupo de los nesosilicatos (también llamados ortosilicatos) que se encuentran como minerales accesorios en la mayoría de las rocas ígneas y en algunas rocas metamórficas, en forma de cristales microscópicos.

Cuando son suficientemente grandes son usados como gemas. Existen minerales similares al zircón en estructura cristalina (isoestructurales). Minerales como la scheelita (CaWO_4), monazita (CePO_4), rutilo (TiO_2) y granate ($\text{X}_3\text{Y}_2(\text{SiO}_4)_3$) poseen características similares a los zircones. En la mayoría de los casos los zircones componen menos del 1% del total de la masa de las rocas. También suele encontrarse como componente detrítico en rocas sedimentarias. A continuación, se enlistan las principales propiedades físicas y ópticas bajo microscopio de luz polarizada de los zircones (Tablas 1 y 2).

Formula	Zr(SiO ₄)
Densidad	4.6 - 4.7 g/cm ³
Hábito	Tabular o Prismático
Lustre	Vítreo
Transparencia	De translucido a opaco
Color	Translucido, amarillo, rojo, pardo, verde, negro
Raya	Blanca
Dureza (En escala de Mohs)	7.5
Fractura	Concoidal

Tabla 1. Principales propiedades físicas de los zircones.

Relieve	Alto
Pleocroísmo	Bajo-Débil
Birrefringencia (δ)	0.055 (Alta)
Macla	Raramente en {111}
Índices de refracción	$n_{\omega} = 1.925 - 1.961$ $n_{\varepsilon} = 1.980 - 2.015$
Figura óptica	Uniaxial (+)
Raya	Blanca
Clivaje	Poco en {110} {111}

Tabla 2. Principales propiedades ópticas de los zircones (bajo microscopio de luz polarizada).

Los zircones pertenecen al sistema cristalino tetragonal, grupo espacial es $I4_1/amd$. Ambos cationes (Zr^{4+} y Si^{4+}) ocupan posiciones simetría 42m con cuatro moléculas de $\text{Zr}(\text{SiO}_4)$ en cada celda unitaria cuyo volumen calculado es de 261.13 \AA^3 . Los cristales de zircón poseen formas de prismas tabulares o tetragonales – bipiramidales. La forma cristalina varía principalmente por las condiciones de alcalinidad y de temperatura del magma fuente. La alcalinidad (Relación $\text{Al}/(\text{Na}+\text{K})$) controla el desarrollo de pirámides mientras que la temperatura controla el desarrollo de prismas (Figura 3). (Finch y Hanchar, 2003; Allègre, 2008; Mindat.org, 2016).

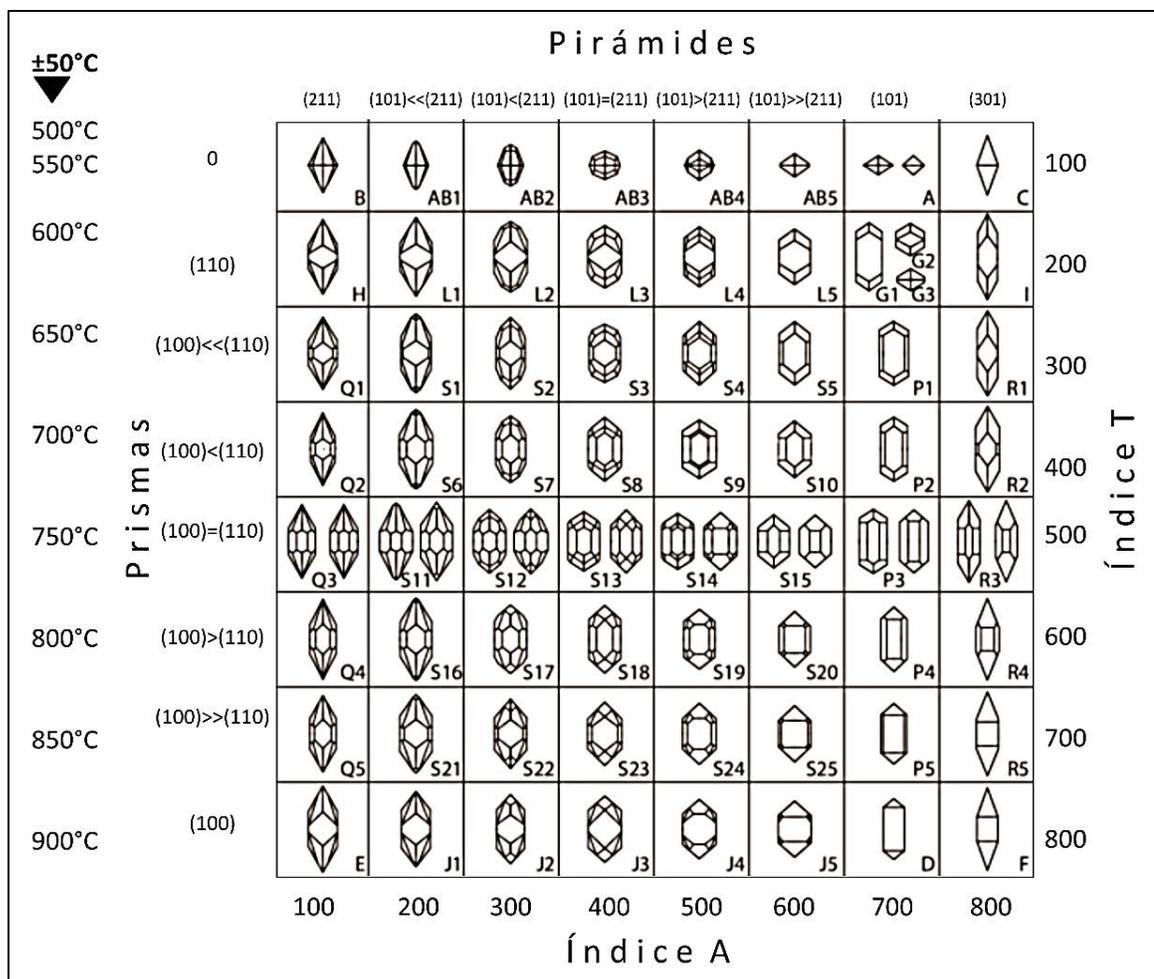


Figura 3. Clasificación tipológica de zircones en escala geotermométrica. Índice A corresponde a la relación Al/(Na+K). Índice T corresponde a la escala de temperatura (Modificada de: Pupin, 1980).

En geoquímica isotópica, el zircón es usado para la datación de las rocas que lo contienen. Para esto se usan isótopos radiactivos de U y Th, y Pb radiogénico que usualmente están contenidos dentro de los cristales de zircón como elementos traza dentro de su estructura cristalina. La capacidad de retener dichos elementos traza se debe a los espacios intersticiales que existen entre las moléculas de ZrO_8 y de SiO_4 . El U, Th o Pb (en forma de iones) quedan atrapados en dichos espacios intersticiales gracias a las fuerzas intermoleculares presentes. La estructura cristalina del zircón permite incorporar iones sin que exista un esfuerzo estructural excesivo. Los zircones son ideales para obtener edades de cristalización por métodos isotópicos de U-Th-Pb y U-Th ya que cristalizan en temperaturas que varían entre 1660 y 2700°C por lo que son poco susceptibles a recristalización (Watson, 2007). Gracias a esto, su composición química puede mantenerse prácticamente sin cambios a lo largo del

tiempo, siendo afectada solo por el decaimiento de los isótopos inestables. La alta dureza de los zircones les confiere una gran resistencia a los diferentes procesos de intemperismo, erosión, sedimentación y metamorfismo. El Uranio y el Torio contenidos en el zircón decaen naturalmente y se transforman en plomo radiogénico (Finch y Hanchar, 2003; Meza, 2010).

2.7 Datación de zircones por el método U-Pb por LA ICP-MS

La utilización de un sistema de ablación láser (LA – Laser Ablation) acoplado a un espectrómetro de masas de acoplamiento inductivo (ICP-MS – Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry) comenzó a finales de los años 80 del siglo XX. Este método permite medir la relación de isótopos en minerales accesorios como los zircones. Así como microanálisis de elemento mayores, traza y tierras raras en minerales, vidrios, rocas e inclusiones fluidas (Jackson et al., 1992; Meza, 2010). La muestra es ionizada en un plasma de argón inducido por un campo eléctrico de alta frecuencia. Este plasma se encuentra a una temperatura de 10,000 K aproximadamente, lo que permite ionizar una gran variedad de elementos. El elemento se separa por la acción del láser de alta frecuencia ($\lambda=193\text{nm}$) que sublima los componentes químicos de la muestra. El gas obtenido se introduce en el plasma de argón donde se ioniza. Los iones producidos entran en el espectrómetro de masas, separando así los iones en función de su relación de masa y carga (Jackson et al., 1992; Allègre, 2008). Para obtener la edad de cristalización de minerales o eventos ígneos se analizan entre 30-40 puntos. Para obtener estadística de procedencia de sedimentos, o edades heredadas en rocas metasedimentarias se analizan más de 100 puntos (Solari et al. 2010; Leisen et al., 2015). Sus principales ventajas son la capacidad de analizar todos los elementos contenidos en una muestra sólida que tengan un potencial de ionización menor al del argón. La velocidad de análisis y su sensibilidad son mayores que otras técnicas de espectrometría. Posee una resolución espacial variable de entre 13 a 380 micrómetros lo que permite analizar minerales que presentan zonación. Esta técnica analítica permite obtener información relevante sobre la génesis de las rocas que contienen zircones como fases minerales accesorias incluso en aquellos que presentan una historia de cristalización compleja.

Para el uso de LA ICP-MS sobre zircones, se deben tener en cuenta factores como el fraccionamiento elemental de U y Pb y la posible contaminación por plomo ajeno a la muestra. (Jackson et al., 1992; Meza 2010).

Generalidades de los elementos U, Th y Pb.

El Uranio (U) es un actínido, su número atómico es 92 y sus números de valencia son +4 y +6. Su radio iónico es de 1.05 Å. En la naturaleza se le encuentra como elemento traza en varios minerales como el zircón o el apatito o reemplazando al torio en la torita (mineral raro de poca ocurrencia). También se encuentra en esta de oxidación tetravalente como U^{4+} formando el catión uranillo (UO_2^{2+}) el cual es soluble en agua por lo que su presencia es común en los océanos. Tiene 3 isótopos de ocurrencia natural: ^{234}U , ^{235}U y ^{238}U , todos ellos radioactivos.

El Torio (Th) también es un actínido, su número atómico es 90 y su número de valencia es +4. Su radio iónico es 1.10 Å, similar al del ion U^{4+} . En la naturaleza se le encuentra como elemento traza en varios minerales como el zircón o la monazita o como componente esencial de la torita. Se conocen 29 isótopos, los de ocurrencia natural son: ^{228}Th , ^{230}Th , ^{231}Th , ^{232}Th , y ^{234}Th . El más abundante es el ^{232}Th .

El plomo (Pb) es un metal pesado perteneciente (familia (IV)A), su número atómico es 82 y su número de valencia es +4. Su radio iónico varía de 1.19 a 1.29 Å. Posee cuatro isótopos de ocurrencia natural: ^{208}Pb , ^{207}Pb , ^{206}Pb , ^{204}Pb , todos ellos estables. En la naturaleza se le encuentra principalmente como componente esencial del mineral galena (PbS). También se encuentra en la composición de varios minerales como la cerusita o la piromorfita; o como elemento traza de varios minerales como el zircón o el apatito (Pereyra, 2003). El ^{208}Pb es producto del decaimiento del ^{232}Th , el ^{207}Pb es producto del ^{235}U , ^{206}Pb es producto del ^{238}U . Todos estos sistemas de decaimiento poseen productos de desintegración intermedios cuya vida media puede variar entre segundos y millones de años (Figura 4).

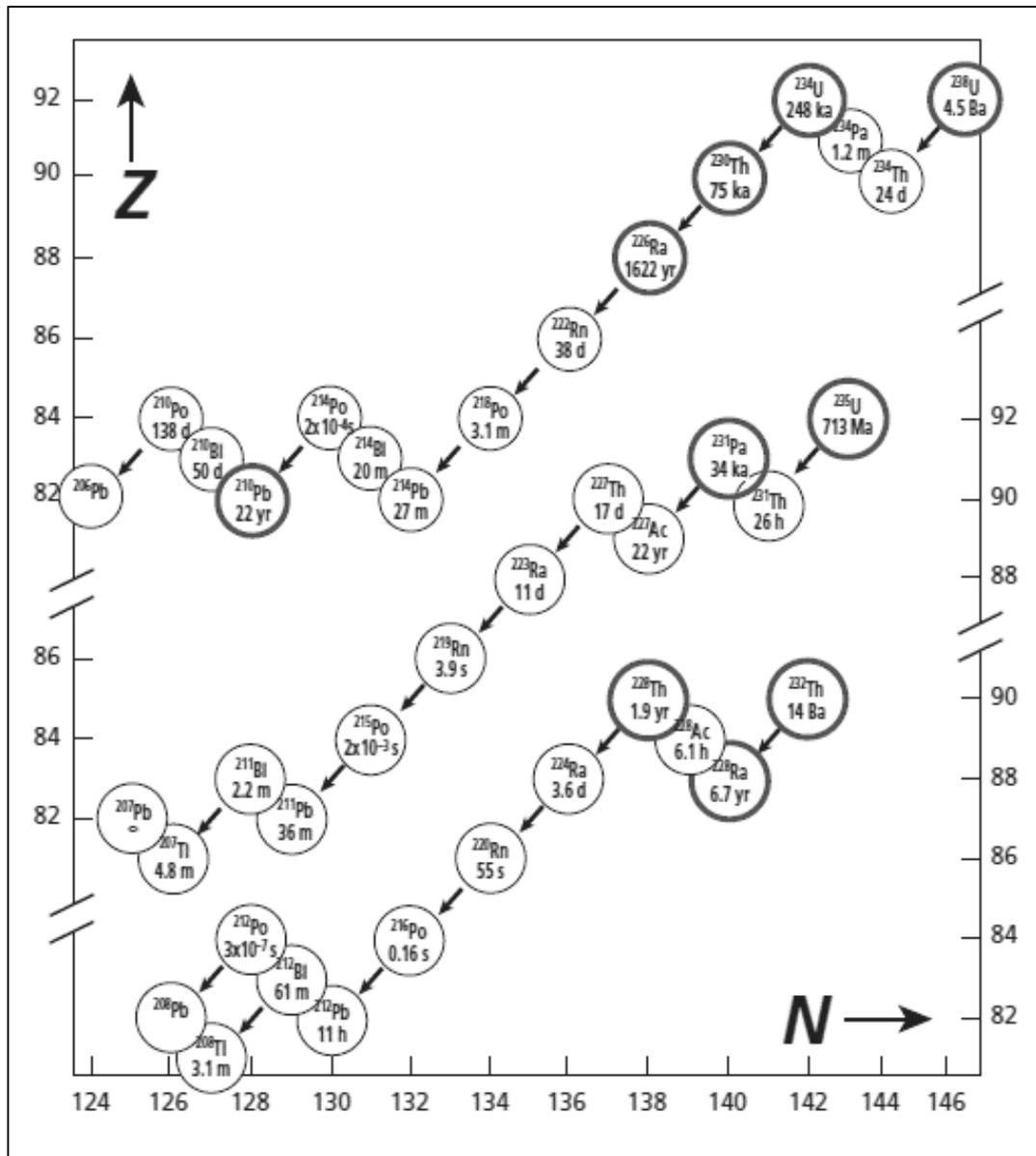


Figura 4. Cadenas radioactivas de los isótopos radioactivos ^{238}U , ^{235}U , y ^{232}Th con sus respectivos productos de decaimiento intermedios y finales. Abajo de cada isótopo aparece su vida media en distintas escalas de tiempo que van de segundos (s) a Billones de años (Ba). En la gráfica los isótopos están acomodados en función de su número de protones (Z) y su número de neutrones (N) (Tomada de: Allègre, 2008)

Método U-Th-Pb:

Este método es el más usado más para obtener edades de cristalización junto con el método Samario-Neodimio. Es el método con el que actualmente se puede fechar los eventos más antiguos con edades que varían desde 1 Ma hasta edades mayores a las del sistema solar.

Para esto se mide la abundancia de los isótopos en la muestra, después se usa la ecuación (9) para obtener la cantidad de núcleos radiogénicos (D) en función de los núcleos radioactivos presentes cualquier instante (N), podemos obtener la cantidad de plomo radiogénico en función de su isótopo padre para cada sistema:

$$(14) \quad {}^{206}\text{Pb} = {}^{238}\text{U}(e^{\lambda_{238}t} - 1)$$

$$(15) \quad {}^{207}\text{Pb} = {}^{235}\text{U}(e^{\lambda_{235}t} - 1)$$

$$(16) \quad {}^{208}\text{Pb} = {}^{232}\text{Th}(e^{\lambda_{232}t} - 1)$$

Para obtener la cantidad de plomo inicial (Pb_0) para cada sistema se deducen las siguientes funciones respecto a las anteriores.

$$(17) \quad {}^{206}\text{Pb} = {}^{206}\text{Pb}_0 + {}^{238}\text{U}(e^{\lambda_{238}t} - 1)$$

$$(18) \quad {}^{207}\text{Pb} = {}^{207}\text{Pb}_0 + {}^{235}\text{U}(e^{\lambda_{235}t} - 1)$$

$$(19) \quad {}^{208}\text{Pb} = {}^{208}\text{Pb}_0 + {}^{232}\text{Th}(e^{\lambda_{232}t} - 1)$$

Para obtener la relación isotópica de cada sistema se dividen las ecuaciones anteriores entre la cantidad de ${}^{204}\text{Pb}$, debido a que es un isótopo estable y su cantidad no varía con el tiempo.

Por lo tanto, se obtienen:

$$(20) \quad \left(\frac{{}^{206}\text{Pb}}{{}^{204}\text{Pb}}\right) = \left(\frac{{}^{206}\text{Pb}}{{}^{204}\text{Pb}}\right)_0 + \left(\frac{{}^{238}\text{U}}{{}^{204}\text{Pb}}\right)(e^{\lambda_{238}t} - 1)$$

$$(21) \quad \left(\frac{{}^{207}\text{Pb}}{{}^{204}\text{Pb}}\right) = \left(\frac{{}^{207}\text{Pb}}{{}^{204}\text{Pb}}\right)_0 + \left(\frac{{}^{235}\text{U}}{{}^{204}\text{Pb}}\right)(e^{\lambda_{235}t} - 1)$$

$$(22) \quad \left(\frac{{}^{208}\text{Pb}}{{}^{204}\text{Pb}}\right) = \left(\frac{{}^{208}\text{Pb}}{{}^{204}\text{Pb}}\right)_0 + \left(\frac{{}^{232}\text{Th}}{{}^{204}\text{Pb}}\right)(e^{\lambda_{232}t} - 1)$$

Usando esta relación se obtiene la edad isotópica para cada sistema despejando al tiempo t , de forma que:

$$(23) \quad t_{206} = \frac{1}{\lambda_{238}} \ln \left[\frac{\left(\frac{{}^{206}\text{Pb}}{{}^{204}\text{Pb}}\right) - \left(\frac{{}^{206}\text{Pb}}{{}^{204}\text{Pb}}\right)_0}{\left(\frac{{}^{238}\text{U}}{{}^{204}\text{Pb}}\right)} + 1 \right]$$

$$(24) \quad t_{207} = \frac{1}{\lambda_{235}} \ln \left[\frac{\left(\frac{{}^{207}\text{Pb}}{{}^{204}\text{Pb}}\right) - \left(\frac{{}^{207}\text{Pb}}{{}^{204}\text{Pb}}\right)_0}{\left(\frac{{}^{235}\text{U}}{{}^{204}\text{Pb}}\right)} + 1 \right]$$

$$(25) \quad t_{208} = \frac{1}{\lambda_{232}} \ln \left[\frac{\left(\frac{^{208}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}} \right) - \left(\frac{^{208}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}} \right)_0}{\left(\frac{^{232}\text{Th}}{^{204}\text{Pb}} \right)} + 1 \right]$$

Si el valor para t de cada sistema en una muestra es concordante, ese valor representa la edad de cristalización del mineral. El valor de Pb_0 puede estimarse de la composición isotópica al momento de la formación del mineral. En el caso de los zircones la medición de Pb_0 no es necesaria ya que no contienen valores significativos del mismo.

No siempre los minerales se comportan como sistemas cerrados, esto puede generar que exista pérdida o ganancia de núcleos radioactivos o radiogénicos dentro de su estructura. Para minimizar el efecto por la pérdida de Pb se utiliza la relación $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ también conocida como método Plomo-Plomo. La siguiente ecuación es desarrollada de las ecuaciones (20) y (21) y describe dicha relación.

$$(26) \quad \frac{\left(\frac{^{207}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}} \right) - \left(\frac{^{207}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}} \right)_0}{\left(\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}} \right) - \left(\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}} \right)_0} = \left(\frac{^{235}\text{U}}{^{238}\text{U}} \right) \left(\frac{e^{\lambda_{235}t} - 1}{e^{\lambda_{238}t} - 1} \right)$$

La relación $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ es constante y adimensional ($=1/137.88$), también es independiente del tiempo por lo que puede ser aplicada a cualquier tipo de material terrestre o extraterrestre que contenga los isótopos relacionados. Gracias a esto la edad obtenida con el método plomo-plomo puede ser obtenida sin conocer la concentración de U en el mineral, solo la de Pb es necesaria. La ecuación (26) es trascendental por lo que no puede resolverse para t . Por lo tanto, para obtener una edad mediante este método se usan tablas con valores de t respecto a la relación $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$. Una vez obtenidas las relaciones isotópicas en laboratorio se pueden calcular las edades isotópicas mediante un diagrama de concordia de Wetherill (Figura 5). Este diagrama representa de manera gráfica la evolución de dos sistemas isotópicos relacionados con respecto al tiempo. La curva generada se denomina curva de concordia y corresponde a los puntos con edades concordantes (cogénéticos) entre los dos sistemas, su curva corresponde a las diferencias en de vida media. En el momento en que cristaliza un zircón no contiene plomo radiogénico. Este momento está representado en el punto más alto de la curva de concordancia (punto de origen) que es la edad de cristalización del zircón.

Los puntos localizados desde este punto en la curva representan los momentos donde existe ganancia de Pb radiogénico. Si el sistema no se comporta como un sistema cerrado y hay pérdida de isótopos radioactivos o radiogénicos, se generan puntos fuera de la curva de concordia. La línea de tendencia entre estos puntos es denominada recta de discordia. En el sistema U-Th-Pb esto es generado más comúnmente por pérdida de Pb que puede darse por eventos de recristalización o alteración química. La recta de discordia intercepta a la curva de concordia en dos puntos. Comúnmente, el punto superior se interpreta como la edad de cristalización del mineral. El punto inferior se asocia a eventos de metamorfismo o pérdida Pb por procesos de recristalización. (Pereyra, 2003; Meza 2010).

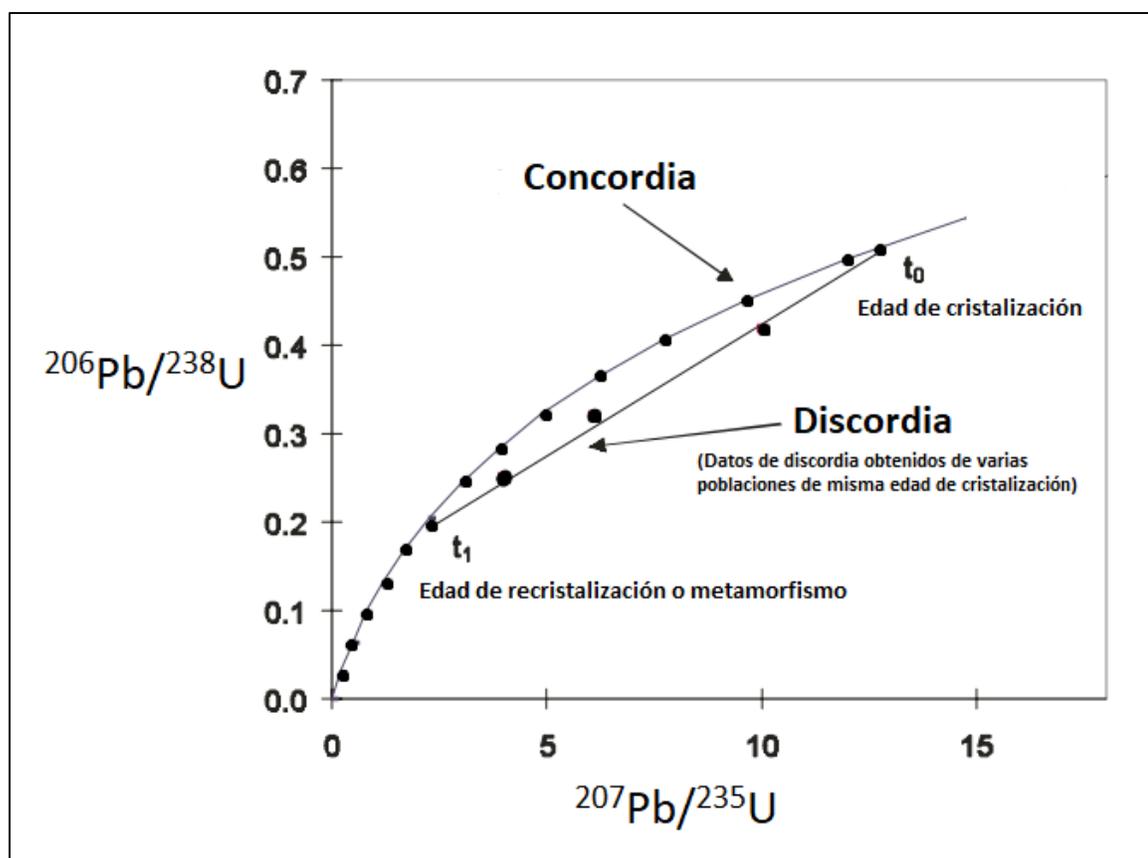


Figura 5. Diagrama de concordia para los sistemas isotópicos $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ y $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ para un caso hipotético. Los puntos en la gráfica representan los distintos valores de los sistemas medidos en laboratorio.

Capítulo 3. Marco experimental

3.1 Metodología

Se desarrolló el siguiente experimento de acuerdo con los objetivos de la presente tesis, los cuales son analizar las ventajas y las desventajas del método de separación de minerales pesados por mesa Wilfley y del método de separación por decantación.

Para comenzar se tomaron tres muestras de roca en campo. Dos de ellas son rocas ígneas provenientes del complejo plutónico llamado “Tronco de Totoltepec” y una roca sedimentaria proveniente de la unidad “Piedra Hueca”, Ambas unidades están en contacto entre sí. Se considera que ambas formaciones pertenecen al terreno Mixteco en el sureste del estado de Puebla, México. (Kirsch et al., 2013).

Se utilizaron ambos métodos de separación de minerales para obtener zircones de cada muestra de roca. Para analizar la efectividad de ambos métodos, se realizó una comparación de la cantidad de zircones obtenidos, sus características morfológicas y el tiempo de trabajo para cada método. Así mismo, se realizaron fechamientos por el método de U-Pb por LA ICP-MS en los zircones de la muestra de roca sedimentaria para observar si existen diferencias significativas entre las edades de los zircones obtenidos con ambos métodos. La razón de que se realice el análisis geo cronológico sobre la muestran sedimentaria únicamente, es que estas contienen material detrítico de varias procedencias, y las edades que se obtendrán serán diversas. La edad mínima, representada en un numero estadísticamente suficiente de zircones, se interpreta como la edad máxima de sedimentación. La coincidencia de las edades obtenidas para cada método también es usada como referencia para la validar la efectividad de los métodos de separación. Los zircones de las muestras del plutón no se fecharon debido a que dichas edades ya han sido obtenidas en estudios previos. Si los zircones detríticos de la roca sedimentaria tienen edades coincidentes con las edades conocidas del plutón, entonces se deduce que una parte del material detrítico de la roca sedimentaria proviene de las rocas del plutón. Con base en el análisis los resultados, se hizo una descripción de las ventajas, desventajas y los alcances de cada método.

La efectividad de cada método para la separación de minerales pesados como los zircones para análisis geocronológicos estará en función de la cantidad y de las características de los cristales obtenidos, así como de la coincidencia en las edades que se obtengan con cada método y las edades publicadas anteriormente.

3.2 Hipótesis

Si el método por decantación es eficaz para la obtención de zircones, entonces el número de zircones y sus características serán significativamente similares las de los zircones obtenidos con mesa Wilfley, el cual es un método ampliamente usado en la actualidad para obtener minerales pesados.

Así mismo, las edades por el método U-Pb de los zircones separados por decantación, para cada muestra de roca, deberán coincidir con las edades de los zircones separados por mesa Wilfley, y con las edades anteriormente publicadas.

Capítulo 4. Zona de estudio

4.1 Tronco de Totoltepec

El tronco de Totoltepec es un complejo plutónico cuyo emplazamiento ocurrió en el Paleozoico, las edades de este varían entre los periodos Carbonífero Tardío (Pensilvánico) y Pérmico Temprano. Se encuentra emplazado dentro del complejo metamórfico Acatlán de edad paleozoica (Ortega, 1978). El plutón cubre un área aproximada de 68 km² y tiene una forma elipsoidal orientada NE-SW. Su eje mayor tiene una longitud aproximada de 15 km y el menor de 5 km. Está ubicado al sureste del estado de Puebla, México, entre las coordenadas Lat. (18°13' N y 18°17' N) y Long. (97°49'W y 97°55'W) (Figura 6). El tronco de Totoltepec se ha descrito como parte de un arco magmático continental que se extiende desde Guatemala hasta el sur de los E.U., originado por subducción en el margen paleo-pacífico al oeste del supercontinente Pangea. (Kirsch et al., 2012). Se encuentra bordeado por dos fallas laterales derechas (N-S) en sus márgenes orientales (Falla Tianguistengo) y orientales (Falla San Jerónimo), así como por un cabalgamiento (E-W) en su margen sur y una falla normal en su margen norte (Falla Matanza).

Por estas características junto con la información termo-barométrica, estructural y mineralógica, se ha propuesto que el emplazamiento del plutón se dio de manera secuencial bajo un régimen transtensional por fallamiento lateral derecho, seguido de diferentes grados de rotación, acortamiento y extensión. (Kirsch et al., 2013).

Las rocas que componen al plutón varían en composición de máfica a félsica, así como en las edades de cristalización lo cual se ha interpretado como resultado de al menos dos periodos distintos de emplazamiento. El primer periodo está representado por rocas de composición máfica mientras que el segundo lo está por rocas de composición intermedia a félsica que a su vez se subdividen en dos pulsos distintos (Tabla 3). Las edades propuestas fueron obtenidas mediante fechamientos en zircones de distintas muestras del plutón por el método U/Pb.

Composición	Tipo de rocas	edad	Abundancia (%)
Máfica	Gabros ricos en hornblenda, Hornblenditas, Dioritas	306±2 Ma	~2%
Intermedia a Félsica	Trondhjemitas, Tonalitas, Granodioritas, Monzogranitos.	287±2 Ma	~98%

Tabla 3. Tipo de rocas encontradas en el plutón de Totoltepec según el carácter ácido de su composición, y su edad. (Kirsch et al., 2012).

Las rocas de composición intermedia y félsica se distribuyen en la mayor parte del plutón. Las intermedias son las más abundantes (~90%). La trondhjemita es por mucho la más abundante, ya que ocupa la mayor área del plutón de manera uniforme. Le siguen la diorita y tonalita que se distribuyen hacia el sur del plutón en pequeñas intrusiones, y hacia el centro oeste donde está su mayor afloramiento (5 km²). Las rocas de composición félsica ocupan un 8% de la abundancia y se han observado únicamente en la parte central superior del plutón en una intrusión de 1 km². Las rocas máficas ocupan el restante 2% de la abundancia, y se distribuyen hacia el noreste en forma de 3 intrusiones de entre 1 y 2 km² de área (Figura 6).

Las rocas del plutón se originaron en al menos dos periodos intrusivos con un hiatus de 17 Ma entre ellos. Debido a que este periodo de tiempo excede la vida propuesta para un reservorio magmático, se ha propuesto que el plutón se originó por dos pulsos de magma (Kirsch et al., 2012). El primero de los periodos intrusivos se dio hace 306 Ma en un lineamiento cortical donde se formaron las rocas máficas.

El segundo periodo corresponde a una reactivación del magmatismo por un régimen transtensional, ocurrido hace 289 Ma que generó las rocas de composición intermedia. Un tercer periodo relacionado al régimen transtensional del segundo provocó una fusión cortical, originando las rocas félsicas. Debido al segundo periodo de magmatismo, tanto por el régimen transtensional como por la intrusión de magma, las rocas máficas de primero pulso fueron asimiladas, cubiertas o dispersadas, lo que explica su poca abundancia y su distribución. Se infiere que el magmatismo que originó el plutón de Totoltepec finalmente migró hacia el este bajo el régimen transtensional cortando la fuente de magma.

El plutón de Totoltepec está en contacto tectónico con la formación metasedimentaria Chichihualtepec-Tecomate (Paleozoico) en sus márgenes sur y suroeste por cabalgamiento y al oeste por fallamiento. El plutón se emplazó dentro de esta formación lo que originó procesos de metamorfismo de contacto. La formación Patlanoaya, perteneciente al grupo Chichihualtepec-Tecomate, es una formación que no presenta alteración por el emplazamiento. Las edades de este grupo son mayores que las edades obtenidas de las rocas de la formación en contacto con el plutón. Esto es atribuido a procesos de recrystalización por metamorfismo de contacto. En su margen noreste el plutón de Totoltepec está en contacto tectónico por fallamiento con una unidad metamórfica no nombrada compuesta principalmente de esquistos de granate, y cuarcita. Al norte y noroeste, el plutón está en contacto tectónico por fallamiento y en contacto discordante (Inconformidad) con una secuencia de rocas sedimentarias pertenecientes a la unidad Piedra Hueca (Kirsch et al., 2012). Las edades de depósito de las rocas sedimentarias de la unidad Piedra Hueca obtenidas anteriormente se ubican entre el Pérmico Inferior y el Jurásico Inferior (Martini et al., 2016) (Figura 7). Esta unidad es una sucesión de conglomerados basales y secuencias de areniscas, limolitas y lutitas, caracterizadas por sus colores rojizos por oxidación debida a intemperismo (Silva-Romo et al., 2018).

4.2 Mapa del área de estudio

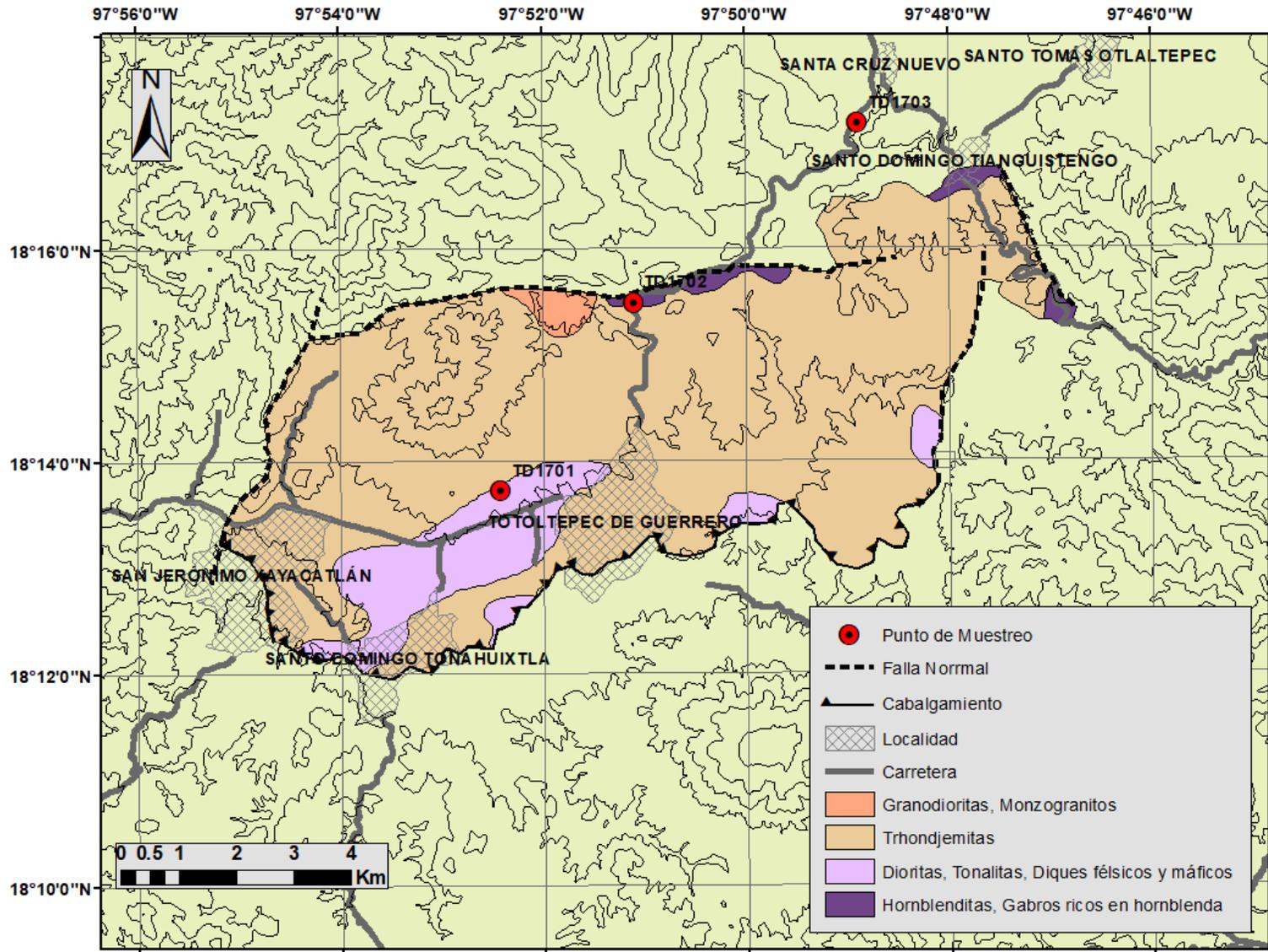


Figura 6. Mapa del área de estudio. Se muestra la ubicación geográfica del tronco de Totoltepec, sus características estructurales principales y la distribución de los tipos de roca que se encuentran en él. También se muestra la ubicación de los sitios de muestreo (Datos de distribución tomados de: Kirsch et al, 2012)

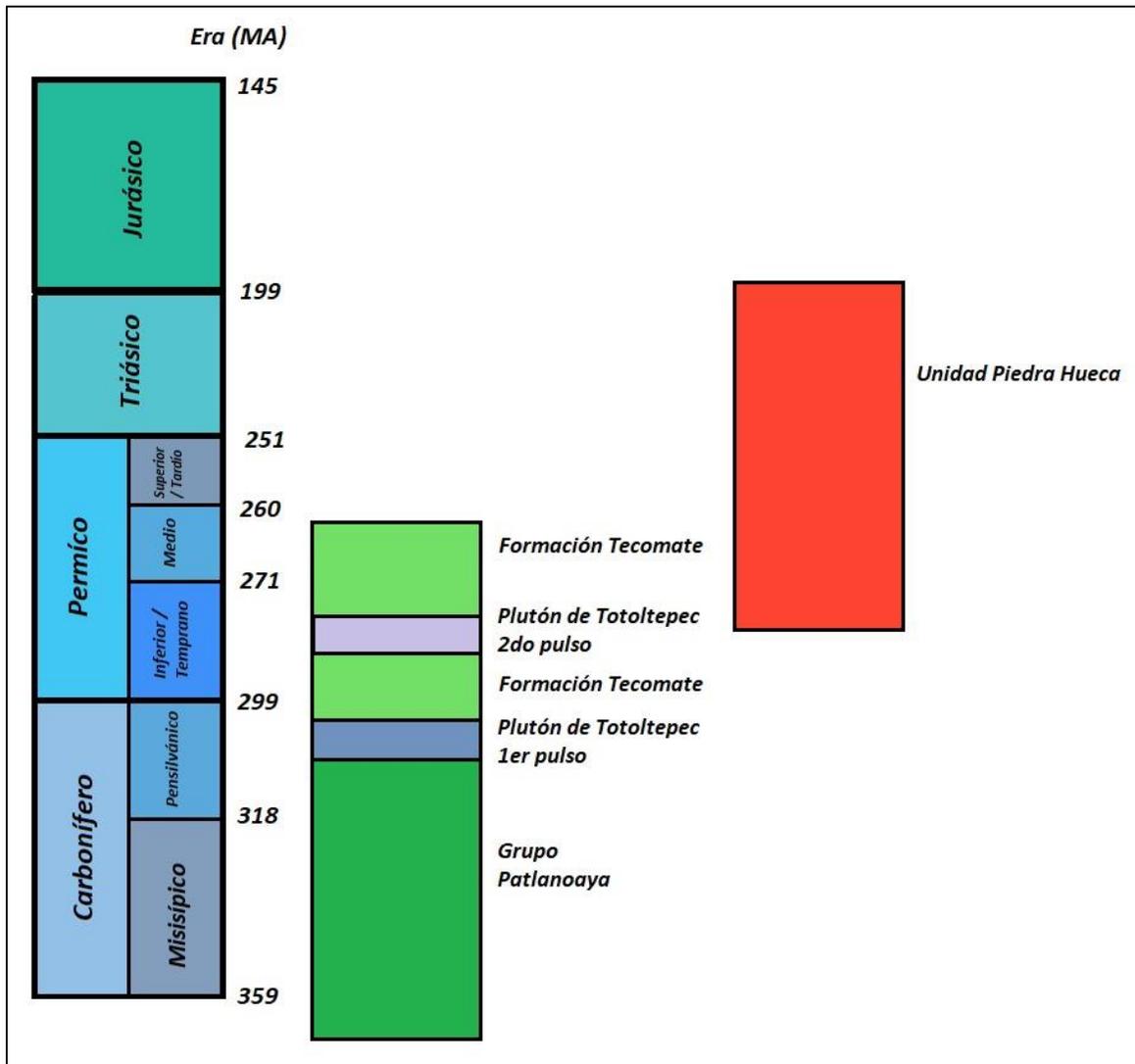


Figura 7. Columna estratigráfica del área de estudio. Se muestra la temporalidad de los dos pulsos de emplazamiento del plutón de Totoltepec en relación con la formación metasedimentaria Tecomate, depositada entre ambos pulsos (Kirsch et al., 2012) y la unidad Piedra Hueca (Martini et al., 2016).

Capítulo 5. Trabajo de campo

El criterio para coleccionar muestras de roca en campo está basado en el tipo de estudio que se quiera realizar. La colecta debe ser acompañada de la descripción del yacimiento, su localización geográfica y la descripción de estructuras, texturas, mineralogía y clasificación de las rocas en campo. El tamaño y la cantidad de las muestras deben ser representativos y suficientes para obtener el volumen de minerales que se requiera para los análisis según el método geoquímico o isotópico que se usará. Para esto se clasifica el tipo de muestras de la siguiente manera: **Análisis de muestra de roca total:** Son aquellas que se trituran totalmente sin separar ningún componente mineral. Se usan para la obtención de información geoquímica como: elementos mayores, elementos traza y relaciones isotópicas. Estas muestras trituradas son pulverizadas a tamaños de arcillas para controlar la homogeneidad de la muestra. **Concentrado mineral:** Es el concentrado de uno o varios tipos de minerales de una muestra de roca que fueron separados por sus propiedades físicas, como: densidad, susceptibilidad magnética o su forma (Tabla 4).

	Textura afanítica (basaltos, andesitas, etc.)	Textura fanerítica (granitoides, gneisses, pegmatitas, etc.)
Roca total	5 kg	5 kg
Concentrado mineral	3 a 4 kg	< 3 kg

Tabla 4. Relación entre las texturas y el tamaño de roca necesario para el proceso de molienda

(Tomada de: geofisica.unam.mx. 2017)

5.1 Colecta de muestras

Se tomaron tres muestras de roca para concentrado mineral de zircones. Dos de las tres muestras son rocas ígneas pertenecientes al plutón de Totoltepec (TD1701 y TD1702). La tercera es una roca sedimentaria perteneciente a la unidad Piedra Hueca (TD1703) que está en contacto tectónico por fallamiento y en contacto discordante con el plutón en su margen norte. Se obtuvieron bloques de aproximadamente 6 a 10 kg por cada muestra. Estos bloques se fragmentaron en tamaños de 15cm³ con un marro y un cincel. Los sitios de las muestras colectadas se georreferenciaron con un GPS marca Garmin eTrex® H (Tabla 5). En los afloramientos se buscaron los sitios donde las rocas mostraran el mínimo de intemperismo posible. En cada punto de muestreo se hizo una descripción macroscópica de cada tipo de roca y se empacaron en bolsas de nylon rotuladas con su respectiva clave (Figura 8).

Clave	Tipo de Roca	Latitud	Longitud
TD1701	Tonalita	18°13'43.30"N	97°52'24.86"W
TD1702	Cuarzo-Diorita	18°15'29.10"N	97°51'6.20"W
TD1703	Arcosa-Lítica	18°17'9.90"N	97°48'53.30"W

Tabla 5. Descripción de muestras y coordenadas geográficas de sitios de muestreo.



Figura 8. Recolección de muestras. a) GPS Garmin eTrex® H. b) Marro y cincel usados para fragmentar las rocas, c) Descripción macroscópica de muestras d) Muestra fragmentada y empacada en bolsa de nylon.

Se llevó a cabo la preparación de las muestras de roca en el taller de molienda del LUGIS.

- Se lavaron las muestras usando agua destilada y cepillos de cerdas de nylon para remover residuos de suelo, óxidos u otros productos de intemperismo que representarían un riesgo de contaminación para los análisis. Tras esto se dejaron secar las muestras por 24 horas a temperatura ambiente en un área aislada.
- Se empacaron las muestras en bolsas de nylon y se etiquetaron. Posteriormente se pesaron para saber la cantidad de muestra que se usarían en los análisis (Tabla 6).

Muestra	Tipo de roca	Peso (Kg)
TD1701	Tonalita	15.250
TD1702	Cuarzo-Diorita	5.200
TD1703	Arcosa-Lítica	12.300

Tabla 6. Pesos obtenidos para cada muestra.

Capítulo 6. Trabajo de laboratorio

6.1 Descripción macroscópica y petrográfica de las muestras

Muestra TD1701 (Granodiorita) (18°13'43.30"N, 97°52'24.86"W) Tronco de Totoltepec

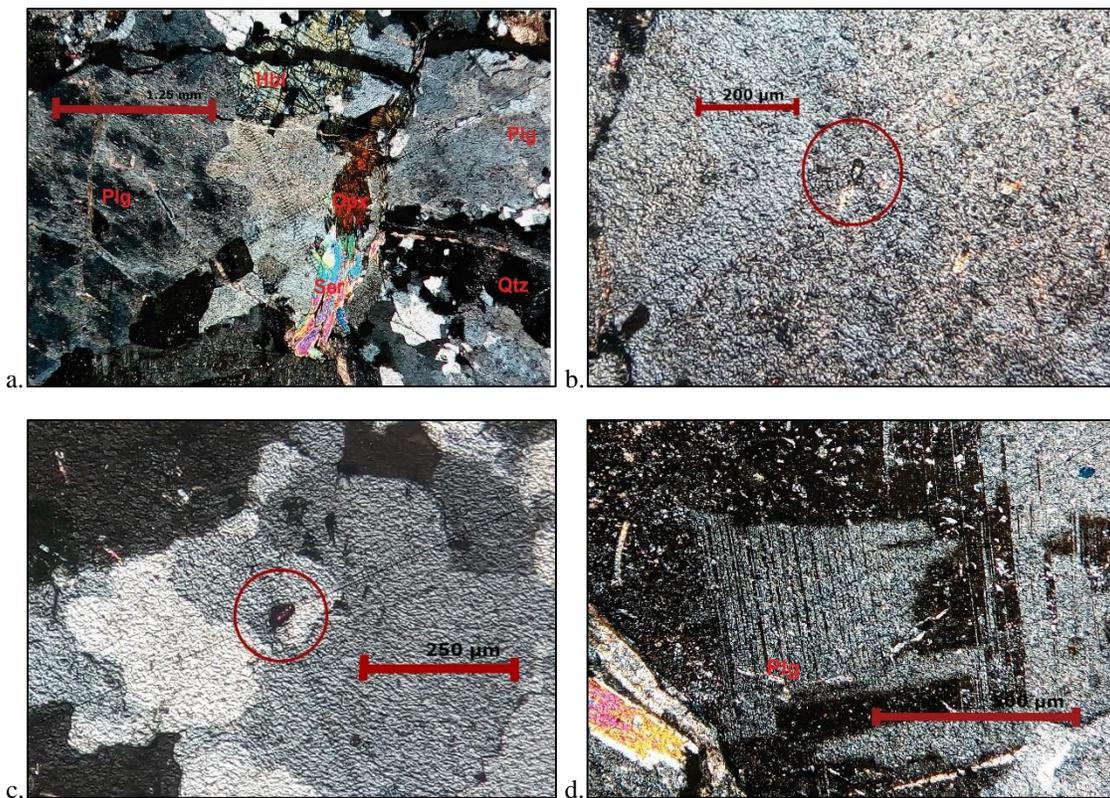
Descripción macroscópica: Roca inequigranular fanerítica, leucocrática. La muestra presenta una foliación incipiente (Figura 9). Los minerales que se pueden reconocer macroscópicamente son cuarzo, biotita y piroxeno. La foliación incipiente sugiere que la muestra ha sufrido un proceso de metamorfismo temprano.



Figura 9. Muestra TD1701. Muestra de mano (La escala está en cm).

Descripción petrográfica: Roca holocristalina de textura inequigranular fanerítica. Su composición está conformada principalmente por plagioclasa, cuarzo, feldespato potásico, hornblenda, piroxeno, biotita y flogopita. Como minerales accesorios se observa zircón, epidota, monazita y apatito. Como producto de intemperismo se observan minerales secundarios como gibbsita reemplazando cristales de piroxeno, y sericita reemplazando cristales de plagioclasa. También se observa calcita originada por la precipitación de carbonatos, depositada en grietas y fracturas (Figura 10).

Los cristales de plagioclasa son en su mayoría subhedrales. La mayoría están fracturados y presentan bordes redondeados y subredondeados. Esta fase presenta los mayores tamaños de cristales con longitudes que varían de 0.12 a 4.8 mm. El contacto que presenta con otros minerales es de tipo longitudinal. Los cristales más grandes presentan fracturas rellenas de calcita y sericita. Algunos cristales de plagioclasa están en intercrecimiento con cristales de feldespato potásico, formando antiperititas. Los cristales de cuarzo y de feldespato son en su mayoría anhedrales, fracturados y con bordes redondeados. Se presentan como minerales intersticiales. Su longitud varía de 0.2 mm a 2.5 mm. Los contactos que presentan sus cristales son de tipo longitudinal y suturado. Los cristales más grandes presentan fracturas rellenas de calcita. Los cristales de piroxeno son anhedrales de integridad baja y tienen bordes redondeados. Su longitud varía de 0.175 a 2.5 mm. El tipo de contacto predominante es longitudinal, aunque en algunas zonas se observan contactos suturados, sobre todo en las zonas donde los cristales están fracturados. Los cristales más grandes presentan fracturas rellenas de calcita.



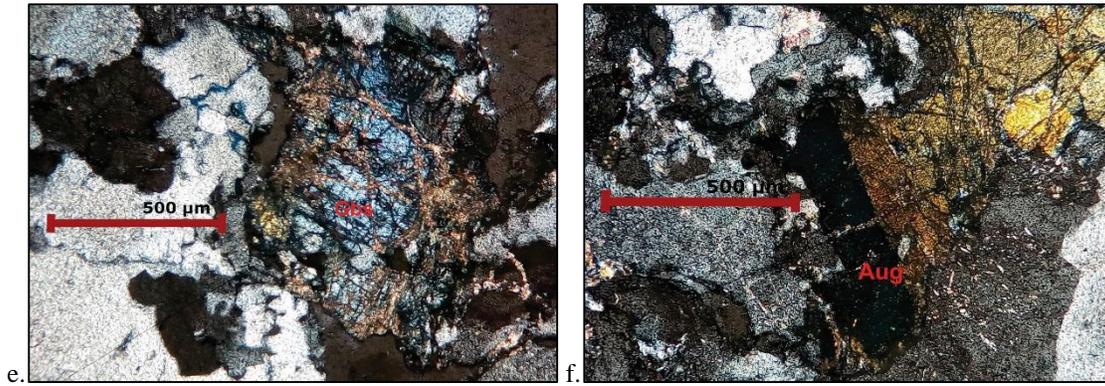


Figura 10. Muestra TD1701. Fotomicrografías de textura y minerales representativos. a) Textura fanerítica inequigranular d grano grueso. Los minerales que pueden observarse son plagioclasa, cuarzo, hornblenda, piroxeno y sericita (NX, 4x). b) Zircón (NX, 40x). c) Zircón (NX, 40x). d) Pertita (NX, 10x). e) Gibbsita (NX, 10x). f) Augita (NX, 10x).

Se efectuó un conteo de 300 puntos sobre la lámina delgada y se graficaron los resultados porcentuales en el diagrama de Streckeisen para rocas ígneas (Figura 13). La muestra TD1701 se clasificó como una Granodiorita.

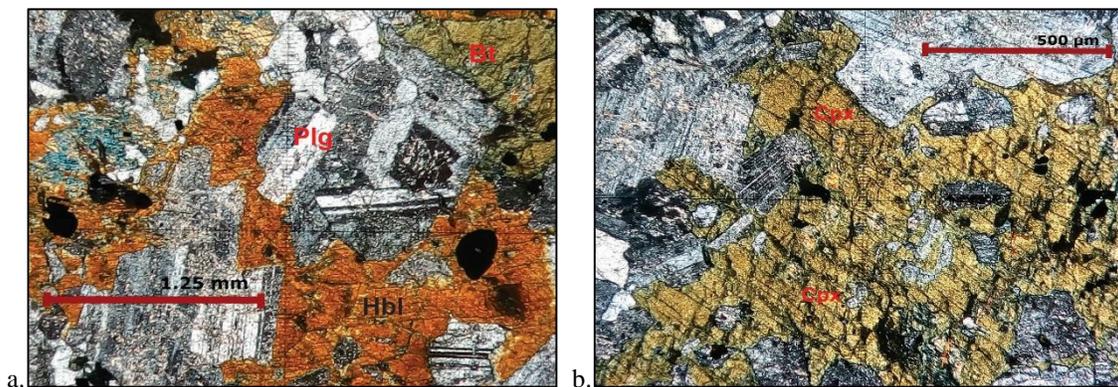
Muestra TD1702 (Cuarzo-Diorita) (18°15'29.10"N, 97°51'6.20"W) Tronco de Totoltepec

Descripción macroscópica: Roca equigranular, fanerítica, melanocrática. Los minerales que se pueden reconocer macroscópicamente son anfíbol, plagioclasa y minerales micaceos. Las micas que se observan en la muestra presentan una coloración característica dorada, estas podrían ser flogopita o biotita alterada por intemperismo. El posterior análisis petrográfico reveló que se trata de biotita (Figura 11).



Figura 11. Muestra TD1702. Muestra de mano.

Descripción petrográfica: Roca holocristalina de textura inequigranular fanerítica. Su composición está conformada principalmente por plagioclasa, hornblenda, cuarzo, biotita y flogopita. Como minerales accesorios se observa zircón y apatito. La muestra está muy fracturada y se observan minerales secundarios como clorita, remplazando cristales de micas, gibbsita remplazando cristales de piroxeno y también se observa calcita originada por la precipitación de carbonatos depositada en grietas y fracturas (Figura 12). Los cristales de plagioclasa son en su mayoría subhedrales presentan la mayoría están fracturados y poseen bordes subredondeados y angulosos. Esta fase es la más abundante, los cristales poseen longitudes que varían de 0.375 a 2 mm. El contacto que presenta con otros minerales es de tipo longitudinal principalmente y en algunas áreas se observan contactos suturados. Los cristales de hornblenda son anhedrales, la mayoría presenta fracturas y poseen bordes angulosos. Tienen longitudes que varían de 0.7 a 3 mm. El contacto que presenta con otros minerales es de tipo longitudinal. Los cristales más grandes presentan varias fracturas rellenas de calcita. Los cristales de cuarzo son en su mayoría anhedrales, fracturados y con bordes redondeados. Se presentan como minerales intersticiales. Su longitud promedio es de 0.2 mm. Los contactos que presentan sus cristales son de tipo longitudinal. Los cristales de biotita son anhedrales e integridad baja, poseen bordes tanto redondeados como angulosos. Tienen longitudes que varían de 0.5 a 6 mm. Están altamente fracturados y rellenos de calcita. En varias zonas los cristales de biotita están siendo reemplazados por clorita. Los cristales de flogopita son anhedrales de integridad baja, poseen bordes redondeados. Están altamente fracturados y rellenos de calcita. Tienen longitudes que varían de 0.875 a 4.25 mm.



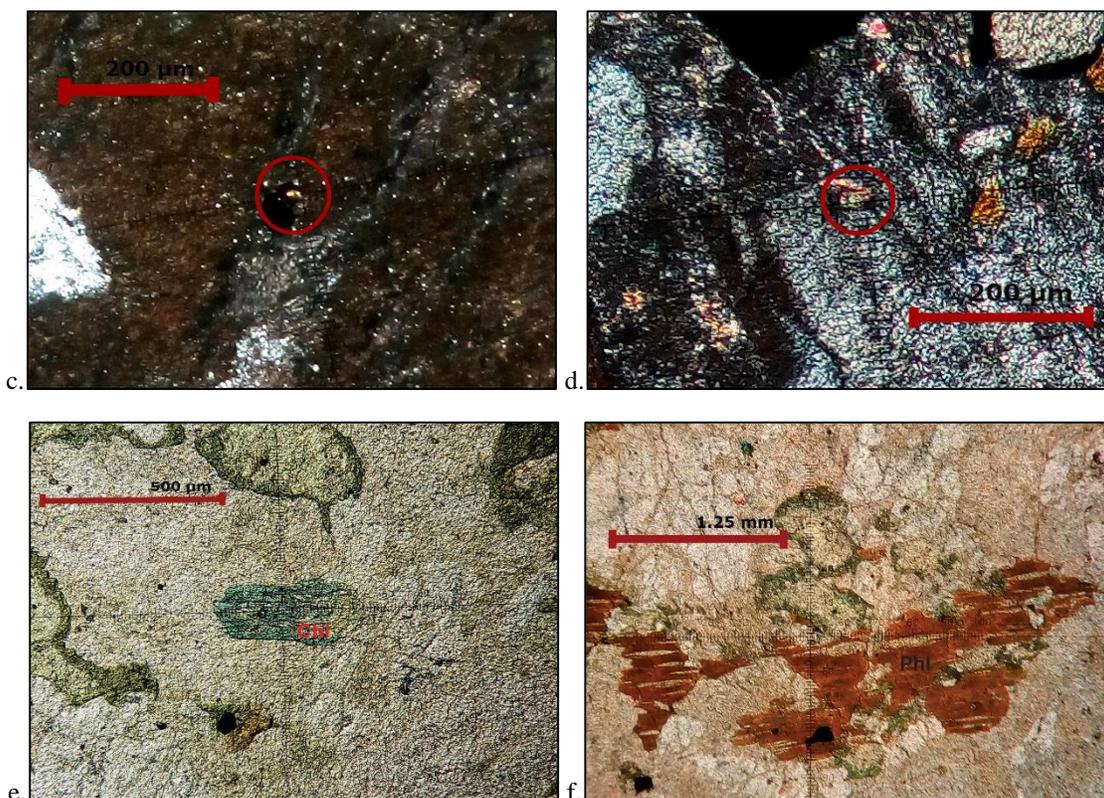


Figura 12. Muestra TD1702. Fotomicrografías de textura y minerales representativos. a) Textura fanerítica inequigranular d grano grueso. Pueden observarse plagioclasas, biotita y hornblenda (NX, 4x). b) Clinopiroxeno fracturado, relleno de calcita (NX, 4x). c) Zircón (NX, 10x). d) Zircón (NX, 10x). e) Clorita (Luz paralela, 10x). f) Flogopita (Luz paralela, 4x).

Se efectuó un conteo de 300 puntos sobre la lámina delgada y se graficaron los resultados porcentuales en el diagrama de Streckeisen para rocas ígneas (Figura 13). La muestra TD1702 se clasificó como una Cuarzo-Diorita.

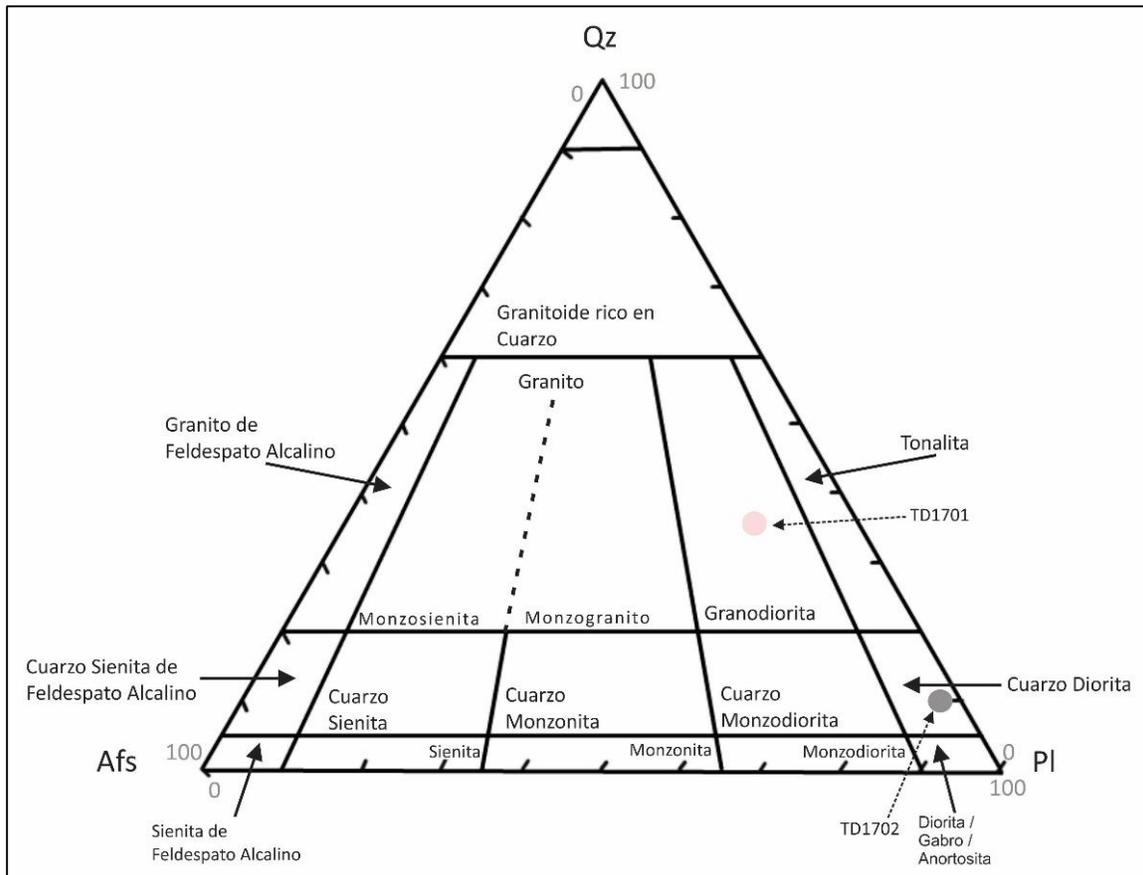


Figura 13. Diagrama ternario Streckeisén (QAFP) para la clasificación de rocas ígneas. Se clasifica la muestra TD1701 como una granodiorita y la muestra TD1702 como una cuarzo-diorita (Le Bas y Streckeisén, 1991).

TD1703 (Arcosa-Lítica) (18°17'9.90"N, 97°48'53.30"W) Formación Piedra Hueca

Descripción macroscópica: Roca sedimentaria deleznable de color pardo. Los detritos son de tamaños arena y arcilla, están poco redondeados, mal clasificados e incrustados en una matriz arcillosa que posee el color pardo característico de la roca, debido a la presencia de óxidos como producto de intemperismo. Los clastos que se pueden reconocer macroscópicamente son cuarzos, feldespatos y fragmentos de otras rocas (Figura 14).



Figura 14. Muestra TD1703. Muestra de mano.

Descripción petrográfica: Roca detrítica compuesta por cementante (20%), matriz (10%) y clastos (70%). El cementante es calcáreo y presenta tonalidades de color pardas y anaranjadas. Estos colores se deben a la presencia de óxidos originados por intemperismo (Figura 15).

Los clastos están compuestos por granos minerales y por fragmentos de otras rocas. Los granos minerales son en su mayoría feldespatos potásicos, cuarzos y plagioclasas. Los granos de cuarzo son de integridad baja tienen bordes redondeados y subredondeados principalmente, aunque también presentan bordes angulosos y un nivel alto de fracturamiento. Varían en tamaños de 0.3 a 2.3 mm. La mayoría son monocristalinos. Los granos de feldespato potásico son de integridad baja tienen bordes redondeados y subredondeados principalmente, aunque también presentan bordes angulosos y un nivel alto de fracturamiento. Varían en tamaños de 0.25 a 4.375 mm. La mayoría son monocristalinos. Los granos de plagioclasa son los menos abundantes, son de integridad baja y tienen bordes redondeados y subredondeados y presentan un nivel alto de fracturamiento. Varían en tamaños de 0.375 a 2 mm.

También se distinguen cristales de zircón y de apatito como pequeños granos individuales.

Los clastos menos abundantes son fragmentos de rocas ígneas y sedimentarias. Los fragmentos ígneos son granitos compuestos principalmente por del mismo tipo de minerales que los granos individuales (cuarzo, feldespato potásico y plagioclasa), varían en tamaños de 0.75 a 2.275mm. Los fragmentos de roca sedimentarias varían en tamaños de 0.575 a 3mm. En algunos de ellos se pueden distinguir microfósiles posiblemente raíces, aunque esto último solo es especulado.

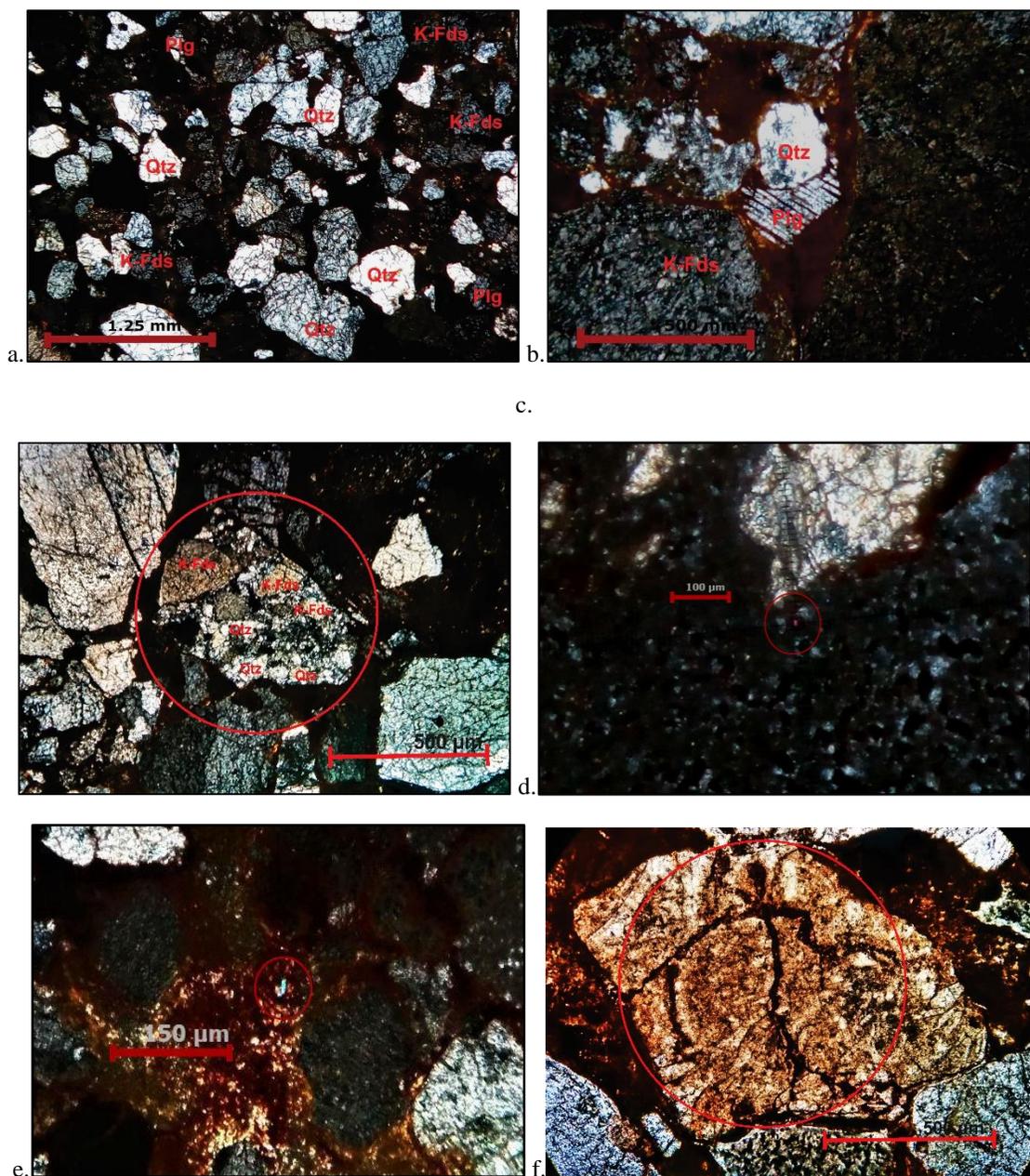


Figura 15. Muestra TD1703. Fotomicrografías de textura y minerales representativos. a) Clastos compuestos principalmente por cristales de cuarzo y feldespato (NX, 4x). b) Granos de cuarzo, K-feldespato y plagioclasa. c) Fragmento de roca granítica compuesta por cristales de cuarzo y feldespato (NX, 10). d) Zircón (NX, 10x). e) Zircón (NX, 10x). f) Microfósil en un clasto de roca sedimentaria (NX, 10x).

Haciendo un conteo de 300 puntos sobre la lámina delgada y graficando los resultados porcentuales en el diagrama Folk para rocas areniscas (Figura 16), se clasifica la muestra TD1703 como una arcosa-lítica.

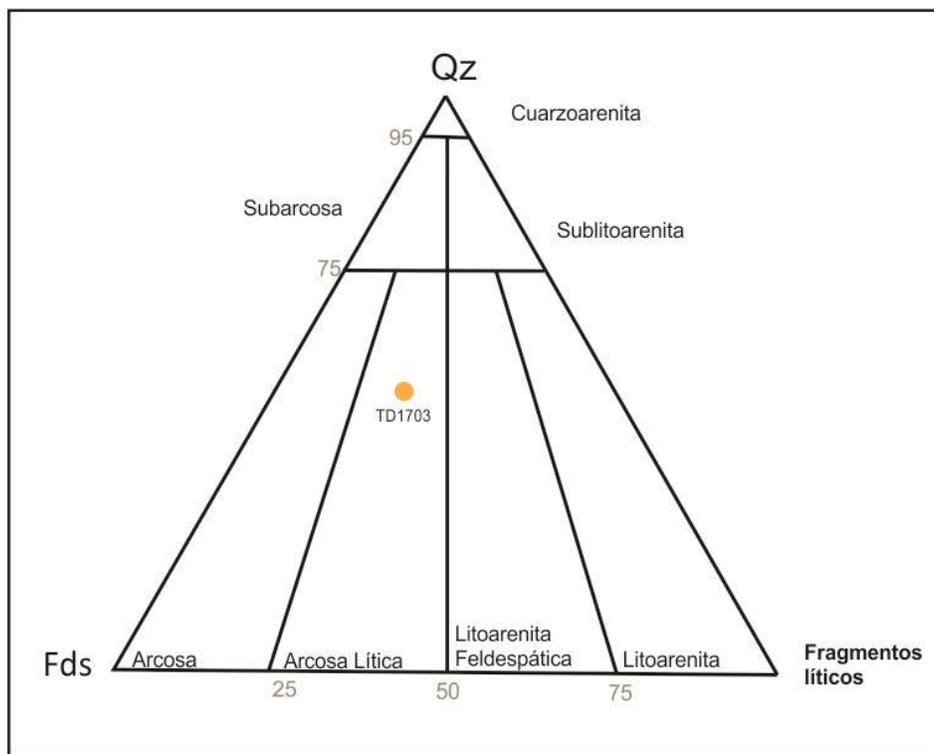


Figura 16. Diagrama ternario Folk (QFL) para la clasificación de areniscas. Se clasifica la muestra TD1703 como una Arcosa-Lítica (Folk, 1974).

6.2 Preparación de concentrados de Minerales Pesados.

Este trabajo de tesis será utilizado para complementar un manual de separación de minerales pesados por decantación para ser utilizados en la obtención de edades por el método de U-Th-Pb en zircones, apatitos y monacitas. En la descripción de cada etapa se describe también el proceso de limpieza de los diferentes equipos e instalaciones. Esto es de suma importancia para evitar contaminación por residuos de muestras ajenas que afecten la certidumbre de los resultados analíticos.

6.3 Separación de zircones por mesa Wilfley

El método de separación de minerales que se basa en el uso de la Mesa separadora Wilfley es el más utilizado para la separación y concentración de minerales pesados. Este método es el de uso más extendido para obtener minerales para estudios de geocronología.

Existen manuales de separación de minerales publicados por diversas instituciones en donde estos procedimientos son descritos (McClenaghan, 2011; Chisholm et al., 2014; Strong y Driscoll, 2016). Este es el método más estandarizado para separar zircones de una muestra de roca y se usa siguiendo la siguiente serie de etapas (Figura 17).



Figura 17. Diagrama de las etapas del método de separación de zircones por mesa Wilfley.

6.3a Quebrado y Trituración de la muestra de roca

Se describen a continuación las etapas que se recomiendan realizar.

- Limpieza meticulosa de los planos de trituración de los equipos (p ej. molinos, prensas, etc.) utilizando cepillos y discos de cerdas de acero montados en un taladro.
- Descostre de la muestra, que consiste en retirar las zonas superficiales de los bloques para retirar las posibles alteraciones por intemperismo, o contaminantes por residuos de suelos, para esto se usan martillos, mazos y cinces junto con equipo de seguridad como guantes, anteojos protectores y orejeras (Figura 18).



Figura 18. a) y b) Equipo usado para el descostre y quebrado de muestras de roca.

- Lavado de los fragmentos. Se usa agua destilada y cepillo de cerdas de plástico para retirar residuos de la superficie de las muestras. Los bloques de roca se secan en un área aislada temperatura ambiente y cubiertas con papel absorbente.
- Pre-contaminación del equipo: Consiste en introducir una fracción de la muestra ($\leq 1/5$ del total) en los equipos de molienda. Lo anterior se hace para retirar partículas de la muestra procesada anteriormente, que pudieran estar incrustadas en oquedades de tamaños microscópicos que se hacen por el desgaste de las superficies de los equipos. La muestra triturada en este paso se desecha.
- Trituración de la muestra. El procedimiento de trituración y el equipo dependerán del tipo de estudio: Si se quiere una muestra de roca total, se usan al menos dos equipos de molienda, uno que quiebre la muestra y la granule y otro que la pulverice. Para la primera acción podemos utilizar una trituradora de quijadas o una prensa hidráulica. Si se quiere obtener un concentrado mineral, la trituración se realizará en varias etapas. El bloque de roca se quiebra y se granula con una prensa hidráulica y/o con una trituradora de quijadas. Para disminuir el granulado se puede optar por molinos de discos, molinos de rodillos o la misma prensa hidráulica.

Para este trabajo únicamente se utilizó una Prensa hidráulica de 50 toneladas. La prensa está compuesta de un pistón hidráulico y una base de trituración horizontal, dos discos accesorios de acero templado que se montan debajo del pistón y sobre la base horizontal de trituración. La muestra se coloca entre los discos para ser triturada (Figura 19). Para realizar la limpieza de la prensa y el laboratorio se utilizaron herramientas como: Aspiradora, aire a presión, cepillos de cerdas de acero y un taladro con cepillos de cerdas de acero (Figura 20).



a.



b.

Figura 19. a) Prensa Hidráulica de 50 ton. b) Detalle de disco de acero.

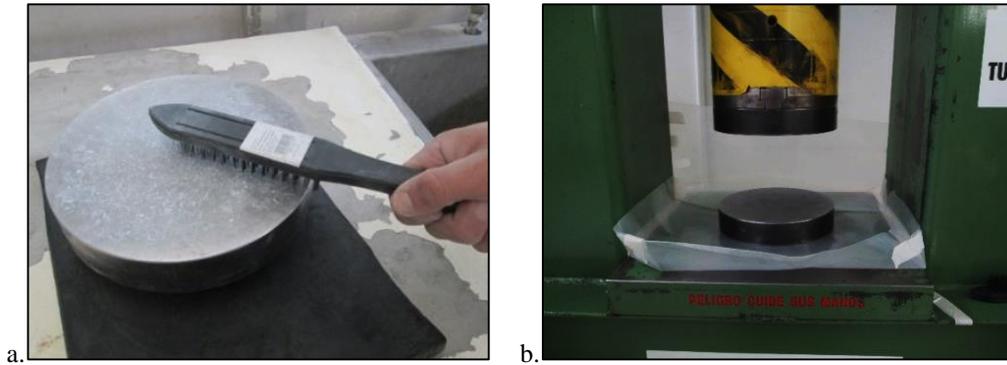
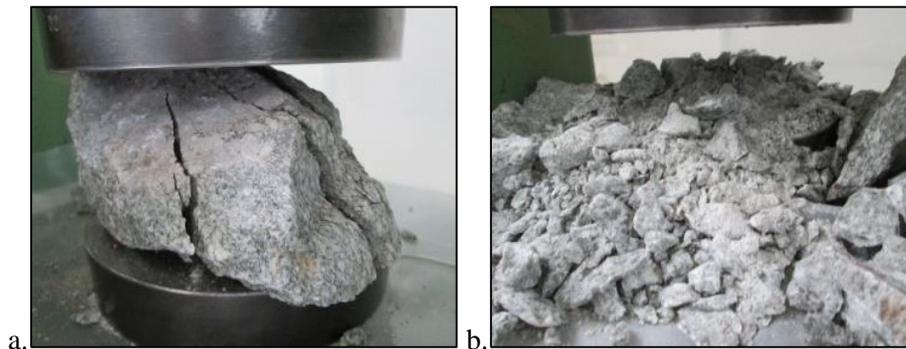


Figura 20. a) Disco de acero templado siendo limpiado con cepillo de cerdas metálicas. b) Equipo montado.

Después de la limpieza se realizó el proceso de “contaminación” de la prensa usando un 20% de la muestra. El objetivo de esta actividad es remover posibles partículas incrustadas en las oquedades microscópicas del equipo. Los productos (polvos y fragmentos) obtenidos se desecharon. Las superficies del equipo se limpiaron con acetona.

Proceso de Molienda

- Se tomó una cantidad suficiente de muestra para ser triturada. El resto se almacena como reserva por si hay pérdida de muestra.
- En un principio se pensó en usar la prensa hidráulica solo para obtener fragmentos que se triturarían después en un molino de discos Marca BICO para obtener tamaños granulados. Sin embargo, se observó que usando la prensa un número adecuado de veces, se pueden obtener tamaños de grano suficientemente finos en donde los minerales se encuentren disgregados. La granulometría se controló usando un colador de abertura mayor a 3 mm (Figura 21).
- Se dividió la muestra en dos fracciones, una que contiene las partículas de grano fino y otra que contiene los fragmentos de grano grueso separadas con el colador.



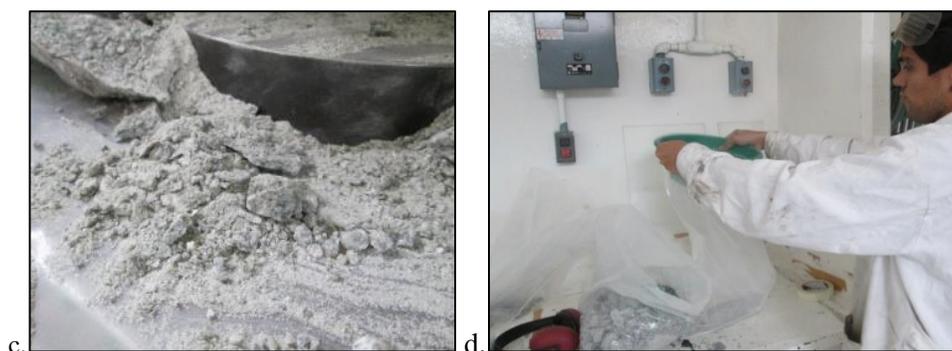


Figura 21. a), b) y c) Secuencia de imágenes donde se puede observar como la muestra es quebrada, fragmentada y finalmente granulada y pulverizada. d) . Muestra pulverizada siendo pasada por el colador de 3mm de abertura.

Todas las muestras se procesaron de la misma forma. Para la muestra TD1701 se trabajó con 10 kg del total; para la TD1702 se trabajó con 4.2 kg y para la TD1703 se trabajó con 10 kg.

6.3b Tamizado o cribado de la muestra

Este proceso tiene como objetivo el separar la muestra triturada por distintos tamaños de granos. Para esto se usa un método de separación mecánica simple a través de una serie de filtrados de fases solidas usando un conjunto de tamices o cribas. Los tamices se clasifican por el tamaño de apertura de la trama sus mallas que a su vez determinan el tamaño de partículas que pueden separar (diámetro de fracción granulométrica) (Tabla 7). Los tamices se acomodan uno sobre otro, los tamices de malla más fina se colocan en la base y sucesivamente conforme aumenta el tamaño de malla se van acomodando hasta que los más gruesos se colocan en la parte superior. Debajo los tamices se coloca un colector. Los números de tamices se ajustan al tamaño promedio de los cristales del mineral que se quiere separar. Mientras más pequeños sean los cristales, se usarán tamices de números mayores (mallas más finas).

Tamiz (No.)	U.S.A Std.	Abertura Malla (mm)	(μm)	Clasificación de tamaño de grano
7	7	2.800	2800	<i>Arena Gruesa</i>
8	8	2.360	2360	
9	10	2.000	2000	
10	12	1.700	1700	
12	14	1.400	1400	

14	16	1.180	1180		
16	18	1.000	1000		
20	20	0.850	850		<i>Arena Media</i>
24	25	0.710	710		
28	30	0.600	600		
32	35	0.500	500		
35	40	0.425	425	<i>Arena Fina</i>	
42	45	0.355	355		
48	50	0.300	300		
60	60	0.250	250		
65	70	0.212	212		
80	80	0.180	180		
100	100	0.150	150		
115	120	0.125	125		
150	140	0.100	100		
170	170	0.090	90		
200	200	0.075	75		
250	230	0.063	63		

Tabla 7. Clasificación de tamices por su número, su abertura en mm y el tamaño de sedimentos que pueden separar (Datos obtenidos de: <http://www.tyler.com.mx/tamices.html>).

Las muestras se cribaron utilizando tamices con mallas de tamaños 20, 40, 60, 80, 100 y 120. El tamizado fue realizado en el laboratorio de sedimentología volcánica del departamento de vulcanología del Instituto de Geofísica de la UNAM usando un equipo de tamizado centrifugo W.S. Tyler Inc. Ro-Tap® R-30030 (Figuras 22 y 23).

Los tamices se lavaron utilizando un Baño Ultrasónico Fisher Scientific® FS30 (Figura 24) y aire comprimido. Este proceso se realizó en el laboratorio de separación de minerales del LUGIS del Instituto de Geofísica de la UNAM. Los tamices se observaron en un microscopio estereoscópico, gracias esto se pudo observar que en los tamices de mallas 50, 100 y 120 tenían algunas partículas minerales atrapadas en la malla (Figura 24). Estos tamices se lavaron nuevamente hasta no observar partículas incrustadas. Sin embargo, aún hay zonas en los tamices que no pueden controlarse visualmente con el microscopio.

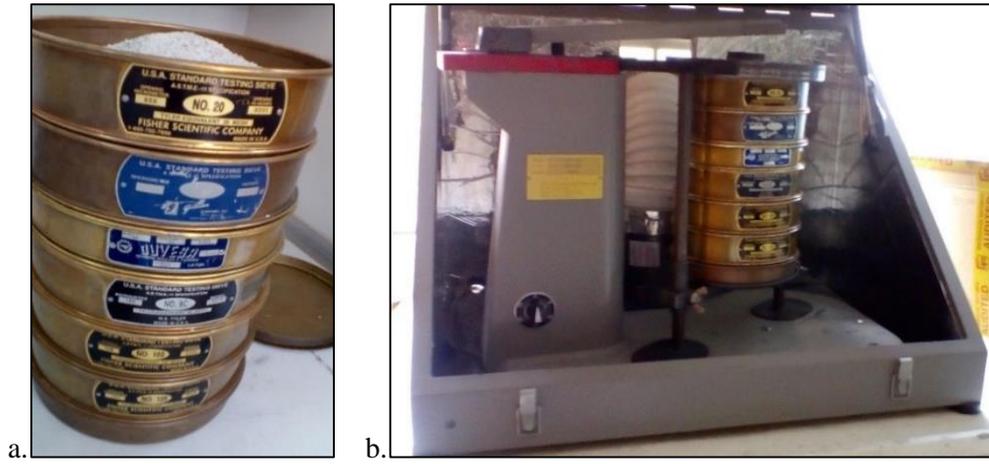


Figura 22. a) Tamices con la muestra (No. 20, 40, 60, 80, 100 y 120). b) Tamizado centrifugo W.S. Tyler Inc. Ro-Tap® R-30030.

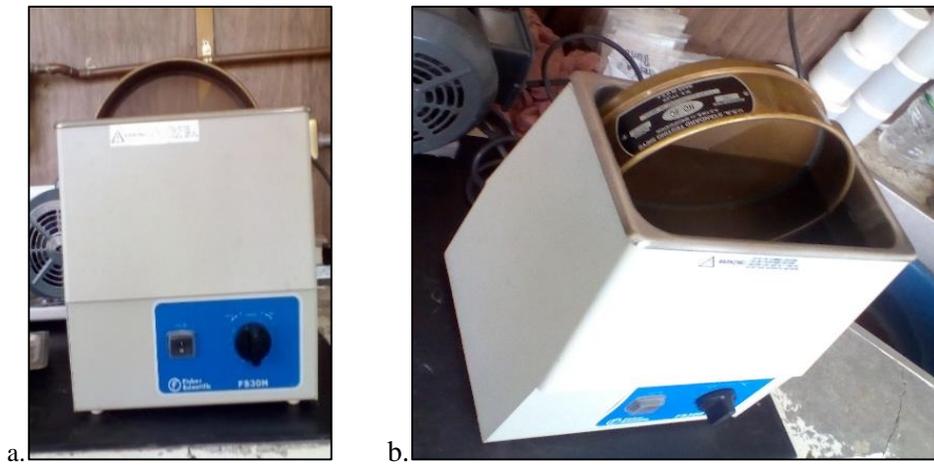


Figura 23. a) y b) Baño de ultrasonido usado para limpiar los tamices.

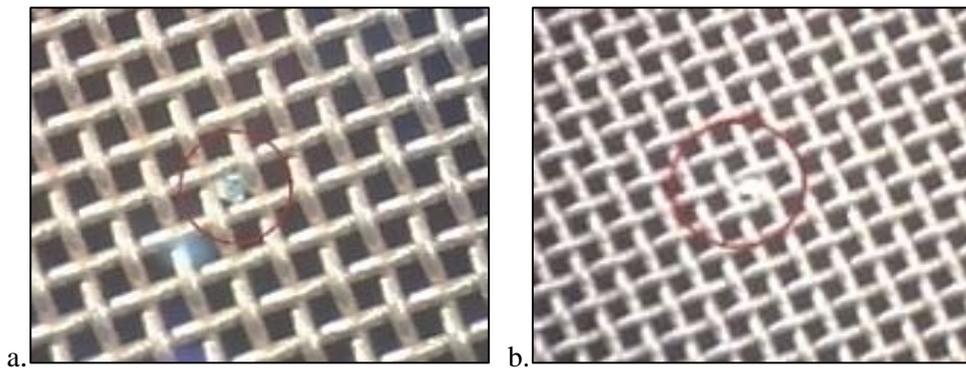




Figura 24. a), b) y c) Vista en microscopio (0.67X) de los tamices (a-50, b-100, c-120) se señalan con un círculo rojo las partículas minerales atascadas en las mallas aún después de ser lavados en baño ultrasónico.

Proceso de Tamizado de la muestra

- Se montaron los tamices uno sobre el otro de forma que el tamaño de maya decrezca hacia abajo, por lo que el tamiz de malla 20 queda hasta arriba y el de malla 120 queda en el fondo sobre él contenedor.
- La muestra se vertió cuidadosamente evitando que el tamiz superior se llenara demasiado para evitar pérdida de muestra y para poder colocar la tapa fácilmente.
- Los tamices montados con la muestra fueron colocados en la tamizadora y se aseguran bien. La compuerta de la maquina se cierra.
- Se dejó trabajar la maquina durante varios intervalos de 3 minutos de duración hasta observar que la muestra haya sido correctamente separada.
- El proceso se repitió de la misma manera desde el vertido de muestra hasta que toda la muestra fue tamizada.
- Después de tamizar se obtuvieron concentrados de material perteneciente a cada tamaño de malla desde la 20, hasta 120 y la fracción que pasa por esta malla.
- Todos los concentrados se almacenaron en bolsas plásticas limpias, selladas y rotuladas.

6.3c Mesa Wilfley

La mesa Wilfley es un dispositivo mecánico de separación y concentración mineral por gravedad. Es capaz de separar minerales por su hábito y su densidad. Fue diseñada para la industria minera a finales del siglo XIX, y su uso se ha extendido en diversas áreas (Bergendahl y Koschman, 1971). Funciona al hacer correr un flujo laminar de agua constante (6 a 12 L/min) que arrastra a los minerales y fragmentos de roca sobre una superficie inclinada de ángulo ajustable (www.911metallurgist.com). La muestra granulada se vierte mediante un alimentador hacia la superficie de la mesa donde se mezcla con el flujo de agua en la esquina superior izquierda de la mesa. La mesa se desplaza lateralmente de derecha a izquierda. Al término de cada movimiento lateral se genera un golpe que provoca que la muestra se levante de la base de la mesa, al mismo tiempo cambia de sentido del movimiento lateral. La cortina de agua que se genera sobre la superficie de la mesa permite una separación más eficiente porque los minerales de tamaño de arcillas y limos se mueven en suspensión y permiten el movimiento de los minerales en tracción (Geyh y Schleicher, 1990). Los minerales se dispersan sobre la mesa dependiendo de su densidad y de su forma, estos se desplazan por gravedad debido a la inclinación de la superficie. Los minerales pesados y los de hábito prismático no se mantienen en suspensión y son arrastrados por el flujo de agua y guiados por los canales de la mesa. Los minerales ligeros y los de hábito tabular, en cambio, son arrastrados por el flujo de agua laminar sin poder dispersarse. Al frente de la mesa y a su costado se encuentran 7 colectores de muestra donde cae el flujo de agua con la muestra. Los minerales más ligeros se vierten primero en los colectores del lado derecho, minerales más pesados son arrastrados progresivamente hacia colectores del lado izquierdo. (Figura 25).

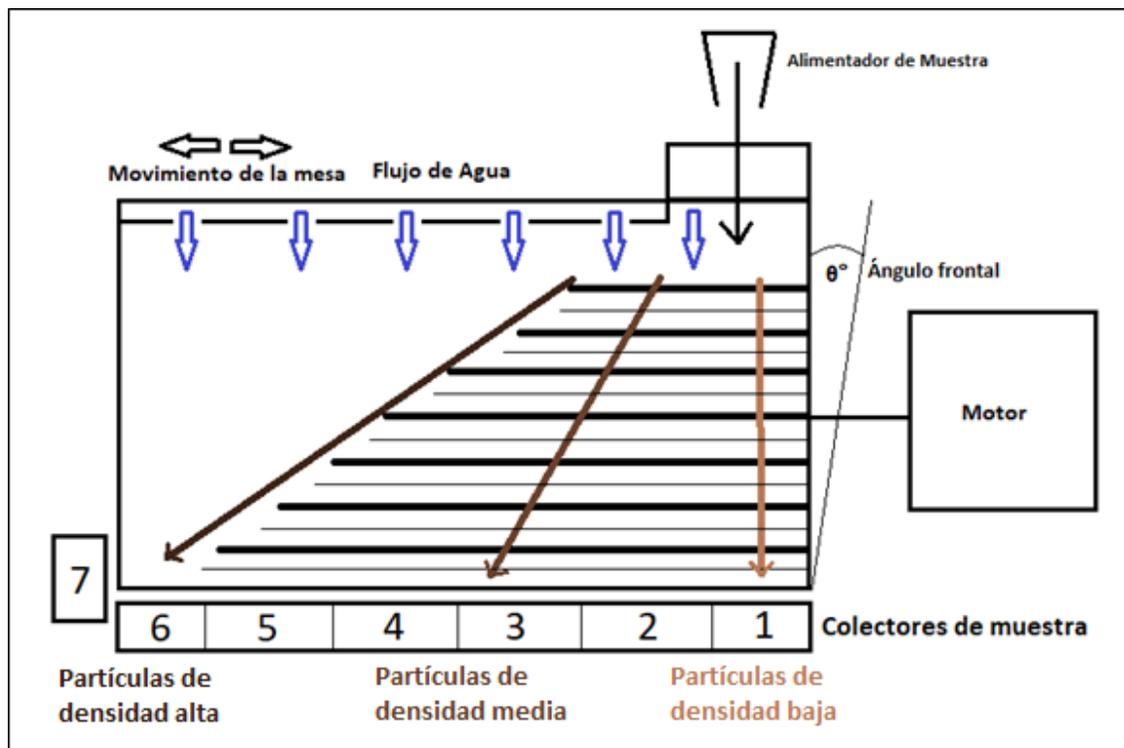


Figura 25. Esquema de la mesa Wilfley y su funcionamiento.

Las fracciones granulométricas recomendadas para el uso de la mesa Wilfley son las obtenidas de los tamices de mallas superiores al número 60 (tamaño de partícula $< 6\text{mm}^3$). Los parámetros como la Inclinación, la frecuencia y el flujo de alimentación de la muestra y de agua deben ajustarse según convenga en cada caso, en general se deben aumentar estos parámetros proporcionalmente al tamaño de grano de los minerales en la muestra. Existen también ecuaciones para ajustar los parámetros de la mesa (Drzymala, 2007):

$$W = 0.1\rho_m\{Ad_d(\rho_1 - 1000)/(\rho_2 - 1000)\}^{0.6}$$

$$n = 4.17(d_{dmax})^{-0.2}$$

$$l = 18(d_{dmax})^{0.25}$$

Donde:

W = Rendimiento de masa (kg/h), ρ_m =Densidad de la mezcla (Kg/m^3), ρ_l =Densidad de la fracción ligera, ρ_2 =Densidad de la fracción pesada, A =Área superficial de la mesa, d_d =Tamaño promedio de las partículas, n =Frecuencia de sacudimiento (1/s), l =desplazamiento de la mesa (mm).

Se utilizaron las instalaciones y el equipo del Laboratorio de Separación de Minerales del Instituto de Geología de la UNAM. Se usó una mesa de separación de minerales Wilfley, un alimentador por vibración Syntron® y un Nivel graduado ajustable para determinar el ángulo de inclinación de la mesa el cual fue de 14° (Figura 25). Todo el equipo y las instalaciones fueron cuidadosamente lavados prestando mayor atención en las áreas de los equipos donde la muestra se apoya para ser manipulada. La mesa y las superficies de los equipos de trituración pueden tener poros o espacios producto del desgaste de trabajo, estas imperfecciones permiten que fragmentos de rocas y minerales microscópicos puedan quedar atascados o depositados, esto supone riesgo de contaminación para la muestra trabajada. Se tiene que lavar por áreas pequeñas para tener un control absoluto de limpieza. El material ideal de limpieza son cepillos de cerdas de nylon, fibras de limpieza, jabón líquido, agua y aire comprimido (Figura 27).

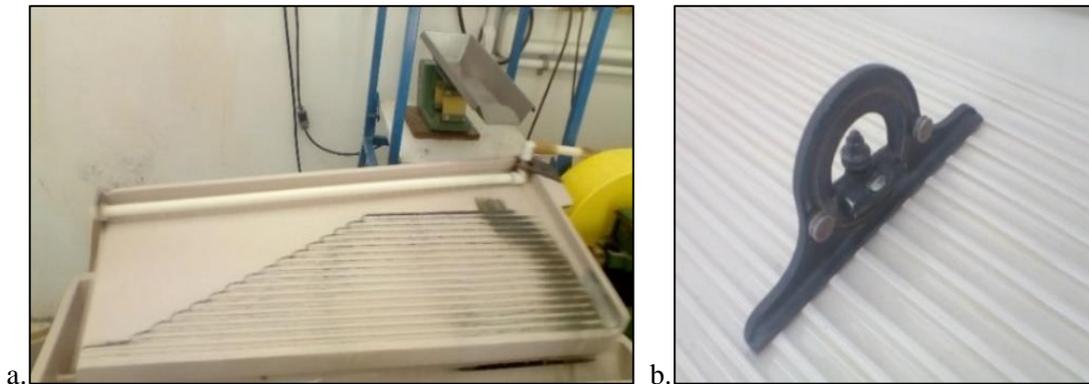


Figura 26. a) Equipo usado para la separación con mesa Wilfley y Alimentador por vibración marca Syntron®. b) Nivel para determinar el ángulo de inclinación de la mesa.

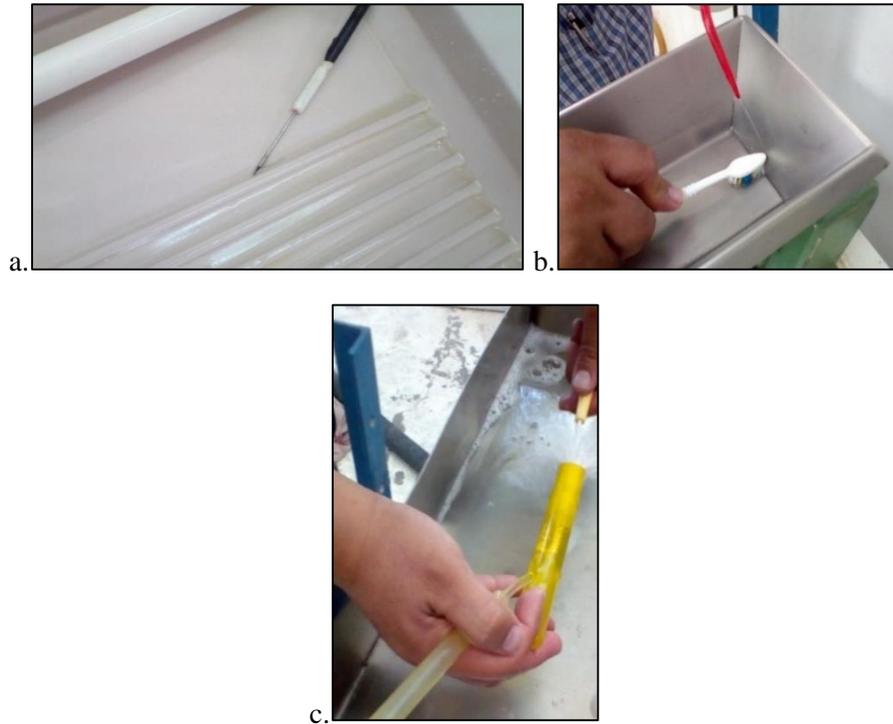


Figura 27. a), b) y c) Equipo de mesa Wilfley siendo lavado.

Se trabajó con las fracciones obtenidas del tamizado excepto con las fracciones >20 , 20, y 50 por considerarse demasiado gruesas dando una probabilidad muy baja de encontrar zircones en ellas. La primera muestra en trabajarse fue la TD1701 desde los tamaños más finos (Tamiz <120) hasta los más gruesos (Tamiz 60) (Figura 28).



Figura 28. Mesa Wilfley trabajando. Se observa la muestra dispersándose de acuerdo con la densidad de los distintos grupos de minerales también se observan las bolsas de recolección.

La primera muestra en pasarse por la mesa Wilfley fue la TD1701 (Tonalita) seguida de las muestras TD1702 (Cuarzo-diorita) y la TD1703 (Arcosa lítica) respectivamente. Se pasó cada una de las fracciones previamente tamizadas comenzando por la malla 60 hasta la <120. El tiempo promedio de separación fue de 2 horas por muestra (aprox. 6 horas en total). El promedio de agua utilizada fue de 720 litros para cada muestra, 2160 litros en total. Las muestras húmedas se secaron en cajas petri de cristal de 100 mm de diámetro, colocándolas bajo una lámpara de luz infrarroja (Figura 29).

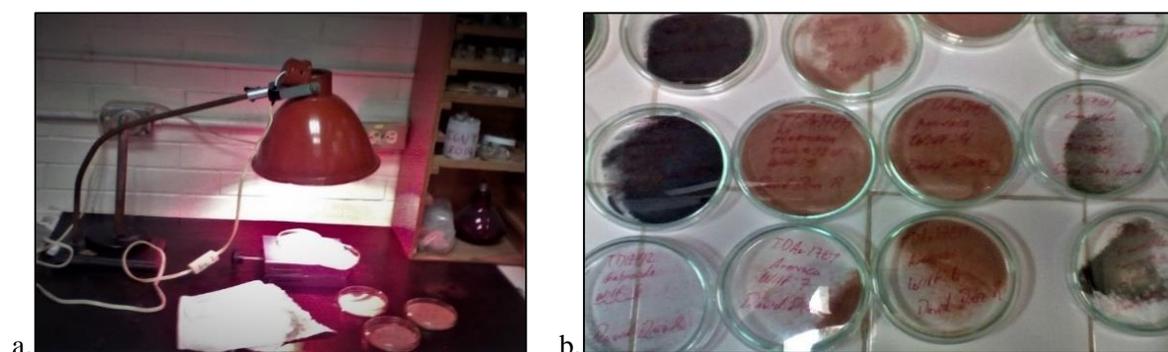


Figura 29. a) Muestras secándose con la lámpara de luz infrarroja. b) Muestras Secas y clasificadas dentro de las cajas petri.

6.3d Separación magnética

Separador magnético isodinámico (Frantz)

Es un equipo de separación de minerales por susceptibilidad magnética. Fue desarrollado por el Ingeniero Samuel G. Frantz a mediados del siglo pasado en la universidad de Princeton, EU. Su principio básico el de generar un campo magnético proporcional a una corriente eléctrica sobre un área específica. El equipo está compuesto por un electroimán de intensidad variable entre 0.05 a 1Amp y cuyos polos son dos piezas metálicas alargadas dispuestas en forma paralela y separadas por un canal. Otro componente importante es un riel de dos canales por donde se vierte la muestra y los minerales se separan al ser afectados por el campo magnético. A este riel se le induce una vibración para que la muestra fluya y se esparza. Este conjunto se inclina frontal y lateralmente a con un ángulo ajustable (Frantz, 1936). Su objetivo es separar los minerales de una muestra de roca triturada según la susceptibilidad magnética de cada mineral. El electroimán puede adaptarse al 95 % de las susceptibilidades magnéticas de los distintos minerales (Figura 30).

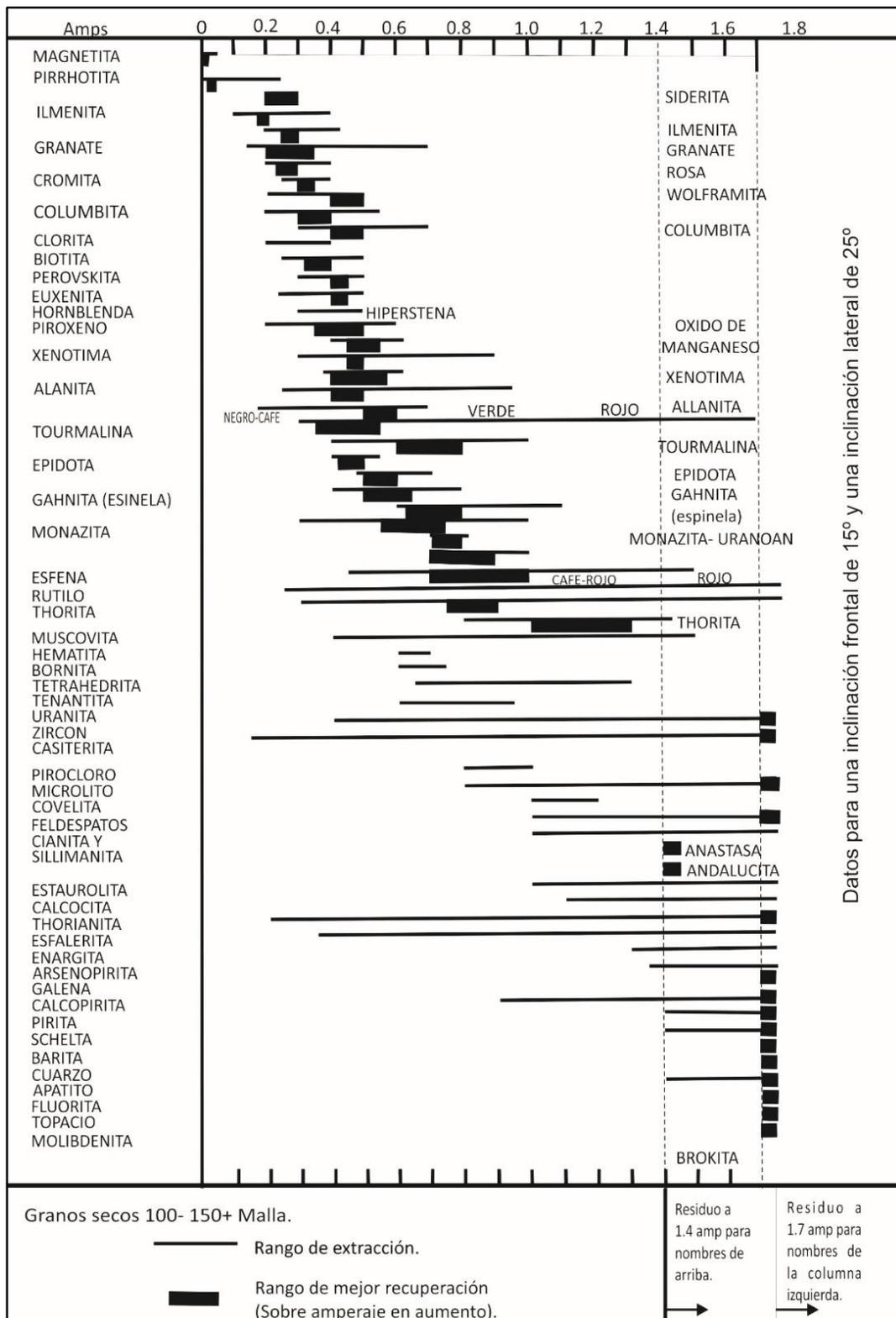


Figura 30. Susceptibilidades magnéticas de minerales comunes para el separador magnético isodinámico Frantz. Las líneas gruesas indican los valores frecuentes, las líneas delgadas indican todos los valores que se han medido (Datos obtenidos de Rosenblum, 1958 y Flinter, 1959).

Los zircones poseen una susceptibilidad magnética muy baja por lo que se consideró innecesario usar la mesa Frantz en este trabajo. En su lugar, las fracciones magnéticas se removieron usando un imán anular de ferrita y una bolsa plástica limpia para almacenarlas. El proceso seguido fue el siguiente:

- Se voltea la bolsa de adentro hacia afuera y se coloca el imán dentro de ella. Después el imán se pasa por encima de la muestra a una distancia corta para atraer a los componentes magnéticos.
- Una vez que la fracción magnética fue separada, se voltea nuevamente la bolsa de manera que los minerales queden dentro de la bolsa y el imán afuera. La bolsa se cierra y se etiqueta con la clave de la muestra correspondiente (Figura 31).

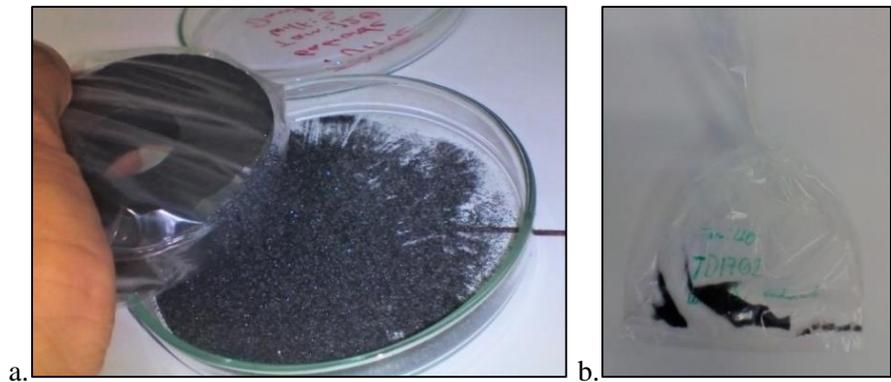


Figura 31. a) Proceso de separación de fracciones ferromagnéticas usando el imán y la bolsa plástica. b) Bolsa que contiene la fracción magnética.

6.3e Separación por densidad en Líquidos Pesados

La técnica de separación de minerales utilizando líquidos pesados de densidad alta consiste en separar las fases pesadas de las fases ligeras de una mezcla de minerales haciéndolos flotar o sedimentarse en un líquido con densidad conocida. Cuando se vierte una muestra en este líquido se genera una estratificación de minerales en función de las distintas densidades de las fases minerales. Cada zona estratificada se recupera, primero se recuperan los de mayor densidad luego los de intermedia y al final las fases ligeras como plagioclasas y cuarzo.

Conociendo la densidad promedio del mineral deseado se deduce en qué fase se encontrará. El comportamiento de la muestra puede describirse mediante la siguiente ecuación (Drzymala, 2007).

$$F = F_c - F_w = m_p g - m_c g = v \rho_p g - v \rho_c g = (\rho_p - \rho_c) v g$$

Dónde: F =Fuerza resultante, F_c =Fuerza de gravedad, F_w =Fuerza de flotación, m_p =Masa de partículas, m_c =Masa del líquido desplazado, g =aceleración de la gravedad. ρ_p =Densidad de partículas, ρ_c =Densidad del líquido, V =Volumen de partículas.

F es la fuerza resultante que determinará la estratificación de las partículas en el líquido. Existen varios líquidos con densidades conocidas que se pueden usar. Las densidades de los líquidos se especifican para condiciones de temperatura y presión específicas, casi siempre para 1atm y 20°C (Tabla 8).

Líquido	Densidad (g/cm ³) (a 1atm y 20°C)
Metatungstato de amonio NH ₄ (6H ₂ W ₁₂ O ₄₀)	2.4
Bromoformo (CHBr ₃)	2.8899
Tetrabrometano (C ₂ H ₂ Br ₄)	2.9672
Metatungstato de litio Li(6H ₂ W ₁₂ O ₄₀)	3.2
Politungstato de sodio [Na ₆ (H ₂ W ₁₂ O ₄₀)]	1.0 – 3.3
Yoduro de metileno (CH ₂ I ₂)	3.3250
Solución de Clereci	4.28 – 4.85

Tabla 8. Líquidos pesados comúnmente usados y sus densidades. (Pereyra, 2003).

Politungstato de Sodio

Uno de los líquidos pesados más recomendables para separar zircones es el politungstato de sodio Na₆(H₂W₁₂O₄₀) en solución con H₂O. Sus principales ventajas son su densidad variable a temperatura ambiente (al agregarse un solvente como agua destilada, acetona o dimetilformamida), y su baja toxicidad. La densidad máxima que puede alcanzar es de aproximadamente 3.3 g/cm³. El manejo de este compuesto supone un bajo riesgo por contacto con la piel o inhalación. Sus residuos pueden lavarse del equipo y de la muestra mineral al diluirse. Para usar el politungstato se prepara una disolución con 20% politungstato y 80% Agua destilada. Esta solución tendrá una densidad de unos 3 g/cm³ en condiciones normales de presión y temperatura que puede medirse con un densímetro de flotación. Para que la solución alcance su densidad máxima (~3.3 g/cm³) se evapora lentamente, perdiendo un porcentaje de agua.

Los minerales con una mayor densidad se hundirán mientras que los de menor densidad flotarán o quedarán suspendidos dentro la solución. Dado que los zircones tienen una densidad promedio de 4.65 g/cm^3 , se hundirán.

Para el trabajo de la presente tesis se utilizó una solución de politungstato de sodio ($\text{Na}_6[\text{H}_2\text{W}_{12}\text{O}_{40}]$) en agua (H_2O) Mili-Q. Este es un líquido pesado de densidad variable y baja toxicidad. El agua se obtuvo mediante el uso de un sistema de purificación de agua marca Millipore® modelo Mili-Q Plus. Se obtiene agua bidestilada con grado reactivo de resistividad de $18.2 \text{ M}\Omega/\text{cm}$ a temperatura ambiente. El sistema purifica el agua mediante filtrado, ósmosis inversa y radiación UV. El equipo de laboratorio consiste en un embudo Gibson con llave de paso, dos vasos de precipitado (uno para contener la fracción mineral pesada y el otro para contener la fracción ligera), una piseta con agua Mili-Q, embudos de plástico o de vidrio que quepan en los vasos y secciones circulares de papel filtro que se colocan sobre los embudos. El papel filtro usado es marca Whatman® grado 40 con diámetro de poro de $8 \mu\text{m}$ (Figura 32).

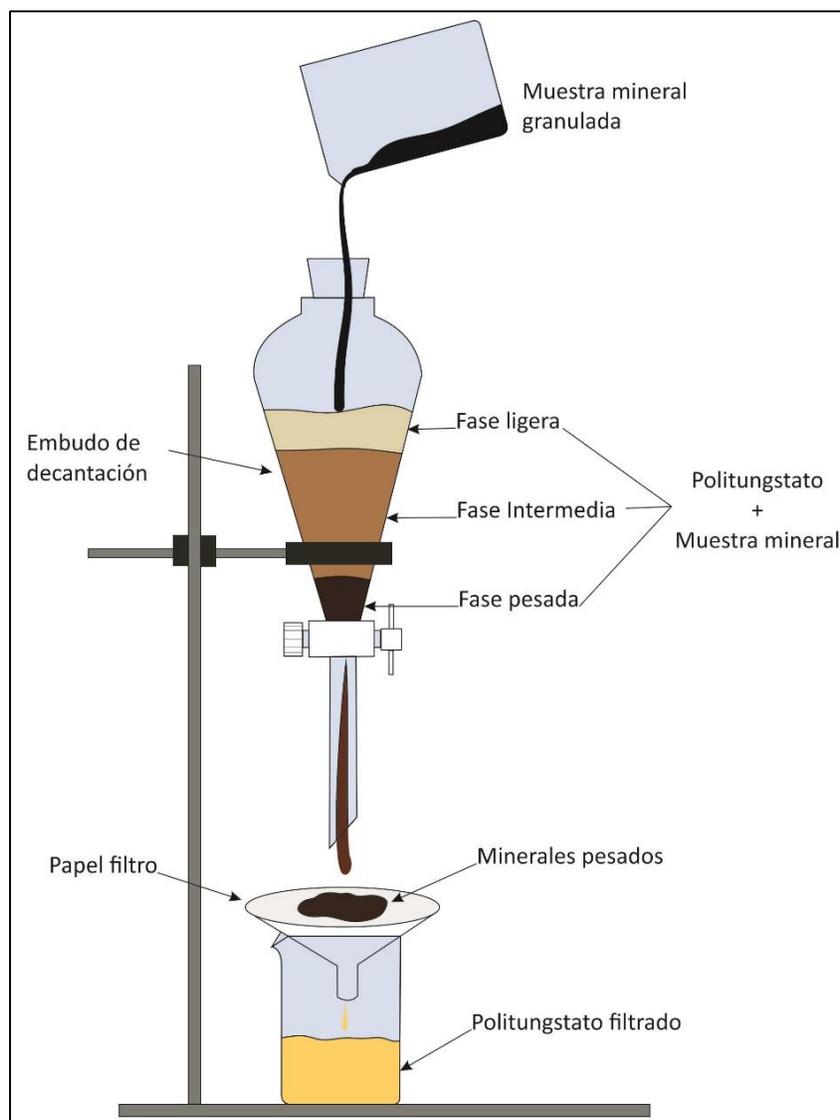


Figura 32. Esquema de la separación de minerales por líquidos pesados.

La solución es un coloide por lo que, al evaporar el agua, se sobresatura de politungstato. Mientras más saturada este la solución, el politungstato comenzará a solidificarse. La densidad máxima de la solución se alcanza en el momento en que se forma un coagulo en la superficie de la solución. Para corroborar que la densidad del politungstato sea la adecuada, se utiliza un densímetro de flotación y una probeta graduada (Figura 34). La precisión de la separación está en función de un buen control de la densidad de los líquidos pesados. La solución se preparó usando un vaso de precipitados, un embudo y papel filtro para remover impurezas.

El politungstato de sodio se colocó sobre el papel y se le agrega poco a poco agua Mili-Q con una piseta para que la solución se filtre en el vaso de precipitado (Figura 33).

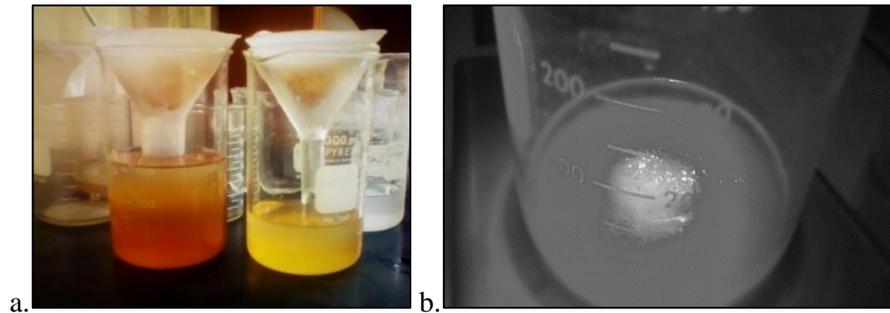


Figura 33. Preparación de la solución de politungstato de Sodio. a) Se filtra el politungstato con un filtro de papel y agua Mili-Q para remover impurezas. b) Coágulo formado en la superficie de la solución cuando esta alcanza su densidad máxima por saturación del politungstato.



Figura 34. Probeta y densímetro de flotación usado para determinar la densidad de la solución politungstato de sodio.

El proceso de separación por líquidos pesados se realizó dentro de una campana de gases en el laboratorio de separación de minerales perteneciente al LUGIS.

- Se colocó una cantidad suficiente de solución en el embudo Gibson para separar la muestra sin que se saturara de partículas minerales.
- Se vertió la muestra poco a poco en el embudo procurando que esta no se pegará a las paredes de este y dejándola sumergir en el politungstato.

- Se dejó que los minerales se separen por su densidad hasta que no se observó movimiento aparente de las partículas dentro del líquido.
- La muestra se dividió por su densidad en tres estratos. El estrato superior contenía las partículas ligeras que flotan en la superficie, el estrato intermedio contenía las densidades intermedias y el estrato inferior contenía las partículas pesadas que se precipitan al fondo del embudo y donde se encuentran preferentemente los zircones (Figura 35). Se abre la válvula del embudo Gibson para dejar pasar los minerales y el politungstato. Estos se vierten sobre papel filtro.
- Primero se obtuvo la fracción pesada, seguida de las fracciones intermedia y ligera respectivamente. Algunos minerales quedaron dentro adheridos al embudo, para sacarlos se usó una piseta con agua Mili-Q.
- El politungstato se filtra hacia el vaso y los minerales se quedan sobre el papel filtro. Normalmente una cantidad de politungstato queda atascada en el papel filtro debido a su alta densidad, para recuperarlo se usó la piseta con agua Mili-Q.
- Los minerales se vertieron en una caja petri limpia usando nuevamente la piseta. Se usó una caja para cada fracción (Figura 36).

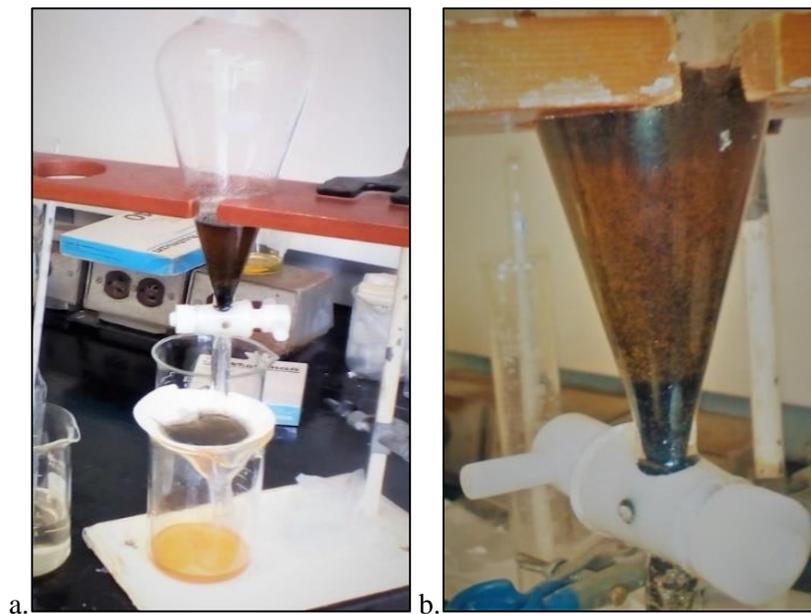


Figura 35. a) Separación de minerales en proceso por líquidos pesados. b) Fracciones pesadas y ligeras separadas por el politungstato de sodio.



Figura 36. Cajas de petri conteniendo la fracción pesada y ligera de una fracción de la muestra TD1702 (Cuarzo-diorita). La bolsa contiene la fracción magnética.

Este proceso se realizó de la misma manera para cada una de las muestras de roca granuladas.

6.3f Concentrado de zircones por separación manual utilizando microscopio estereoscópico con sistema de luz de doble polarización

Esta etapa consiste en separar los cristales de zircón individuales contenidos en la fracción de minerales pesados usando un microscopio con luz transmitida y sistema de campo oscuro (luz de doble polarización). Se buscan visualmente los zircones reconociéndolos por sus propiedades ópticas como relieve y birrefringencia. Los zircones se separan del resto de minerales pesados y se concentran en pequeñas áreas manualmente usando un filamento o punta limpia montada a una empuñadura (Figura 37), este procedimiento también es llamado *handpicking* (Strong y Driscoll, 2016), (Pereyra, 2003).

Este proceso se realizó en el laboratorio de separación de minerales del LUGIS del Instituto de Geofísica de la UNAM. Todo el equipo y las instalaciones pertenecientes al laboratorio fueron descontaminadas previo al proceso. Se usó un microscopio estereoscópico de luz transmitida, una punta de diámetro pequeño (~0.6 mm) y una pipeta ergonómica de volumen variable con punta plástica intercambiable. También se utilizaron cajas petri de cristal limpias grandes (100 mm de diámetro) y pequeñas (40 mm) (Figura 38). El microscopio usado fue un Olympus® SZ11 con objetivo variable (1.8X – 11X).

Para el presente trabajo de tesis se utilizó como punta una espina limpia de cactus montada en un mango de madera. Esta punta presenta la ventaja de ser diamagnética, impermeable y de diámetro suficientemente pequeño para separar los cristales.



Figura 37. Equipo utilizado en la separación de zircones por Hand Picking usando un microscopio Olympus® SZ11.

Proceso de separación usando microscopio estereoscópico

- Se vertió agua Mili-Q en una caja petri con muestra mineral, llenándola lo suficiente para poder desplazar la punta y mover los minerales de un lado a otro sin que el agua se derramará fuera de la caja.
- La caja de petri se hizo girar manualmente en sentido horario para concentrar los minerales en el centro de la caja. Se inclina la caja teniendo cuidado de no derramar agua y perder muestra. Esto hace que se forme un abanico de minerales donde estos se esparcirán según su densidad.
- La caja petri se colocó en el microscopio para buscar visualmente los zircones. Se utilizó la punta de cactus para aislar los zircones manualmente del resto de los minerales y juntarlos en un solo concentrado (Figura 38).
- Los zircones fueron colectados usando la pipeta y colocados en otra caja petri pequeña (40 mm) (Figura 39).

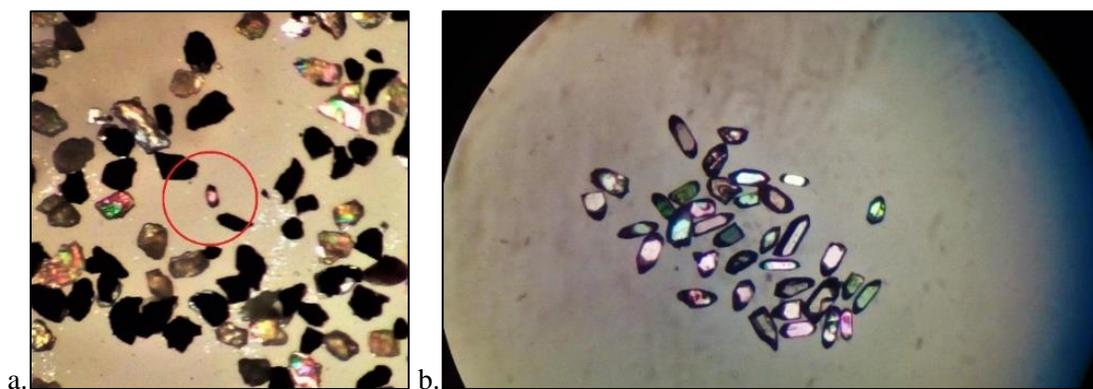


Figura 38. a) Cristal zircón (Señalado con un círculo rojo. b) Concentrado de zircons correspondiente a la muestra TD1701, Wilfley 7.

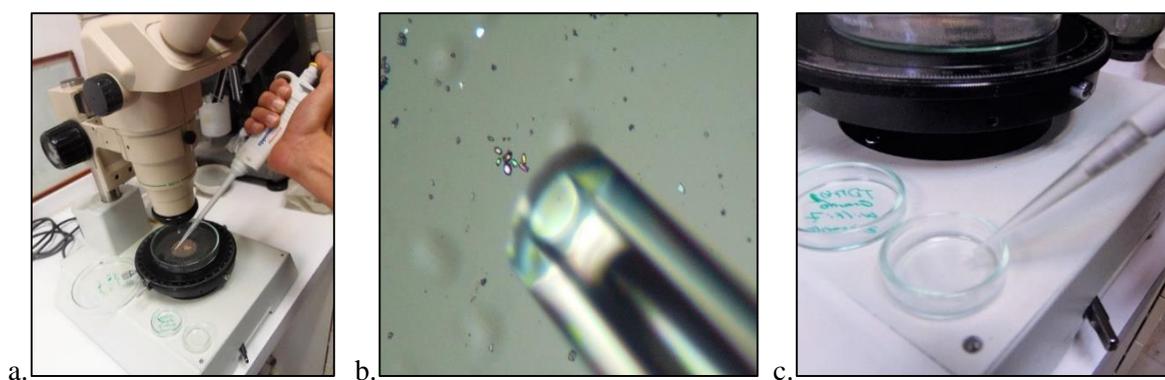


Figura 39. a) b) y c) Zircons siendo colectados usando una pipeta y una caja petri de 40mm.

Los zircons de cada muestra se almacenaron en cajas petri individuales. Para cada muestra se utilizó una punta de pipeta distinta. También se utilizó una punta de cactus distinta para cada muestra. De la muestra TD1701 se obtuvieron aproximadamente 120 zircons. La característica más común en la mayoría de estos zircons es que los cristales son alargados en proporción a su ancho (Figura 40). El tamaño promedio del largo de los cristales es de $141.58\mu\text{m}$.

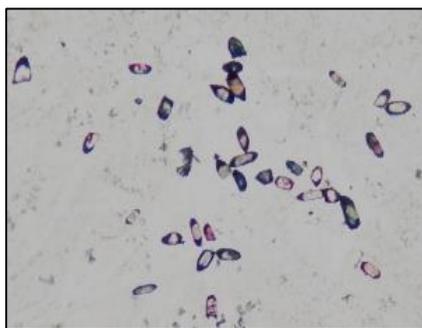


Figura 40. Zircons de la muestra TD1701, Wilfley 7.

Para la muestra TD1702 se obtuvieron 25 zircones en toda la muestra. Su característica más común es que su largo no es mucho mayor a su ancho (Figura 41). El tamaño promedio del largo de los cristales es de $277.93\mu\text{m}$.

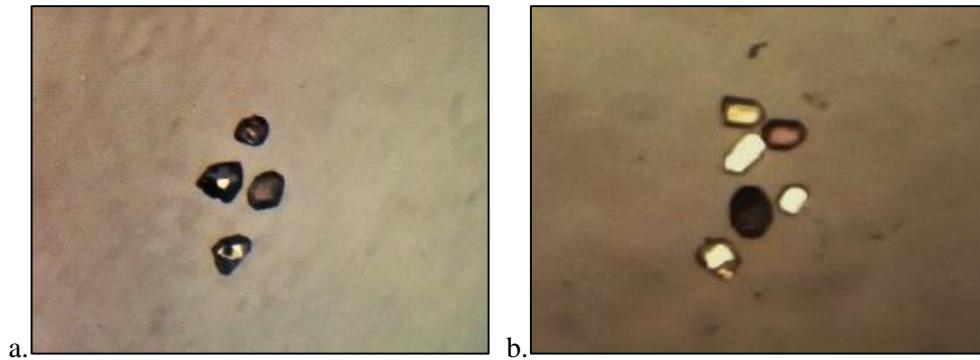


Figura 41. Zircones de la muestra TD1702. a) Tamiz:100, Wilfley:5. b) Wilfley 7.

Para la muestra TD1703 se obtuvieron más de 230 cristales. Su característica más común es que los cristales se encuentran rotos y con sus bordes redondeados (Figura 42). Esto se debe a alteración por procesos erosivos. El tamaño promedio del largo de los cristales es de $304.22\mu\text{m}$.

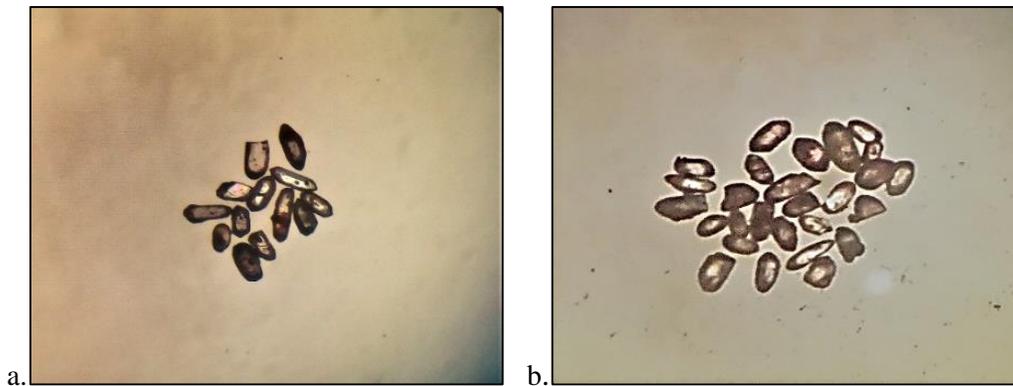


Figura 42. Zircones de la muestra TD1703. a) Tamiz:1200, Wilfley:5. b) Wilfley 7.

6.4 Separación de minerales pesados por decantación

6.4a Antecedentes

Este método de decantación para la separación de minerales pesados fue desarrollado en el Laboratorio Universitario de Geoquímica Isotópica (LUGIS) por el ingeniero José Teodoro Hernández Treviño en colaboración con alumnos de distintos grados. El desarrollo de este

método nace de la necesidad de obtener concentrados de minerales pesados en tiempos cortos de trabajo a un bajo costo y, principalmente, donde se tenga certidumbre sobre la pulcritud de los minerales. Este método se ha aplicado con anterioridad a más de 50 muestras obteniendo resultados positivos y reproducibles, sin embargo, no se había realizado algún experimento con el objetivo estricto de validarlo y compararlo con el método de separación por mesa Wilfley, el cual ha sido el método más usado en estudios de geocronología por el método U-Th-Pb. Las de este método son las siguientes (Figura 43).

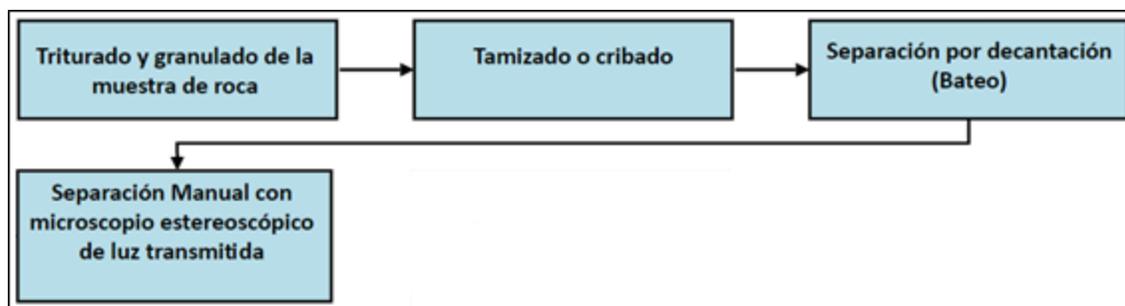


Figura 43. Diagrama de las etapas del método para separar zircones por decantación.

6.4b Quebrado y trituración de la muestra de roca

El método de separación de minerales por decantación requiere una cantidad menor de muestra de roca granulada para trabajar en comparación con el método por mesa Wilfley. El proceso de trituración y granulado se puede realizar con una cantidad menor de bloques de la muestra. Para la obtención de zircones se pueden granular de 1 a 2 kg de la muestra según el tipo de roca que se esté trabajando. El método por decantación puede realizarse eficazmente usando únicamente una trituradora de quijadas o una prensa hidráulica. Para este trabajo únicamente se utilizó una Prensa hidráulica de 50 toneladas.

6.4c Tamizado de la muestra

El tamizado de la muestra para el método por decantación se realiza usando coladores plásticos convencionales de malla (cedazo) fina. Los coladores se escogen bajo el mismo criterio que los tamices, deben tener aberturas de malla suficientemente grande para dejar pasar los minerales de interés y retener las partículas más gruesas. El tamaño aproximado de las aberturas de la trama es de 0.6 x 0.6 mm (600 x 600 μm) (Figura 44), equivalente a un tamiz número 30. Este tamaño de partícula de arena gruesa en la clasificación de Udden-Wentworth (Wentworth, 1922). Para separar zircones el tamaño de las aberturas de las mallas

debe ser igual o mayor al tamaño de malla del tamiz número 200. Los coladores usados cumplen este requisito y permiten el paso de todos los tamaños de cristales de zircón sin sesgar la muestra. Estas mallas son desechables por lo que solo se utilizan para una muestra y se pueden substituir por mallas para serigrafía con el mismo tamaño de trama o con tramas variables si se requiere un tamaño en específico. Este proceso se realizó en el laboratorio de separación de minerales del LUGIS. Se usaron coladores nuevos para cada muestra de roca para evitar riesgo de contaminación.

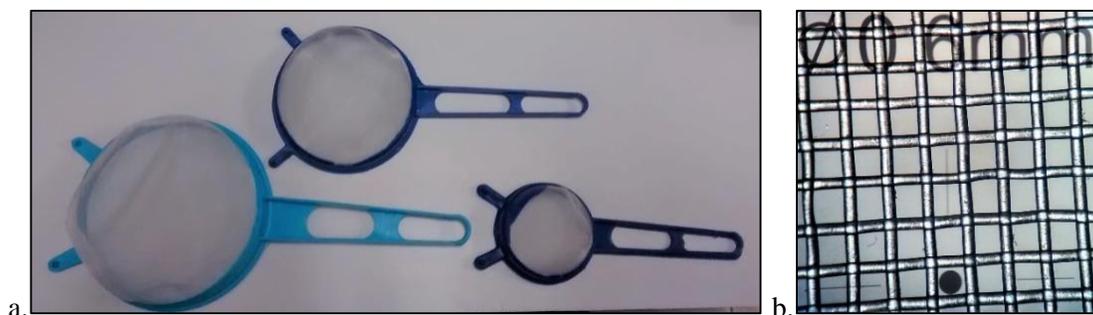


Figura 44. a) Ejemplos de coladores de plástico usados para tamizar. b) Apertura (trama ϕ) igual a 0.6 x 0.6 mm (600 x 600 μ m).

Proceso de Tamizado

- Se usó la pala para tomar una cantidad de muestra y se hizo pasar por el colador plástico de manera que las partículas minerales de menor tamaño fueran depositadas dentro de una capsula de porcelana de 250ml (Figura 45).
- Las partículas de mayor tamaño que quedan en el colador se devuelven a la bolsa que contiene el total de la muestra.
- Este proceso se repitió hasta alcanzar una cantidad de partículas minerales que sea suficiente para el posterior proceso de decantación.



Figura 45. Tamizado de muestra usando coladores de plástico.

6.4d Separación de minerales por densidad

Este proceso se basa en la capacidad de las partículas de flotar o sumergirse en un líquido por su densidad. El líquido usado es agua destilada o Mili-Q ($\rho \approx 1\text{g/cm}^3$).

- Dentro de un vaso de precipitados de 250 ml se vierten aproximadamente 20 gr de muestra tamizada y se agrega agua destilada hasta llenar $\frac{3}{4}$ partes del vaso.
- La mezcla se agita con un agitador de virio o una espátula metálica de laboratorio con movimientos circulares durante 3 a 5 segundos, de manera que los minerales más densos se sedimenten en el fondo del vaso.
- Antes de que la mezcla deje de moverse, se vierte el agua fuera del vaso hacia otro recipiente. La mezcla desechada consiste en agua y minerales ligeros.
- El proceso se repite para desechar la mayor cantidad de minerales ligeros posible. Esto se consigue cuando el agua se ve translúcida, es decir que no contiene partículas ligeras flotando (Figura 46).
- Después de este proceso el volumen de la muestra se verá reducido a una décima parte del volumen original. La mezcla de minerales que queda dentro del vaso de precipitados contiene fracciones pesadas como zirrones, monacitas, magnetitas etc. junto con otros minerales menos densos. Estos se vierten fuera del vaso usando una piseta con agua destilada hacia una capsula de porcelana más grande, de 2.5 l.

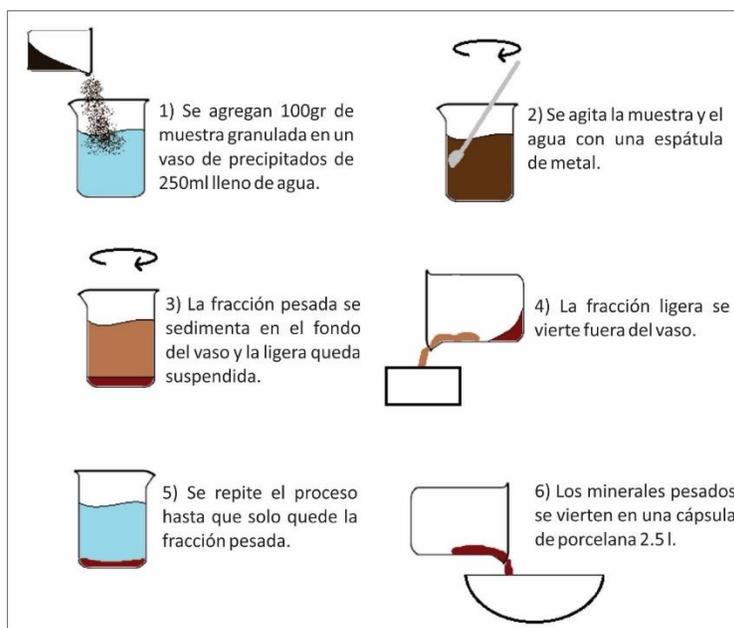


Figura 46. Esquema del proceso de separación de las fases pesadas y ligeras.

6.4e Separación de minerales pesados por bateo usando capsula de porcelana.

Después del proceso de decantación el volumen de la muestra se reduce en un 95%, quedando un 5% de minerales pesados de donde se obtiene la fracción cristalina deseada y los zircones representan menos del 1%. En el presente trabajo se busca separar zircones, sin embargo, el método puede usarse para separar cualquier otra fracción mineral pesada ($\rho \approx 4.7 \text{ g/cm}^3$).

- La muestra dentro de la capsula debe estar apenas sumergida en agua destilada o Milli-Q. Se lleva la muestra al centro de la capsula. La capsula se gira manualmente con movimientos delicados circulares de forma que la muestra gire en la misma dirección. Mientras la capsula se gira, también se inclina lentamente.
- Esta acción hará que se segreguen los minerales por sus distintas densidades, lo que se va a manifestar en un cambio de color en el fondo de la muestra. Los minerales más pesados se distinguen por colores oscuros. Sobre estos se observan minerales leucocráticos como cuarzo, plagioclasas y algunos accesorios.
- Para desechar la fase más ligera se inclina la cápsula de porcelana mientras se agita. Esto provoca que los minerales pesados se precipiten y salgan del agua mientras que los minerales ligeros son arrastrados. Poco a poco se generará una estela o rastro de minerales pesados en la superficie de la cápsula.
- Sin dejar de mover la cápsula, se vierte el agua junto con los minerales ligeros hacia otro recipiente de manera que en la cápsula solo quede la estela de los minerales pesados.
- Este proceso se repite agregando agua con la piseta un número suficiente de veces para que solo queden los minerales más pesados, estos se distinguen por su coloración oscura y por desplazarse lentamente si se inclina la cápsula.
- El concentrado mineral pesado se vierte en una caja de petri usando la piseta.
- La caja petri se observa bajo un microscopio polarizador para corroborar que los minerales de interés se encuentren en el concentrado final (Figura 47).

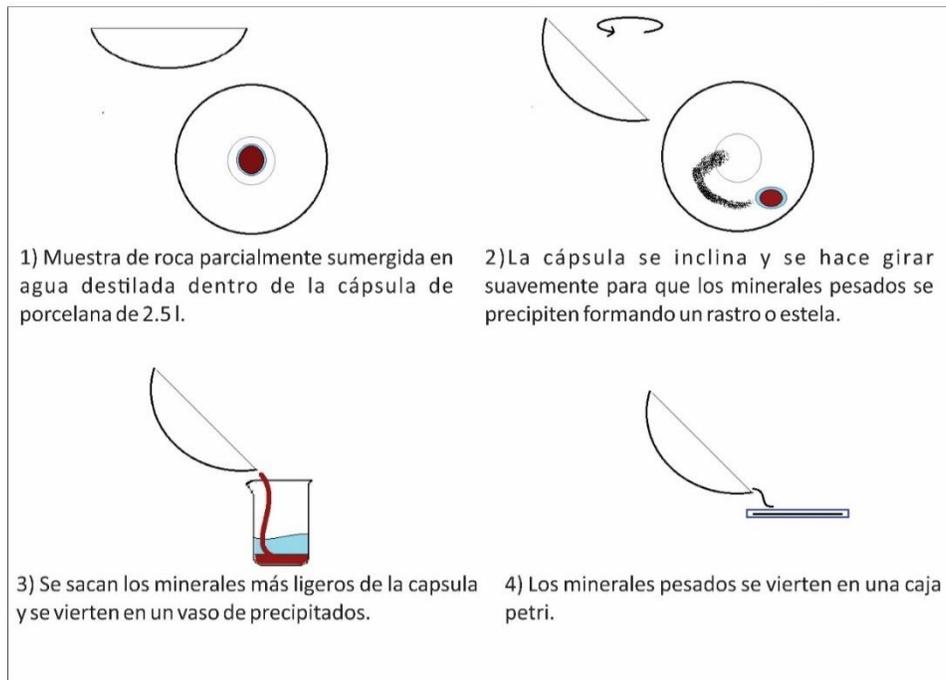


Figura 47. Esquema del proceso de separación de minerales pesados por decantación.

Si el bateo se realiza incorrectamente, ya sea por un exceso de agua o un exceso de fuerza al agitar la capsula, los minerales pesados pueden ser arrastrados junto con la fracción ligera. En tal caso esta fracción puede regresarse a la capsula de porcelana para repetir el proceso.

Para el proceso de decantación se utilizó una capsula de porcelana de 100 ml y otra de 2.5 l, dos vasos de precipitado de 250 ml, una cucharilla metálica y una piseta llena de agua Milli-Q. El material y las instalaciones se limpiaron cuidadosamente antes del proceso. La caja de petri se observó en un microscopio estereoscópico de luz polarizada Olympus® SZ11 para comprobar que los zircones se encontraban en el concentrado mineral. Los minerales que se vertieron en la capsula pequeña (100 ml) se almacenan como una precaución. Estos pueden volver a batearse regresándolos a la capsula grande (2.5 l) (Figura 48).

La decantación se realizó 3 veces para las muestras TD1701 y TD1703. Para la muestra TD1702 se realizó 5 veces. Esto fue el objetivo de obtener una cantidad mayor de zircones. En promedio cada proceso de decantación por separado tardó 20 minutos en realizarse (aprox. 3 horas con 40 minutos) sin contar el tiempo en que se lavaron el equipo y área de trabajo. El promedio de agua utilizada por cada proceso de decantación fue de 2 litros sin contar el agua utilizada en la limpieza de del equipo. Por lo tanto, el promedio de agua total usado fue de 16 litros para la separación por decantación.



Figura 48. Proceso de Decantación para la muestra TD1702 (Cuarzo-diorita). a) La muestra se pesa en una balanza de laboratorio, se trabajó con 20 g de muestra por cada proceso de decantación. b), c) y d) las partículas menos densas se desechan. Al final quedan las partículas más densas en el vaso. e) La fracción densa se vierte en la capsula de porcelana de 2.5 l. f) Se hace un primer bateo de la muestra desechándose la fracción menos densa. g) Un segundo bateo nos permite separar los minerales más densos como los zircons. h) Las partículas más densas se vierten en una caja petri. i) Los minerales obtenidos se observan en un microscopio estereoscópico de luz polarizada. j) Los zircons son reconocidos visualmente y separados mediante Hand Picking.

6.4f Separación y colecta manual de zirrones usando microscopio estereoscópico

Se realizó la búsqueda y colecta de zirrones en los concentrados de minerales obtenidos de la separación por líquidos pesados de forma manual usando un microscopio estereoscópico de luz transmitida, una punta de diámetro pequeño (~0.6 mm) y una pipeta ergonómica de volumen variable con punta plástica intercambiable marca Eppendorf®. También se utilizaron cajas petri de cristal limpias grandes (100 mm de diámetro) y pequeñas (40 mm). El microscopio usado fue un Olympus® SZ11 con objetivo variable (1.8X – 11X). Se utilizó como punta una espina limpia de cactus montada en un mango de madera. Este proceso se realizó en el laboratorio de separación de minerales del LUGIS del Instituto de Geofísica de la UNAM. Todo el equipo y las instalaciones pertenecientes al laboratorio fueron cuidadosamente limpiados y descontaminados previo al proceso.

- Se vertió agua Mili-Q en una caja petri con muestra mineral, llenándola lo suficiente para poder desplazar la punta y mover los minerales de un lado a otro sin que el agua se derramará fuera de la caja.
- La caja de petri se hizo girar manualmente en sentido horario para concentrar los minerales en el centro de la caja. Se inclina la caja teniendo cuidado de no derramar agua y perder muestra. Esto hace que se forme un abanico de minerales donde estos se esparcirán según su densidad (Figura 49).

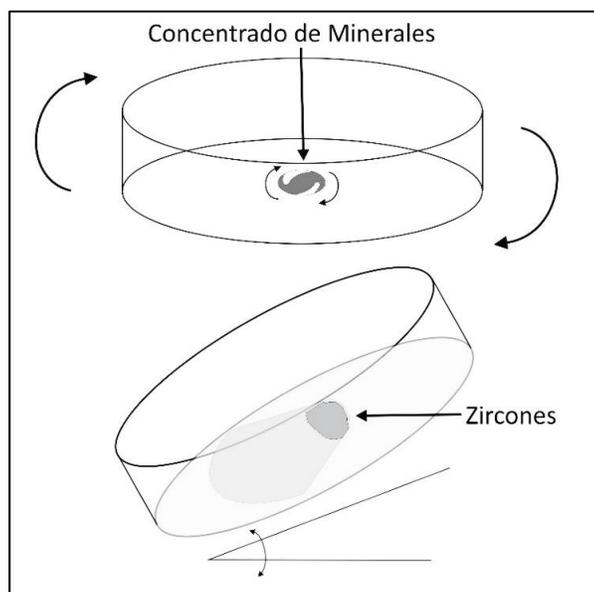


Figura 49. Movimiento realizado para concentrar los zirrones en el centro de la caja petri.

- La caja petri se colocó en el microscopio Olympus® SZ11 para buscar visualmente los zirrones. Se utilizó la punta de cactus para aislar los zirrones manualmente del resto de los minerales y juntarlos en un solo concentrado.
- Los zirrones fueron colectados usando la pipeta y colocados en otra caja petri pequeña (40 mm).

De la muestra TD1701 se obtuvieron aproximadamente 100 cristales. La característica más común en la mayoría de estos zirrones es que los cristales son alargados en proporción a su ancho (Figura 50). El tamaño promedio del largo de los cristales es de $109.77\mu\text{m}$.



Figura 50. Zirrones de la muestra TD1701.

Para la muestra TD1702 se obtuvieron 17 zirrones de toda la muestra. Su característica más común es que los cristales es que su largo no es mucho mayor a su ancho (Figura 51). El tamaño promedio del largo de los cristales es de $224.53\mu\text{m}$.



Figura 51. Zirrones de la muestra TD1702.

Para la muestra TD1703 se obtuvieron aproximadamente 200 cristales detríticos. Su característica más común es que los cristales se encuentran rotos y con sus bordes

redondeados (Figura 52). Esto se debe a la abrasión por procesos erosivos. El tamaño promedio del largo de los cristales es de $223.43\mu\text{m}$.

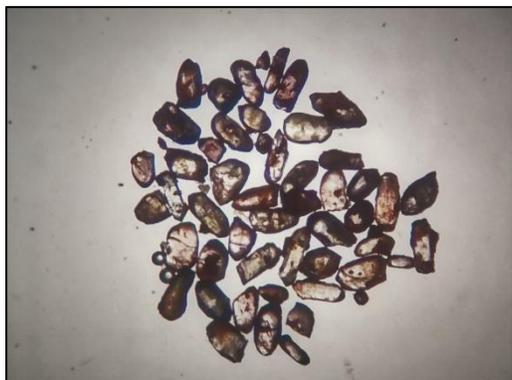


Figura 52. Zirrones de la muestra TD1703.

6.5 Obtención de edades por método U-Pb.

Los cristales de zircón a datarse fueron separados y montados en resina epóxica (Figura 53). Las mediciones de las concentraciones de uranio radioactivo y plomo radiogénico se realizaron en el Laboratorio de Estudios Isotópicos (LEI) del Centro de Geociencias, UNAM. Se realizaron 54 mediciones para los zirrones obtenidos por el método de mesa Wilfley y 99 para los zirrones obtenidos por el método de Decantación (Anexos 1 a 4). Las mediciones se realizaron utilizando un sistema de ablación láser de ex cimeros *Resonetics M050 193 nm ArF*, acoplado a un espectrómetro de masas cuadrupolar con fuente de plasma inductivamente acoplado (ICP-MS). Para la ablación se usó una fluencia de $6\text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$, un spot de ablación de $44\mu\text{m}$ de diámetro y una frecuencia de 5 Hz, la tasa de penetración es de $0.15\mu\text{m}$ por cada disparo (Solari et al., 2010) Los datos obtenidos fueron tratados y corregidos mediante el software Density Plotter. De las relaciones isotópicas se obtuvieron las edades de mínimas de deposición para la muestra TD1703 (arcosa lítica) y las edades de cristalización de los zirrones detríticos contenidos en la muestra. El software también arroja las gráficas de concordia y las gráficas de distribución de edades en función del número de zirrones datados (Figuras 56-59).



Figura 53. Ejemplo de zirrones de la muestra TD1703 (Arcosa lítica) montados en resina epóxica para datación por el método de U-Pb mediante LA ICP-MS. a) Zirrones obtenidos con el método por decantación. b) Zirrones obtenidos con el método por mesa Wilfley

Capítulo 7. Resultados

7.1 Cantidad y tamaño de zirrones obtenidos con cada método

Se hizo conto la cantidad de los zirrones separados con cada método (Tabla 9). También se hizo la medición del tamaño de los cristales mediante un ocular graduado del microscopio. Se calculó el promedio de los tamaños de los cristales, también se reporta el tamaño del cristal más grande y el más pequeño observados de cada muestra (Tabla 10).

Se obtuvo una cantidad mayor de zirrones con la mesa Wilfley. Esto sucede para cada una de las muestras. Con la Mesa Wilfley se obtienen cristales de mayor tamaño. En promedio. Sin embargo, con el método por decantación se obtienen poblaciones más heterogéneas de zirrones. Esto evidencia hay tamaños de cristales que no se obtienen con la mesa Wilfley.

	Cantidad de zirrones	
	Wilfley	Decantación
TD1701 (Tonalita)	~120	~100
TD1702 (Cuarzo-diorita)	25	17
TD1703 (Arcosa Lítica)	~230	~200

Tabla 9. Cantidades de zirrones obtenidos con cada método de separación.

Tamaño	TD1701 (Granito)		TD1702 (Cuarzo-Diorita)		TD1703 (Arcosa-Lítica)	
	Tamaño cristales (µm)		Tamaño cristales (µm)		Tamaño cristales (µm)	
	Wilfley	Decantación	Wilfley	Decantación	Wilfley	Decantación
Menor	83.9	55.9	138.6	93.3	137.5	93.3
Mayor	279.9	279.9	466.6	373.3	653.3	559.9
Promedio	141.58	109.77	277.93	224.53	304.22	223.43

Tabla 10. Tamaños (Eje más largo) representativos de los zirrones separadas con cada método.

A continuación, se muestra la variación de tamaños de los cristales (figuras 54 y 55).

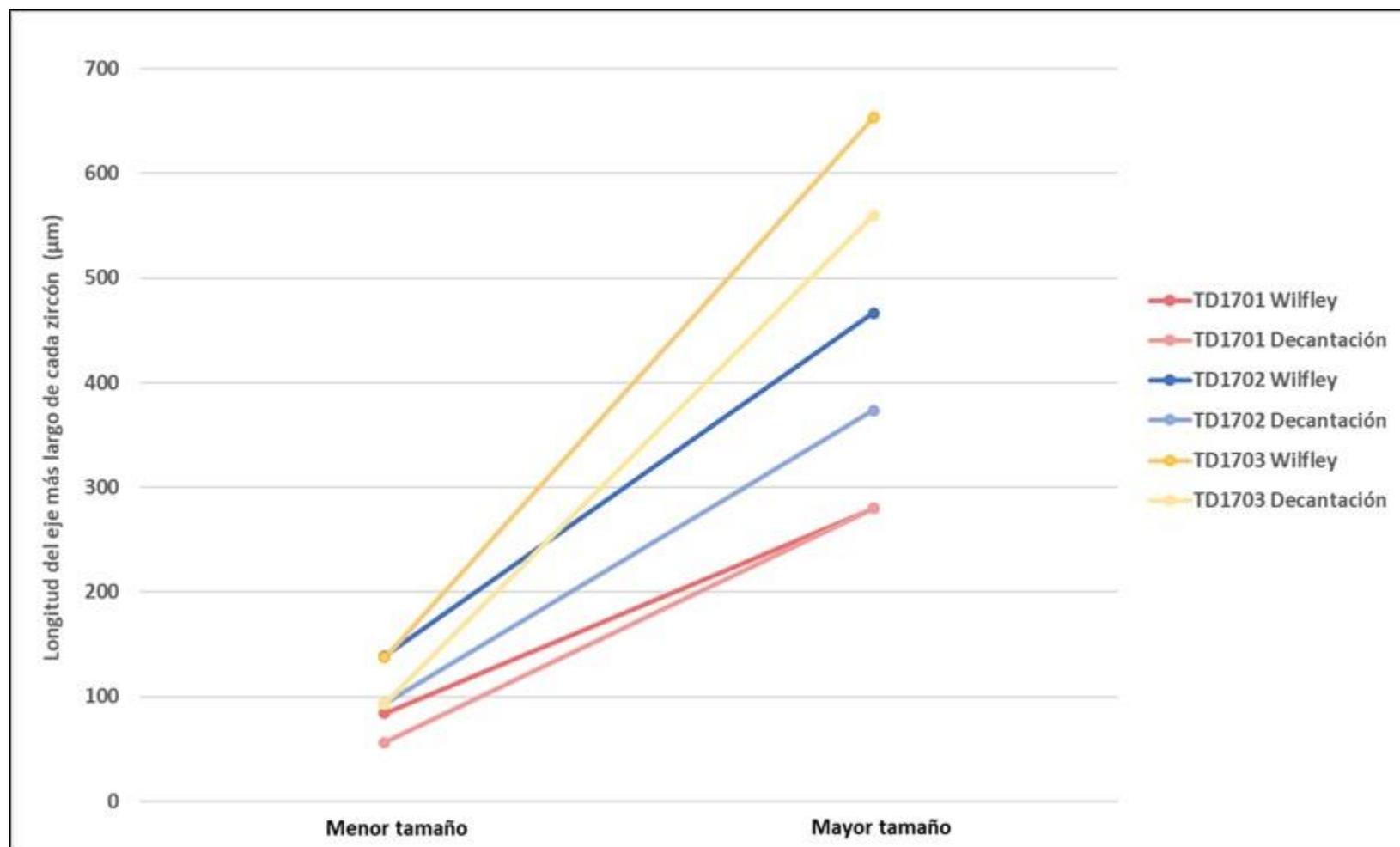


Figura 54. Gráfica de variación del tamaño de las poblaciones de zircones de cada muestra obtenidos por ambos métodos de separación. Cada línea representa la variación de los tamaños desde el más pequeño hasta el más grande.

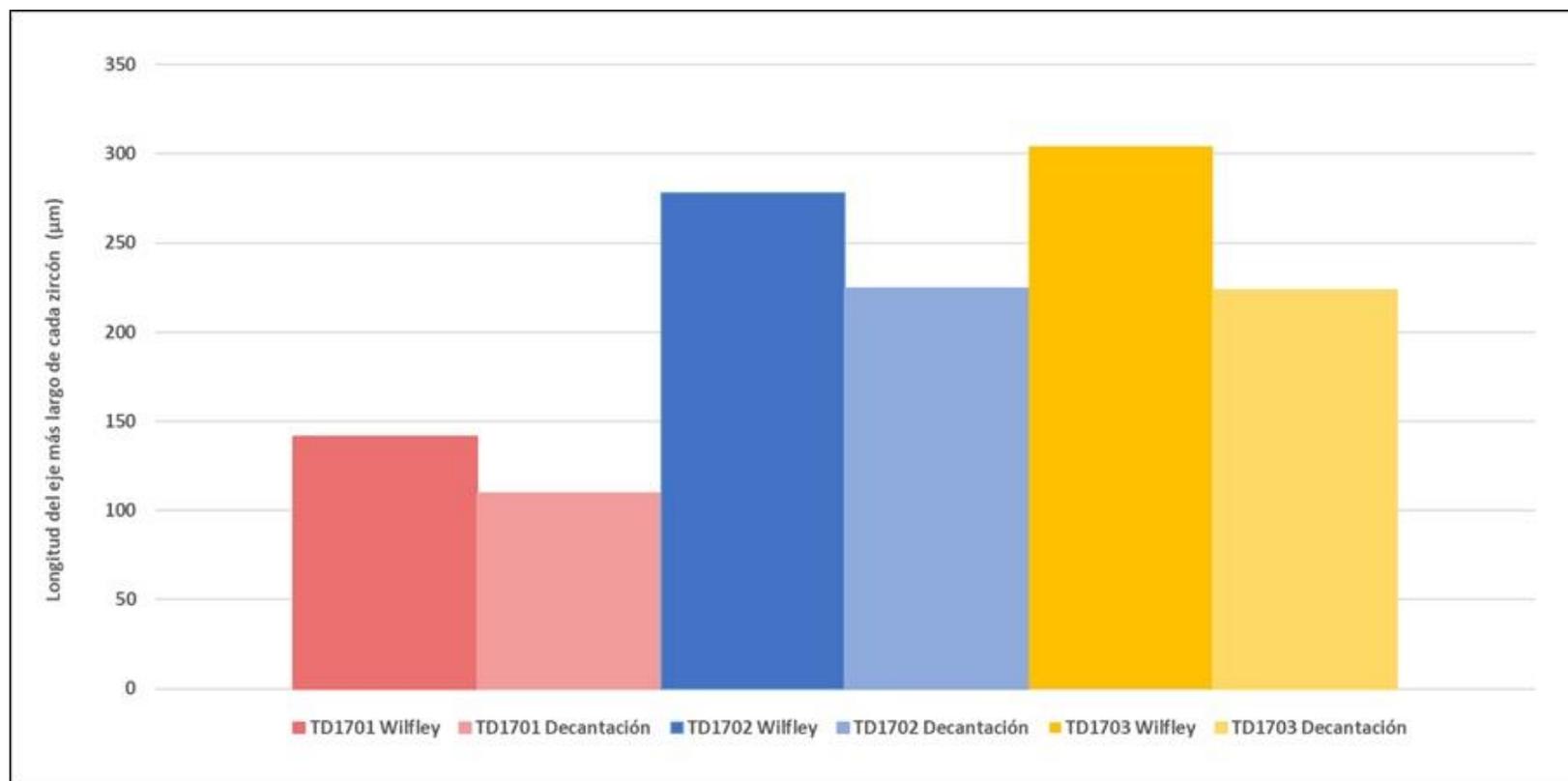


Figura 55. Gráfica de promedios los tamaños de los zircons de cada muestra obtenidos por ambos métodos de separación. Cada barra representa el promedio de los tamaños obtenidos para cada muestra con base al método de separación usado.

7.2 Edades obtenidas para la muestra TD1703 (Arcosa- Lítica)

A continuación, se muestran las gráficas obtenidas mediante los resultados de las mediciones de las concentraciones de uranio radioactivo y plomo radiogénico (Anexos 1-4). Los datos fueron tratados y corregidos mediante el software *Density Plotter*. El software también arroja las gráficas de concordia y las gráficas de distribución de edades en función del número de zircons datados (Figuras 56-59).

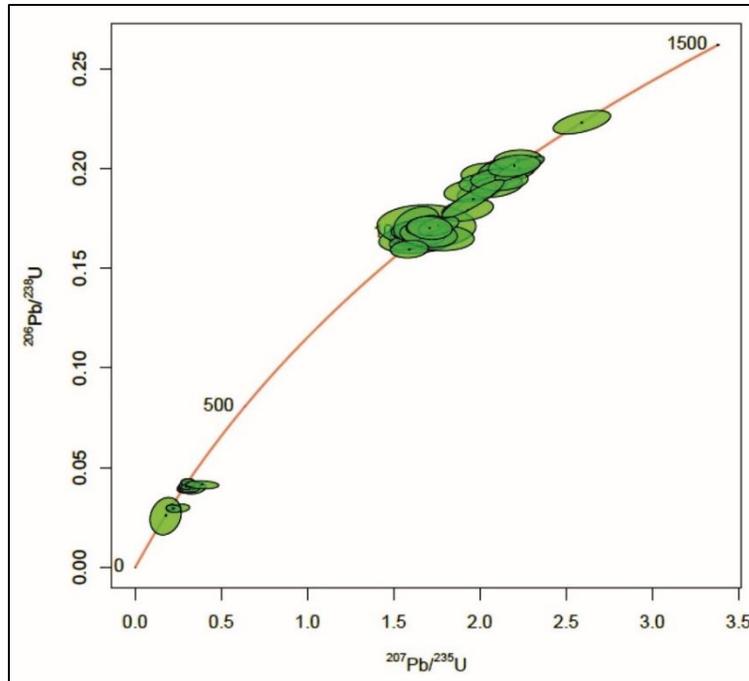


Figura 56. Diagrama de concordia de los sistemas $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ y $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ medidos en los zirrones obtenidos por el método de mesa Wilfley. Muestra TD1703 (Arcosa-Lítica).

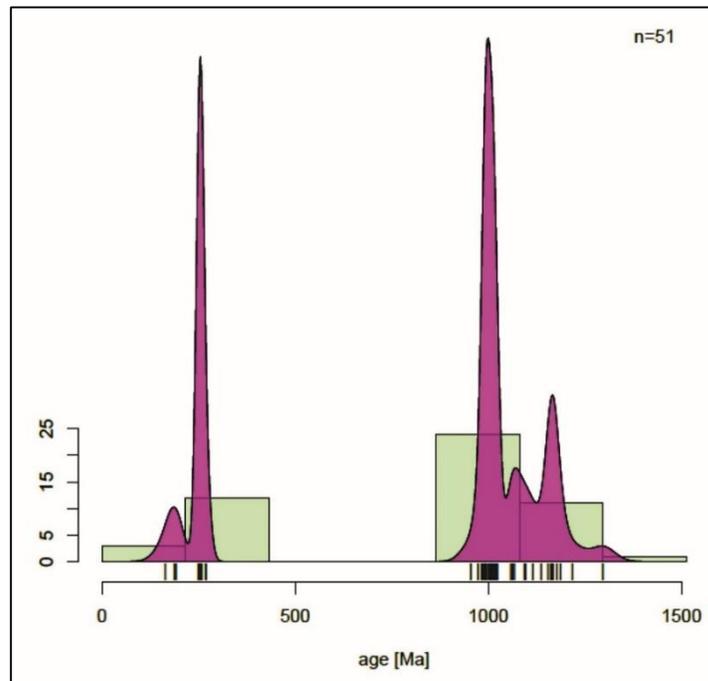


Figura 57. Gráfica de distribución de edades contra número de zirrones fechados para el método de mesa Wilfley de la muestra TD1703 (Arcosa-Lítica) de la unidad Piedra Hueca.

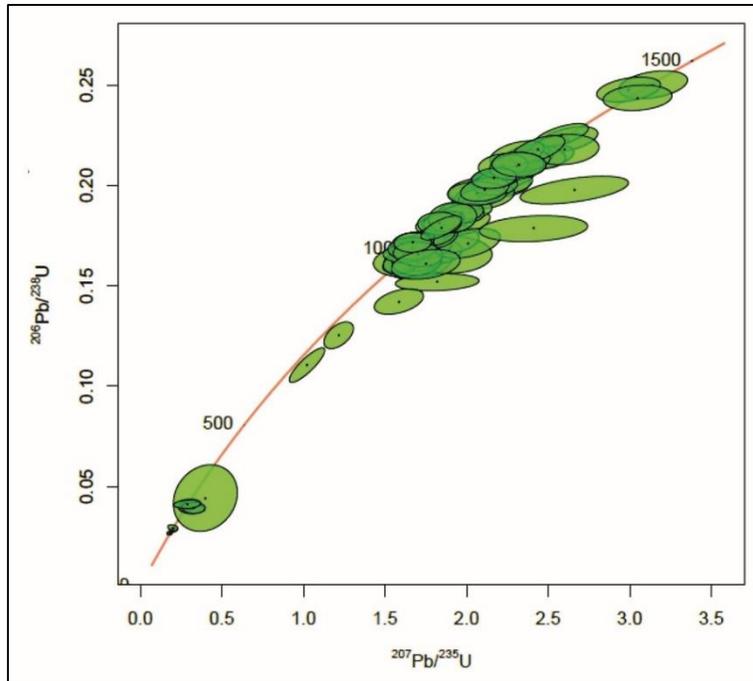


Figura 58. Diagrama de concordia de los sistemas $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ y $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ medidos en los zircones obtenidos por el método de Decantación. Muestra TD1703 (Arcosa-Lítica).

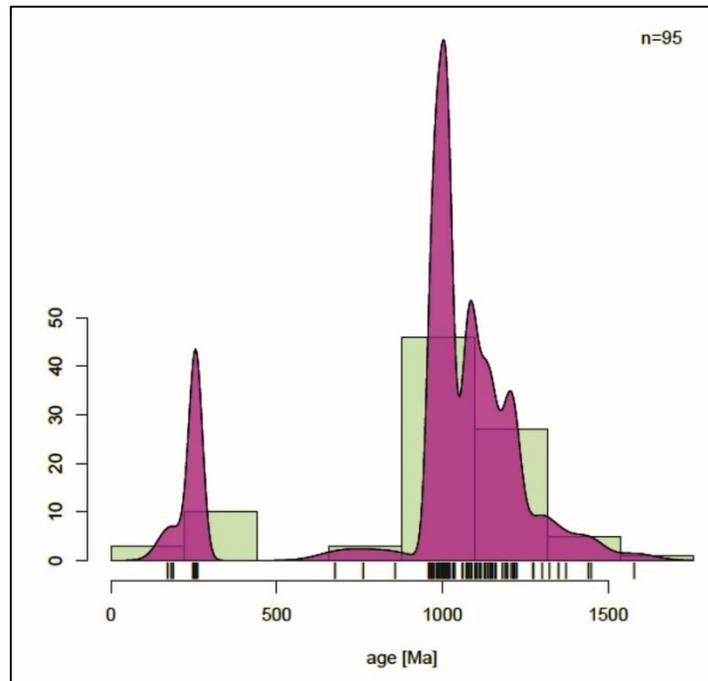


Figura 59. Gráfica de distribución de edades contra número de zircones fechados para el método de decantación de la muestra TD1703 (Arcosa-Lítica) de la unidad Piedra Hueca.

El diagrama de concordia de la muestra separada por mesa Wilfley (Figura 56) muestra las edades de los zircones, estas edades se representan con los puntos del diagrama, el área verde que rodea a cada punto representa el error estadístico de la medición. El diagrama muestra que hay áreas de concentración de puntos de medición de los sistemas $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ y $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$, observadas sobre la línea de concordia. Estas áreas representan edades donde coinciden la mayoría de los zircones de la muestra. El punto medio del área de coincidencia que se ubica en el punto más alto de la línea de concordia, se toma como la edad estadística más vieja de los zircones encontrados en la muestra, dicha edad es de 998.2 Ma. El punto medio del área de coincidencia que se ubica en el punto más bajo de la línea de concordia, se toma como la edad máxima de deposición de los sedimentos de la muestra. Dicha edad es de 257.2 Ma.

El diagrama de concordia de la muestra separada por Decantación (Figura 58) muestra que la edad estadística más vieja de los zircones encontrados en la muestra es de 999.8 Ma, y que la edad máxima de deposición de los sedimentos es de 256.4 Ma.

Las gráficas de distribución de edades contra número de zircones, tanto para los obtenidos por mesa Wilfley (Figura 57), como para los obtenidos por Decantación (Figura 59), es otra manera gráfica de corroborar lo observado en las figuras 56 y 58 respectivamente.

El eje de las abscisas corresponde a las edades en Ma, mientras que el de las ordenadas representa el número de zircones que tienen dichas edades. Las alturas de las barras representan la cantidad de zircones que coinciden en una edad. La curva morada es la distribución normal de dichas edades, por lo que los picos de dicha curva son las edades que aparecen más en las mediciones, las cuales coinciden con las edades obtenidas de los diagramas de discordia.

7.3 Comparación de las edades obtenidas para cada método

La edad máxima de deposición de la muestra TD1703 (Arcosa lítica) obtenida para los zircones separados con el método de separación por mesa Wilfley y líquidos pesados fue de 257.2 Ma. Esta edad se ubica dentro de la era Wuchiapingiense, época Lopingiense del periodo Pérmico Superior perteneciente al eratema Paleozoico. La edad de cristalización que se obtuvo para la mayoría de los zircones detríticos separados con el método de separación por mesa Wilfley y líquidos pesados fue de 998.2 Ma. Esta edad se ubica dentro del periodo tónico perteneciente al eratema Neoproterozoico. [La edad máxima de deposición de la muestra TD1703 (Arcosa lítica) obtenida para los zircones separados por el método de decantación fue de 256.4 Ma. Esta edad se ubica dentro de la era Wuchiapingiense, época Lopingiense del periodo Pérmico superior perteneciente al eratema Paleozoico. La edad de cristalización que se obtuvo para la mayoría de los zircones detríticos separados con el método de separación por decantación fue de 999.83 Ma. Esta edad se ubica dentro del periodo tónico perteneciente al eratema Neoproterozoico (Tabla 11) (Información de tiempo geológico obtenida de www.stratigraphy.org).

	Edad máxima de deposición (Ma)	Edad de cristalización más representada (Ma)
Método por mesa Wilfley	257.2	998.2
Método por decantación	256.4	999.8

Tabla 11. Tabla de edades obtenidas con cada método de separación para la muestra TD1703 (Arcosa-Lítica) de la unidad Piedra Hueca.

Capítulo 8. Discusión

Usando el método de separación por mesa Wilfley se obtuvo una cantidad mayor de zircones para cada muestra, y se obtuvo una mayor homogeneidad cuanto a los tamaños de los cristales. Estos tamaños relativamente grandes. Sin embargo, las poblaciones de zircones obtenidos con el método de decantación tienen una mayor variación en el tamaño de los cristales, sobre todo de cristales pequeños. Esto quiere decir que existió una pérdida importante de la población de zircones de las muestras al usarse la mesa Wilfley.

Las edades máximas de deposición de material detrítico obtenidas para la muestra TD1703 (Arcosa Lítica) que se obtuvieron con cada método de separación (257.2 Ma mesa para Wilfley y 256.4 Ma para Decantación) tienen una diferencia de 0.84Ma, esta diferencia se considera poco significativa. Ambas edades se ubican dentro de la era Wuchiapingiense, época Lopingiense del periodo Pérmico Superior perteneciente al eratema Paleozoico. Estas edades indican que la formación de la muestra TD1703 (Arcosa Lítica) es posterior a la época Lopingiense del periodo Pérmico superior. Esta temporalidad cae dentro del rango de edades de las rocas sedimentarias pertenecientes a la unidad Piedra Hueca obtenidas anteriormente que van del Pérmico inferior al Jurásico inferior (Martini et al., 2016).

Las edades de cristalización que se obtuvieron para la mayoría de los zircones detríticos separados con cada método de separación (998.2 Ma para el método por mesa Wilfley y 999.8 Ma para el método por Decantación) son similares entre sí habiendo una diferencia de 1.56Ma, esta diferencia se considera poco significativa. Ambas edades se ubican dentro del periodo tónico, perteneciente al eratema Neoproterozoico. Estas edades sugieren que la mayor parte del material detrítico de la muestra TD1703 proviene de rocas que contienen zircones cuya edad de cristalización se ubica dentro de las edades obtenidas.

Las edades de los dos eventos intrusivos que originaron las rocas del plutón de Totoltepec ($306\pm 2\text{Ma}$ y $287\pm 2\text{Ma}$) (Kirsch et al., 2012), están representadas dentro del rango de edades obtenidas para los zircones detríticos obtenidos con ambos métodos de separación. Esto sugiere que parte del material detrítico de la muestra TD1703 (perteneciente a la unidad Piedra Hueca) proviene, efectivamente, de las rocas de plutón de Totoltepec.

Capítulo 9. Conclusiones

El tiempo de trabajo por el método de separación por decantación es menor que el método de separación por mesa Wilfley, el tiempo en el presente trabajo se redujo en un 24.4% (6hrs por método con mesa Wilfley contra 3hrs 40min usando el método por Decantación). El equipo de laboratorio necesario para la metodología por decantación se reduce en gran medida al prescindirse del equipo de tamizado, la mesa de separación Wilfley y del equipo para la separación por líquidos pesados. El equipo de tamizado para el método por

Decantación se simplifica en gran medida por el uso de coladores desechables que no representan riesgo de pérdida ni de contaminación de la muestra.

La cantidad de zircones obtenidos por el método por mesa Wilfley fue mayor que los obtenidos por el método por decantación en un promedio de 30%. No se observó alguna diferencia significativa en la morfología de los zircones obtenidos con cada método de separación, salvo el tamaño de los cristales.

El método de separación de minerales pesados por mesa Wilfley posee un riesgo mayor de contaminación de los concentraos minerales debido a que el equipo necesario difícilmente puede ser descontaminado por completo de partículas minerales provenientes de otras muestras de roca trabajadas anteriormente. Esto conlleva que haya incertidumbre sobre la pulcritud de los concentrados minerales, e incertidumbre de la exactitud de los posteriores análisis.

La reproducibilidad del método por mesa Wilfley es mayor debido a que los parámetros de los equipos usados pueden ajustarse bajo criterios ya estandarizados. Por su parte, el método por decantación no se ha estandarizado por completo en la etapa del bateo manual de la muestra granulada. Esto se debe a que el movimiento de la capsula de porcelana para batear la muestra debe ser realizado correctamente para que sea efectivo, dicho movimiento requiere de algo de práctica por parte del usuario. Debido a esto puede argumentarse que el método por Decantación que tiene una menor reproducibilidad.

La cantidad de agua que se utiliza para el método por decantación es considerablemente menor que para el método por mesa Wilfley reduciéndose el volumen de agua necesario aproximadamente en un 98% (2160 l usados con la mesa Wilfley contra 22 l usados con la decantación). Esto representa una reducción significativa al impacto del medio ambiente por gasto continuo de agua.

Las edades obtenidas, tanto de la edad de máxima de deposición como la edad de formación de los zircones detríticos de la muestra TD1703, separados con ambos métodos coinciden estadísticamente entre sí en sus máximos de poblaciones de cristales. Las edades máximas de deposición de material detrítico se ubican dentro del periodo sugerido para la formación de las rocas sedimentarias pertenecientes a la unidad Piedra Hueca (Pérmico Inferior al

Jurásico Inferior) (Martini et al., 2016). Las edades propuestas de los dos eventos intrusivos que originaron las rocas del tronco de Totoltepec (306 ± 2 y 287 ± 2 Ma) (Kirsch et al. 2012) están representadas dentro del rango de edades obtenidas para los zircones detríticos (163.30 - 1449.00 Ma) aunque la mayor parte de los zircones detríticos proviene de alguna otra fuente cuya edad de cristalización es anterior a la del tronco del Totoltepec.

Con base en los resultados anteriores, se concluye que ambos métodos resultaron igualmente efectivos para obtener zircones aptos para dataciones por el método U-Th-Pb.

9.1 Ventajas y desventajas de la metodología por mesa Wilfley

Ventajas:

Si se usa correctamente el método de separación de minerales pesados por mesa Wilfley, líquidos pesados y separador Frantz de fases magnéticas se pueden separar una gran cantidad de minerales pesados como los zircones en un solo tratamiento, aunque existe una gran posibilidad perdida de poblaciones de zircones, según los resultados de la presente tesis.

Los parámetros de la mesa Wilfley pueden ser ajustados de una forma más metódica y estandarizada. Esta característica provee la ventaja de aumentar la reproducibilidad de un estudio que se realice por diferentes usuarios en distintos tiempos. Lo mismo ocurre para el resto de los equipos utilizados.

Esta técnica es apta para estudios en los cuales se cuente con cantidades grandes de muestra de roca, en las cuales se tenga además la certeza de que contienen cantidades importantes de zircones. Para estos casos, la probable perdida de poblaciones de zircones puede considerarse poco significativa. Dicho de otro modo, si se cuenta con una gran cantidad de muestra de roca, de la cual se puede extraer un número suficientemente grande de zircones para el estudio que se va a realizar, la perdida de poblaciones de zircones puede no representar un problema significativo.

Desventajas:

El método por mesa Wilfley, aunque efectivo, puede considerarse de bajo rendimiento en relación con el costo de instrumentación necesaria, tiempo de operación y a la incertidumbre

en cuanto a la pulcritud de los concentrados minerales obtenidos. Esto es porque los minerales separados son microscópicos y el control de limpieza y descontaminación en los equipos usados es bastante incierto. Esto conlleva al riesgo de contaminación de los concentrados minerales que pueden afectar los análisis geoquímicos. En otras palabras, la pulcritud del trabajo puede variar según la persona quien realicé la separación.

La cantidad de tiempo necesario para la separación por mesa Wilfley es considerablemente alto en comparación con la separación por Decantación.

La cantidad de agua que se gasta al usarse la mesa Wilfley es muy grande si se considera el flujo promedio que es de 6 a 12 litros por minuto.

Si se debe trabajar con cantidades pequeñas de muestra, o con rocas que no tengan una cantidad importante de zircones, el uso de la mesa Wilfley representa un riesgo de pérdida de cristales que podría afectar o hasta impedir el estudio a realizarse

9.2 Ventajas y desventajas de la metodología por decantación

Ventajas:

Este método puede reducir el tiempo de trabajo hasta en un 69%, según los resultados obtenidos en la presente tesis. Esta ventaja es muy importante si considera que hay estudios en donde se necesita procesar y fechar una muestra dentro de un periodo corto de tiempo.

La cantidad de equipo de laboratorio necesario es menor, y es relativamente más sencillo de usar y de conseguir.

Se prescinde de los líquidos pesado, los cuales, incluyendo al propio politungstato de sodio, pueden ser cancerígenos en exposiciones largas

El gasto de agua de agua es 2 a 6 litros por cada proceso de separación de minerales pesados de una muestra de roca. Este gasto es mucho menor al de la mesa Wilfley.

La principal ventaja que posee esta metodología es la de proveer una mayor certeza de la pulcritud de los concentrados de minerales pesados obtenidos. Esto es una consecuencia de la reducción del equipo necesario y de la cantidad de tratamientos. A su vez, esto provee una ventaja económica por la reducción de costos en equipo y energía eléctrica.

El tamaño aproximado del largo y ancho de las aberturas de la malla de un colador de malla fina es de $0.6 \text{ mm} = 600 \text{ }\mu\text{m}$, equivalente a malla número 30. Este tamaño de partícula equivale en clasificación de tamaño de arena gruesa. Esta abertura permite que no exista pérdida de zircones de diferentes tamaños durante el tamizado de la muestra. Dado que estos coladores pueden ser desechados, no existe riesgo de contaminación para un estudio posterior.

Esta técnica de separación de zircones (u otros minerales pesados) es ideal para usar se en estudios donde se cuente cantidades pequeñas de muestra de roca. Por ejemplo, cuando se requiere fechar un xenolito. En estos casos el total de la muestra suele ser menor a 1 Kg. Si se pasa por mesa Wilfley, se corre el riesgo de pérdida de muestra. Así mismo, cuando se tiene una muestra de roca que posea pocos zircones, se puede decantar dicha muestra las veces que sea necesario para obtener zircones suficientes.

Desventajas:

El proceso de bateo no se puede “estandarizar” debido a que se realiza a mano, por lo que no hay certeza de que una persona realice correctamente el bateo para separar los minerales pesados y, por ende, la reproducibilidad del método es baja. Sin embargo, el método permite que no haya pérdida pérdida de la muestra de roca granulada por lo que el bateo puede repetirse indefinidamente hasta obtener una separación exitosa de minerales pesados. Esto es virtualmente imposible si se somete la muestra a una separación con mesa Wilfley.

9.3 Recomendaciones

La mesa Wilfley podría ser complementada al adaptársele algún sistema de reciclaje y filtrado de agua. Así podría resolverse o reducirse la problemática del gasto de grandes volúmenes de agua. Sin embargo, se tendría que idear un sistema eficaz de filtrado y la propia descontaminación de dicho sistema de filtrado tiene que ser lo suficientemente óptima para no afectar posteriores estudios.

El proceso de bateo manual podría reemplazarse por algún dispositivo mecánico sencillo sobre el cual se coloque la capsula de porcelana para realizar el bateo. Si este dispositivo pudiese ser estandarizado, aumentaría la reproducibilidad de la separación de minerales pesados por decantación para diferentes usuarios.

Referencias.

Artículos:

- Bouvier, A. & Wadhwa, M. (2010). The age of the Solar System redefined by the oldest Pb–Pb age of a meteoritic inclusion. *Nature Geoscience*, 3, 637-64.
- Bergendahl, M. H. & Koschman, A.H. (1971). Ore Deposits of the Kokomo-Tenmile District, Colorado. *U.S. Geological Survey, Professional Paper*, 652.
- Davis, D. D., Williams, I. S. & Krogh, T.E. (2003). Historical Development of Zircon Geochronology. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53, 6, 145-181.
- Finch, R. J. & Hanchar, J. M. (2003). Structure and Chemistry of Zircon and Zircon-Group Minerals. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53, 1, 1-25.
- Flinter, B. H., (1959). The magnetic separation of some alluvial minerals in Malaya. *Am. Mineralogist*, 44, 738-751.
- Hernández-Treviño, T., Schaaf, P., Solís-Pichardo, G., Villanueva-Lascurain, D. & Meza-García, V. (2012). Practical zircon separation technique for U-Pb geochronology: VIII South American Symposium on Isotope Geology, Medellín, Colombia, Abstracts.
- Jackson, S. E., Longrich, H. P., Dunning, G. R., Freyer, B. J. (1992). The application of laser-ablation microprobe; inductively coupled plasma-mass spectrometry (LAM-ICP-MS) to in situ trace-element determinations in minerals. *Canadian Mineralogist*, 30, 1049-1064.
- Kirsch, M., Keppie, J. D., Murphy B. & Solari, L. A. (2012). Permian–Carboniferous arc magmatism and basin evolution along the western margin of Pangea: Geochemical and geochronological evidence from the eastern Acatlán Complex, southern Mexico. *GSA Bulletin*, 124, 1607-1628.
- Kirsch, M., Keppie, J. D., Murphy B. & Lee j. K. W. (2013). Arc plutonism in a transtensional regime: the late Palaeozoic Totoltepec pluton, Acatlán Complex, southern Mexico. *International Geology Review*, 55, 263-286.

- Koutsoukos, E. A. M. (2005). Stratigraphy: Evolution of a Concept. Pp: 3-19 In: Koutsoukos, E.A.M. (ed). Applied Stratigraphy. Springer, the Netherlands.
- Le Bas, M. J., Streckeisen, A. L. (1991). The IUGS systematics of igneous rocks. *Journal of the Geological Society*, 148, 825-833.
- Leisen, M., Barra, F., Romero, R., Morata, D., Reich, M. (2015), Geocronología U-Pb de Circones Mediante Ablación Láser Acoplado a un ICP-MS Multicolector: Metodología Utilizada en el Laboratorio de Geoquímica Isotópica del Centro Fondap CEGA, Universidad de Chile, *XIV Congreso Geológico Chileno*, 559-562.
- Lowenstern, J. B., Persing, H. M., Wooden, J. L., Lanphere, M., Donnelly-Nolan, J. & Grove, T. L. (2000). UTh dating of single zircons from young granitoid xenoliths: new tools for understanding volcanic processes. *Earth and Planetary Science Letters*, 183, 291-302.
- Martini, M., Ramírez-Calderón, M., Solari, L., Villanueva-Amadoz, U., Zepeda-Martínez, M., Ortega-Gutiérrez, F., Elías-Herrera, M. (2016). Provenance analysis of Jurassic sandstones from the Otlaltepec Basin, southern Mexico: implications for the reconstruction of Pangea breakup. *Geosphere* 12, 1842-1864.
- Mattinson, J. M. (2005). Zircon U-Pb chemical abrasion ("CA-TIMS") method: Combined annealing and multi-step partial dissolution analysis for improved precision and accuracy of zircon ages. *Chemical Geology*, 220, 1, 47-66.
- McClenaghan, M. B. (2011). Overview of common processing methods for recovery of indicator minerals from sediment and bedrock in mineral exploration. Geological Survey of Canada. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 11, 265–278.
- Ortega-Gutiérrez, F. (1978). Estratigrafía del Complejo Acatlán en la Mixteca Baja, Estados de Puebla y Oaxaca. Universidad Nacional Autónoma de México. *Instituto de Geología, Revista*, 2, 112–131.
- Ortega-Obregón, C., Solari, L., Gómez-Tuena, A., Elías-Herrera, M., Ortega-Gutiérrez, F., Macías-Romo, C. (2014). Permian–Carboniferous arc magmatism in southern Mexico: U–Pb dating, trace element and Hf isotopic evidence on zircons of

earliest subduction beneath the western margin of Gondwana. *International Journal of Earth Sciences*, 103, 5, 1287-1300.

- Pupin, J. P. (1980). Zircon and granite petrology. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 73, 207–220.

- Rosenblum, S. (1958). Magnetic susceptibilities of minerals in the Isodynamic Frantz magnetic separator. *Am. Mineralogist*, 43, 170-173.

- Rosenblum, S. & Brownfield, I.K. (2000). Magnetic susceptibilities of minerals. *U.S. Geological Survey, Open-File Report*, 99-529.

- Scott, D. J. & Gauthier, G. (1996). Comparison of TIMS (U-Pb) and laser ablation microprobe ICP-MS (Pb) techniques for age determination of detrital zircons from Paleoproterozoic metasedimentary rocks from northeastern Laurentia, Canada, with tectonic implications. *Chemical Geology*, 131, 1-4.

- Schaaf, P. (2011). La Geocronología en México, Una retrospectiva de los últimos 50 años. *Universidad Autónoma de México, Instituto de Geología, Simposio Dr. Zoltan de Scerna, Sesenta años geologizando en México, Libro de Resúmenes*, 136-143.

- Silva-Romo, G., Mendoza-Rosales, C. C., Campos-Madrigal, E., Morales-Yáñez, A., De la Torre-González, A. I., Nápoles-Valenzuela, J. I. (2018). Recycling of Amazonian detrital zircons in the Mixteco terrane, southern Mexico: Paleogeographic implications during Jurassic-Early Cretaceous and Paleogene times. *Journal of South American Earth Sciences*. 83, 210-226.

- Simpson, E. C. & Shelly, M. (2017). Nuclear cartography: patterns in binding energies and subatomic structure. *Physics Education*, 52, 6.

- Solari, L.A., Gómez-Tuena, A., Bernal, J.P., Pérez-Arvizu, O., Tanner, M. (2010). U-Pb zircon geochronology with an integrated LA-ICP-MS microanalytical workstation: Achievements in precision and accuracy. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 34, 5-18.

- Solari, L.A. & Tanner, M. (2011). UPb.age, a fast data reduction script for LA-ICP-MS U-Pb geochronology. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 28, 1, 2011, 83-91.
- Solari, L.A., Ortega-Gutiérrez, F., Elías-Herrera, M., Ortega-Obregón, C., Macías-Romo, C., Reyes Salas, M. (2014). Detrital provenance of the Grenvillian Oaxacan Complex, Southern Mexico: a zircon perspective. *International Journal of Earth Sciences*, 103, 5, 1301-1315.
- Tosdal, R. M., Wooden, J. L. & Bouse, R. M. (1999). Pb Isotopes, Ore Deposits and Metallogenic Terranes. Society of Economic Geologies, *Reviews in economic geology*, 12, 1-28.
- Watson, E. B. (2007). Zircon in Technology and Everyday Life. *Elements, Mineral Matters*, 3, 1, 52.
- Wentworth, C. H. (1922). A Scale of Grade and Class Terms for Clastic Sediments. *The Journal of Geology*, 30, 5, 77-392.
- Wilde, S. A., Valley, J. W., William, H. P. & Graham, C. M. (2001). Evidence from detrital zircons for the existence of continental crust and oceans on the Earth 4.4 Gyr ago. *Nature*, 409, 175-178.

Libros:

- Allègre, C. J. (2008). *Isotope Geology*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Chisholm, E. K., Sircombe, K. N. & DiBugnara, D. L. (2014). *Handbook of Geochronology Mineral Separation Laboratory Techniques*. Canberra: Geoscience Australia.
- Drzymala, J. (2007). *Mineral Processing, Foundations of theory and practice of minerallurgy*. Wroclaw: Wroclaw University of Technology.
- Faure, G. & Mensing, T. (2005). *Isotopes: Principles and Applications (3rd ed.)*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.

- Folk, R. L., (1974). *Petrology of Sedimentary Rock*, Austin, TX. Hemphill Publishing Company.
- Geyh, M. A. & Schleicher, H. (1990). *Absolute Age Determination Physical and Chemical Dating Methods and Their Application*. Heidelberg: Springer-Verlag.
- Kelly, E. G. & Spottiswood, D. j. (1990). *Introducción al procesamiento de minerales*. México D.F.: Limusa.
- Lawson, R. S. (1999). *An Introduction to Radioactivity*. Manchester Royal Infirmary: Nuclear Medicine Department.
- Strong, T. R. & Driscoll, R. L. (2016). *A process for reducing rocks and concentrating heavy minerals: U.S. Geological Survey, Open-File Report 2016–1022*. Virginia: U.S. Geological Survey.
- Zeuner, F. E. (1952). *Dating the Past: An Introduction to Geochronology* (4th ed.). Darien, Conn: Hafner Pub. Co.

Tesis de grado:

- Meza-García, V. B. (2010). *Estudio petrográfico, geocronológico y cartográfico de los domos riolíticos y las ignimbritas riolíticas del sector El Ocotito-Papagayo, al sur de la Sierra de Alquitrán y Tierra Colorada, estado de Guerrero (Tesis de Ingeniería)*. Instituto Politécnico Nacional, México DF, México.
- Pereyra-Hernández, J. G. (2003). *Metodología de preparación de muestras para la obtención de edades absolutas por los métodos de fechamiento isotópico U-Th-Pb y $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ (Tesis de Licenciatura)*. Universidad Autónoma de Guerrero, Taxco el Viejo, Guerrero, México.

Patentes:

- Frantz S. G., (1936). U.S. Patent No. 2,056,426. Princeton, NJ: U.S. Patent and Trademark Office.

Referencias electrónicas:

- 911 Metallurgist. Wilfley Laboratory Concentrating Table. 2018.
<<https://www.911metallurgist.com/equipment/wilfley-shaker-table/>>
- ICS - Chart/Time Scale. 2017.
<<http://www.stratigraphy.org/index.php/ics-chart-timescale>>
- Mindat.org. Zircon: Zircon mineral information and data. 2016.
<<http://www.mindat.org/min-4421.html>>
- The Oxford English Dictionary. 2nd ed. 1989. OED Online. Oxford University Press. 2007.
<<http://www.oxforddictionaries.com/definition/english/geochronology>>
- Tyler. Tamices y equipos de granulometría. 2016.
<<http://www.tyler.com.mx/tamices.html>>
- Sgm.gob.mx. ¿Qué es la Geoquímica?.2016.
<http://www.sgm.gob.mx/index.php?option=com_content&task=view&id=83&Itemid=8>
- Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de geofísica. 2017.
<<http://www.geofisica.unam.mx/laboratorios/universitarios/lugis/Molienda.pdf>>

Anexos

Las siguientes tablas contienen la información de los análisis de U/Pb por LA ICP-MS para los zircones obtenidos por cada método (Anexos 1-4)

	U (ppm) ¹	Th (ppm) ¹	Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	±2s abs	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th	±2s abs	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	±2s abs	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	±2s abs	Rho
1	270	52.1	0.19296296	0.0507	0.0041	0.0068	0.0065	0.177	0.06	0.02566	0.0062	0.18662
2	41.5	29.8	0.71807229	0.0563	0.0078	0.0089	0.001	0.222	0.029	0.0295	0.0013	-0.12206
3	40.3	11.58	0.28734491	0.0647	0.0091	0.0119	0.0019	0.262	0.036	0.0297	0.0013	0.2135
4	92	71.9	0.78152174	0.05	0.0044	0.00871	0.0008	0.21	0.017	0.03012	0.00093	0.10227
5	58.5	21.04	0.35965812	0.0558	0.0056	0.0132	0.0016	0.307	0.029	0.0395	0.0012	0.25878
6	109.4	42.4	0.38756856	0.053	0.0049	0.01362	0.0013	0.294	0.026	0.03959	0.00096	-0.16009
7	50.1	39.9	0.79640719	0.0628	0.0087	0.0124	0.0019	0.34	0.046	0.0397	0.0019	0.23586
8	76.9	50.4	0.65539662	0.0556	0.0061	0.01182	0.0012	0.3	0.034	0.0398	0.0014	0.020273
9	138.9	53.7	0.38660907	0.0584	0.0046	0.0135	0.0014	0.315	0.023	0.0401	0.0011	0.073204
10	42.1	31	0.73634204	0.0552	0.0061	0.0116	0.0017	0.295	0.031	0.0402	0.0017	0.36894
11	222.7	11.33	0.05087562	0.0532	0.0036	0.014	0.0017	0.293	0.017	0.0402	0.00081	-0.15001
12	67.2	45.32	0.67440476	0.0555	0.0046	0.0129	0.0013	0.306	0.026	0.0404	0.0011	-0.024208
13	24.6	11.56	0.4699187	0.0556	0.0081	0.0135	0.002	0.306	0.041	0.0402	0.0018	0.34339
14	30.58	28.1	0.91890124	0.0572	0.0087	0.013	0.0014	0.316	0.041	0.0405	0.002	0.0065116
15	160	96	0.6	0.0526	0.005	0.01283	0.0013	0.291	0.023	0.0408	0.0011	0.041135
16	81.1	56.2	0.69297164	0.069	0.013	0.0154	0.0021	0.388	0.064	0.0414	0.0013	-0.13039
17	78	14.44	0.18512821	0.054	0.0055	0.0137	0.0017	0.308	0.028	0.0425	0.0013	-0.073575
18	153.1	17.95	0.11724363	0.053	0.0039	0.0135	0.0016	0.311	0.021	0.04267	0.00095	0.08521
19	142.5	124.2	0.87157895	0.0715	0.0038	0.04724	0.0038	1.591	0.073	0.1596	0.0029	0.11212
20	340	65	0.19117647	0.0702	0.0034	0.0475	0.004	1.573	0.065	0.163	0.0026	0.25131
21	19.69	8.15	0.41391569	0.0739	0.0066	0.0485	0.0056	1.64	0.15	0.1646	0.0047	0.18402
22	107	47.9	0.44766355	0.0713	0.0041	0.0532	0.0048	1.626	0.078	0.1659	0.0031	-0.16728
23	25.59	5.53	0.21610004	0.0779	0.0061	0.0563	0.0077	1.77	0.13	0.1653	0.0043	-0.071015
24	37.5	18.66	0.4976	0.0721	0.0046	0.0514	0.0045	1.619	0.092	0.1663	0.0036	0.085742
25	16.5	1.636	0.09915152	0.0696	0.0061	0.063	0.011	1.66	0.13	0.1667	0.005	0.048832
26	57.2	16.2	0.28321678	0.073	0.0045	0.0494	0.0047	1.64	0.09	0.1666	0.0037	0.032923

27	63.7	51	0.80062794	0.0728	0.0044	0.0515	0.0044	1.663	0.088	0.1666	0.0035	-0.098884
28	37.7	20.2	0.53580902	0.075	0.0055	0.0543	0.0049	1.703	0.11	0.167	0.0043	-0.1409
29	250	154	0.616	0.0731	0.0038	0.0499	0.0041	1.698	0.075	0.1678	0.0028	0.086764
30	144	94.6	0.65694444	0.0693	0.0037	0.0496	0.004	1.601	0.077	0.1686	0.003	0.071007
31	171.1	40	0.23378141	0.0699	0.0036	0.04	0.0047	1.608	0.078	0.1689	0.0032	0.057764
32	190.6	101.4	0.5320042	0.07	0.0038	0.0485	0.004	1.632	0.073	0.169	0.0028	-0.14695
33	120.4	71	0.589701	0.0702	0.0038	0.0494	0.0042	1.627	0.076	0.1696	0.0031	0.11991
34	64.1	27.7	0.43213729	0.0716	0.0042	0.0534	0.0046	1.709	0.087	0.1702	0.0038	-0.095855
35	199.2	105.3	0.52861446	0.0715	0.0036	0.0512	0.0041	1.671	0.075	0.1706	0.0029	0.39253
36	7.96	3.1	0.38944724	0.0749	0.0097	0.0563	0.0085	1.69	0.19	0.1712	0.007	-0.013095
37	224	101.6	0.45357143	0.0741	0.0037	0.0498	0.0041	1.76	0.078	0.1712	0.0032	0.44561
38	142	17.3	0.12183099	0.0711	0.0037	0.0484	0.0044	1.684	0.075	0.1716	0.0032	0.33542
39	51.7	21.4	0.4139265	0.0704	0.0041	0.0507	0.0048	1.632	0.088	0.1722	0.0057	0.29693
40	78.1	42.6	0.54545455	0.078	0.0045	0.0518	0.0045	1.928	0.099	0.1792	0.0037	0.30793
41	213.4	51.7	0.24226804	0.0769	0.0039	0.055	0.0053	1.96	0.12	0.1848	0.0064	0.89108
42	56.4	43.3	0.7677305	0.0749	0.0044	0.0544	0.0046	1.943	0.1	0.1888	0.0037	0.24016
43	813	250.3	0.30787208	0.0777	0.0037	0.0486	0.0048	1.999	0.086	0.1888	0.0037	0.46682
44	94.2	52.4	0.55626327	0.079	0.0043	0.0546	0.0046	2.096	0.1	0.191	0.0036	0.31544
45	158.4	20.3	0.12815657	0.0758	0.004	0.0554	0.005	2.018	0.092	0.1924	0.0032	0.080063
46	124	20.7	0.16693548	0.0785	0.0042	0.0569	0.0052	2.097	0.095	0.1942	0.0035	0.047403
47	70	56.3	0.80428571	0.0786	0.0045	0.0562	0.0048	2.112	0.11	0.1944	0.0036	0.067751
48	94.1	29.1	0.30924548	0.0749	0.0042	0.058	0.005	2.037	0.097	0.1971	0.0037	0.06784
49	72.2	40.9	0.56648199	0.0782	0.0046	0.0581	0.0049	2.157	0.11	0.1991	0.004	0.25695
50	673	164	0.24368499	0.08067	0.0038	0.0583	0.0048	2.23	0.095	0.2	0.0041	0.79446
51	164.4	80	0.486618	0.0778	0.0038	0.0589	0.0049	2.143	0.09	0.2002	0.0035	0.29396
52	91.4	20.9	0.22866521	0.0791	0.0041	0.0556	0.005	2.198	0.1	0.2013	0.0036	0.26772
53	280	93.9	0.33535714	0.0792	0.004	0.0593	0.0049	2.22	0.093	0.2043	0.0033	0.11506
54	365	91.9	0.25178082	0.0839	0.0041	0.0632	0.0052	2.591	0.11	0.2232	0.0039	0.53844

Anexo 1. Tabla de radios corregidos para los zircones obtenidos por mesa Wilfley.

	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 2\text{s}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 2\text{s}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 2\text{s}$	Best age (Ma)	$\pm 2\text{s}$	Disc %
1	163.3	38	168	46	250	170	163.30	38	2.79761905
2	187.4	7.9	202	22	350	260	187.40	7.9	7.22772277
3	188.6	8.2	231	29	750	280	188.60	8.2	18.3549784
4	191.3	5.8	193	14	150	180	191.30	5.8	0.88082902
5	250	7.7	277	22	450	200	250.00	7.7	9.74729242
6	250.3	6	263	20	330	190	250.30	6	4.82889734
7	251	12	300	34	650	250	251.00	12	16.33333333
8	251.7	8.5	269	26	390	230	251.70	8.5	6.43122677
9	253.4	6.9	282	17	470	170	253.40	6.9	10.141844
10	254	10	265	24	320	200	254.00	10	4.1509434
11	254	5	262	13	320	150	254.00	5	3.05343511
12	255.3	7.1	269	19	440	180	255.30	7.1	5.0929368
13	256	11	270	32	320	280	256.00	11	5.18518519
14	256	12	273	32	390	300	256.00	12	6.22710623
15	257.8	7	258	17	340	180	257.80	7	0.07751938
16	261.5	8.4	326	43	690	290	261.50	8.4	19.7852761
17	268.5	7.7	276	23	340	200	268.50	7.7	2.7173913
18	269.4	6.1	274	16	310	160	269.40	6.1	1.67883212
19	954	16	965	28	961	110	954.00	16	1.13989637
20	973.2	14	959.1	26	929	100	973.20	14	-1.47012825
21	982	26	984	55	970	190	982.00	26	0.20325203
22	989	18	981	29	957	110	989.00	18	-0.81549439
23	989	24	1037	45	1120	160	989.00	24	4.62873674
24	991	20	983	36	970	140	991.00	20	-0.8138352
25	993	28	996	47	950	170	993.00	28	0.30120482
26	993	20	982	35	999	120	993.00	20	-1.12016293
27	993	20	991	33	996	120	993.00	20	-0.20181635
28	995	24	1009	40	1050	150	995.00	24	1.38751239
29	1000.1	15	1007	28	1007	110	1000.10	15	0.68520357

30	1004.6	16	969	30	896	110	1004.60	16	-3.67389061
31	1006	18	976	28	931	110	1006.00	18	-3.07377049
32	1006.6	15	981	28	942	110	1006.60	15	-2.60958206
33	1010	17	979	29	930	110	1010.00	17	-3.16649642
34	1013	21	1013	31	977	120	1013.00	21	0
35	1015.2	16	999	29	963	110	1015.20	16	-1.62162162
36	1018	39	1019	75	980	260	1018.00	39	0.09813543
37	1019	18	1032	29	1044	97	1019.00	18	1.25968992
38	1021	18	1004	30	951	110	1021.00	18	-1.69322709
39	1024	31	979	34	941	130	1024.00	31	-4.59652707
40	1062	20	1091	36	1128	110	1062.00	20	2.65811182
41	1092	35	1096	40	1118	110	1092.00	35	0.3649635
42	1114	20	1092	36	1043	120	1114.00	20	-2.01465201
43	1115	20	1115	28	1143	98	1115.00	20	0
44	1127	19	1144	34	1165	110	1127.00	19	1.48601399
45	1134.5	17	1123	30	1087	100	1134.50	17	-1.02404274
46	1144	19	1146	31	1162	100	1144.00	19	0.17452007
47	1145	19	1156	34	1172	120	1145.00	19	0.95155709
48	1160	20	1129	31	1079	110	1160.00	20	-2.74579274
49	1171	22	1168	34	1165	110	1171.00	22	-0.25684932
50	1175	22	1190	30	1217	94	1175.00	22	1.2605042
51	1176	19	1162	29	1136	99	1176.00	19	-1.20481928
52	1182	19	1179	31	1165	100	1182.00	19	-0.25445293
53	1198.1	18	1187	29	1174	100	1198.10	18	-0.93513058
54	1299	21	1297	31	1287	95	1299.00	21	-0.154202

Anexo 2. Tabla de edades corregidas para los zircones obtenidos por mesa Wilfley.

	U (ppm) ¹	Th (ppm) ¹	Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	±2s abs	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th	±2s abs	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	±2s abs	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	±2s abs	Rho
1	309	79.9	0.25857605	0.048	0.0031	0.00834	0.00078	0.1798	0.011	0.02679	0.00063	0.081156
2	183.9	40.3	0.21914084	0.0514	0.0046	0.00944	0.001	0.202	0.015	0.02854	0.00067	-0.04568
3	58.4	44.7	0.76541096	0.0501	0.006	0.00928	0.001	0.2	0.021	0.02954	0.00097	-0.28341
4	24.3	19.34	0.79588477	0.06	0.011	0.0119	0.0016	0.313	0.051	0.0391	0.0017	-0.086417
5	200	108	0.54	0.0522	0.0037	0.01207	0.0011	0.288	0.02	0.03921	0.001	0.22539
6	31.35	13.05	0.41626794	0.063	0.0095	0.0159	0.0022	0.327	0.048	0.0394	0.0018	-0.03233
7	63.7	60.7	0.95290424	0.0543	0.0063	0.01218	0.0012	0.296	0.044	0.0398	0.0022	-0.21271
8	84.8	39.36	0.46415094	0.0519	0.0047	0.01185	0.0013	0.284	0.023	0.04	0.0012	-0.020529
9	58.5	20.03	0.34239316	0.0522	0.0052	0.0119	0.0017	0.29	0.028	0.0404	0.0013	0.53888
10	51.79	20.84	0.40239428	0.051	0.0062	0.0132	0.0015	0.29	0.03	0.0407	0.0015	-0.18058
11	46.5	33.6	0.72258065	0.0537	0.0049	0.01373	0.0013	0.306	0.029	0.041	0.0015	0.21524
12	28.3	14.2	0.50176678	0.0524	0.0086	0.0139	0.0019	0.297	0.047	0.0411	0.0019	0.16357
13	65.7	29.1	0.44292237	0.056	0.0058	0.0152	0.0016	0.312	0.032	0.0412	0.0014	0.13974
14	55.1	26.9	0.48820327	0.056	0.0096	0.0135	0.0024	0.289	0.055	0.0413	0.0014	0.17583
15	82.5	49	0.59393939	0.065	0.0077	0.0099	0.0058	0.399	0.13	0.0443	0.011	0.16435
16	121.8	16.23	0.13325123	0.068	0.004	0.0337	0.004	1.022	0.072	0.1105	0.0057	0.85843
17	438	53.4	0.12191781	0.0702	0.004	0.0369	0.0032	1.216	0.06	0.1254	0.0044	0.51713
18	56.1	33.6	0.59893048	0.0813	0.0054	0.0269	0.0027	1.585	0.1	0.1422	0.0042	0.43567
19	76.5	24.6	0.32156863	0.084	0.0067	0.0613	0.0056	1.82	0.17	0.1518	0.0028	0.17552
20	31.5	4.54	0.14412698	0.0739	0.0052	0.0506	0.0062	1.663	0.1	0.1603	0.0045	0.18825
21	24.8	35.3	1.4233871	0.0799	0.0063	0.0514	0.0045	1.75	0.14	0.1607	0.0049	0.2918
22	216	75.1	0.34768519	0.0724	0.0037	0.0492	0.0041	1.599	0.07	0.1613	0.003	0.16721
23	364	74.2	0.20384615	0.0772	0.0039	0.0516	0.0044	1.729	0.074	0.1619	0.003	0.36086
24	44.2	27.7	0.62669683	0.0757	0.0052	0.0477	0.0043	1.693	0.1	0.1619	0.0043	0.076604
25	819.4	191	0.23309739	0.0722	0.0035	0.0478	0.0044	1.607	0.078	0.1621	0.0042	0.27915
26	17.8	5.31	0.29831461	0.0713	0.0062	0.056	0.0066	1.64	0.14	0.1623	0.0052	0.14437
27	45.2	12.93	0.28606195	0.0774	0.0054	0.0435	0.0048	1.747	0.11	0.1625	0.0057	0.26814
28	94	8.57	0.09117021	0.0709	0.0039	0.0482	0.0056	1.614	0.085	0.1625	0.0038	0.55051
29	47.4	19.27	0.40654008	0.0745	0.0049	0.0489	0.0047	1.681	0.098	0.163	0.0036	0.045926

30	256	54.8	0.2140625	0.073	0.0038	0.049	0.0045	1.657	0.079	0.1643	0.0037	0.066445
31	58.7	39.3	0.66950596	0.0722	0.0044	0.0486	0.0042	1.665	0.09	0.1654	0.0036	0.29958
32	33.5	3.77	0.11253731	0.074	0.005	0.0559	0.0074	1.702	0.1	0.1658	0.0041	-0.11035
33	97.6	36.3	0.37192623	0.0706	0.0041	0.0458	0.0039	1.613	0.083	0.1657	0.0028	-0.019598
34	214.3	72.3	0.33737751	0.0735	0.0038	0.0491	0.0042	1.675	0.073	0.1658	0.003	0.043905
35	10.68	1.118	0.10468165	0.0842	0.0085	0.064	0.014	1.9	0.17	0.1655	0.0061	0.020896
36	718	42.5	0.0591922	0.0745	0.0036	0.0699	0.0075	1.711	0.073	0.166	0.003	0.64128
37	222	76.8	0.34594595	0.0734	0.0037	0.0507	0.0042	1.684	0.076	0.1673	0.0029	0.37733
38	42.5	30.1	0.70823529	0.0779	0.0052	0.0517	0.0046	1.805	0.11	0.167	0.0042	0.14112
39	171.4	56.7	0.33080513	0.0714	0.0039	0.0501	0.0042	1.656	0.079	0.1682	0.0029	-0.10119
40	65.4	140.6	2.14984709	0.0714	0.0047	0.0487	0.0041	1.665	0.098	0.1685	0.0037	0.042235
41	106.5	35.8	0.33615023	0.073	0.0038	0.0525	0.0046	1.7	0.08	0.1686	0.0033	0.37242
42	34.3	13.52	0.3941691	0.0744	0.0051	0.0506	0.0047	1.741	0.11	0.1696	0.0042	0.17977
43	509.4	151.4	0.29721241	0.0721	0.0035	0.05018	0.004	1.692	0.07	0.1697	0.0027	0.2836
44	307	69.1	0.22508143	0.0718	0.0036	0.0495	0.0041	1.692	0.072	0.17	0.0029	0.087208
45	646	53.6	0.08297214	0.0727	0.0035	0.0484	0.0041	1.716	0.074	0.1702	0.0029	0.61744
46	165.9	43.8	0.26401447	0.0724	0.0038	0.0522	0.0044	1.701	0.076	0.1702	0.0029	-0.045609
47	264	80.6	0.30530303	0.0727	0.0037	0.0515	0.0043	1.702	0.075	0.1706	0.0028	0.23036
48	43.3	22.5	0.51963048	0.0862	0.0058	0.0612	0.0054	2.01	0.13	0.1712	0.0049	0.41047
49	405	81.3	0.20074074	0.0738	0.0036	0.0498	0.004	1.758	0.073	0.1713	0.0027	0.34858
50	104.1	39.8	0.38232469	0.07	0.0037	0.0507	0.0043	1.67	0.076	0.1716	0.0032	0.066367
51	99.4	32.6	0.32796781	0.0713	0.0041	0.0511	0.0045	1.703	0.086	0.1718	0.0032	-0.067185
52	143.7	26.96	0.18761308	0.0703	0.004	0.0514	0.0048	1.673	0.084	0.1718	0.0032	0.16725
53	26.47	7.66	0.28938421	0.0785	0.0059	0.062	0.0065	1.88	0.13	0.1735	0.0048	0.089504
54	118.8	41.3	0.3476431	0.0761	0.0041	0.0537	0.0048	1.807	0.092	0.174	0.0041	0.37859
55	121.8	29.3	0.24055829	0.0738	0.0039	0.0534	0.0044	1.802	0.084	0.1747	0.0033	0.3402
56	233.3	30.8	0.13201886	0.0731	0.0039	0.0545	0.0047	1.812	0.082	0.1789	0.0029	-0.1093
57	383	33	0.08616188	0.074	0.0037	0.0509	0.0044	1.846	0.083	0.1789	0.004	0.69853
58	34.2	61.8	1.80701754	0.0983	0.0093	0.0527	0.0042	2.41	0.22	0.1785	0.0043	0.19042
59	176	92.2	0.52386364	0.0794	0.0042	0.0526	0.0043	1.993	0.1	0.181	0.004	0.51477
60	89.2	21.85	0.24495516	0.0731	0.0041	0.0542	0.0047	1.833	0.088	0.1811	0.0037	0.033614

61	372.7	41.9	0.11242286	0.0736	0.0036	0.0522	0.0044	1.834	0.075	0.1814	0.0028	0.077843
62	169	75.7	0.44792899	0.075	0.0039	0.0553	0.0046	1.86	0.083	0.1821	0.0033	0.32428
63	242.4	100	0.41254125	0.0759	0.0038	0.0547	0.0049	1.921	0.1	0.1823	0.0052	0.8629
64	161.9	59.1	0.36504015	0.0746	0.0039	0.0567	0.0048	1.902	0.087	0.1838	0.0036	0.21998
65	59.2	35.7	0.60304054	0.0768	0.0044	0.0575	0.0049	1.914	0.098	0.184	0.005	0.11875
66	168.2	53.5	0.31807372	0.0764	0.0041	0.0534	0.0045	1.964	0.093	0.1858	0.0035	0.38958
67	135.5	56.2	0.41476015	0.0762	0.0041	0.0541	0.0046	1.97	0.091	0.1864	0.0033	-0.10073
68	316.7	56.6	0.17871803	0.0772	0.0039	0.0563	0.0047	2.025	0.087	0.1882	0.0032	0.13879
69	576	65.5	0.11371528	0.0773	0.0037	0.0569	0.0048	2.08	0.085	0.1944	0.0029	0.29314
70	48.2	20.63	0.4280083	0.0775	0.0047	0.0553	0.0048	2.112	0.12	0.1949	0.0044	0.25412
71	242	39.7	0.16404959	0.0759	0.0039	0.0578	0.0053	2.05	0.092	0.1952	0.0034	0.61003
72	63.6	44.4	0.69811321	0.0762	0.0049	0.0587	0.005	2.064	0.12	0.196	0.0039	0.057612
73	64.6	29.4	0.45510836	0.0765	0.0045	0.0573	0.0049	2.057	0.11	0.1972	0.0041	0.15753
74	109.8	45	0.40983607	0.0963	0.0076	0.0792	0.009	2.66	0.22	0.1977	0.0046	0.5202
75	104.1	32	0.30739673	0.0776	0.0041	0.0594	0.0051	2.111	0.098	0.198	0.0039	0.30806
76	169	59.4	0.35147929	0.0784	0.004	0.0585	0.0048	2.17	0.094	0.2005	0.0035	0.046758
77	108.9	30	0.27548209	0.0803	0.0043	0.0613	0.0053	2.237	0.1	0.2008	0.0041	0.14741
78	37.1	18.72	0.50458221	0.0797	0.0051	0.0578	0.0054	2.207	0.13	0.2017	0.0042	0.12912
79	563	297	0.52753108	0.0778	0.0038	0.057	0.0046	2.179	0.091	0.2029	0.0031	0.54147
80	356	155.7	0.43735955	0.0806	0.0039	0.0566	0.0046	2.273	0.098	0.2032	0.0036	0.61999
81	649	103.8	0.15993837	0.07815	0.0037	0.0603	0.0049	2.191	0.088	0.2032	0.0032	0.3255
82	277	71.8	0.25920578	0.0778	0.0038	0.0603	0.005	2.167	0.091	0.2036	0.0034	0.16951
83	266	95.8	0.36015038	0.07972	0.0038	0.06	0.0049	2.317	0.098	0.2089	0.0035	0.53027
84	121	74.3	0.61404959	0.0775	0.0041	0.0606	0.0051	2.223	0.1	0.2098	0.004	0.16351
85	66.4	39.9	0.60090361	0.08	0.0044	0.0617	0.0052	2.307	0.11	0.2095	0.0044	0.18043
86	89.3	45.8	0.51287794	0.0807	0.0045	0.0641	0.0053	2.321	0.11	0.2105	0.0041	-0.033186
87	224	123	0.54910714	0.0809	0.004	0.0636	0.0052	2.361	0.1	0.2123	0.0035	0.22697
88	195.8	74.5	0.3804903	0.0806	0.004	0.065	0.0053	2.378	0.1	0.2136	0.0035	0.36238
89	145.3	47.95	0.33000688	0.0822	0.0043	0.0631	0.0053	2.455	0.1	0.2141	0.0038	-0.047583
90	233.7	85.1	0.36414206	0.0835	0.0042	0.0638	0.0053	2.491	0.11	0.2142	0.0039	0.40705
91	271	56.4	0.20811808	0.0803	0.004	0.0638	0.0055	2.353	0.1	0.2142	0.0043	0.51107

92	54.5	56.5	1.03669725	0.0775	0.0041	0.0618	0.0053	2.309	0.11	0.2157	0.0043	0.44381
93	39.62	18.36	0.46340232	0.0864	0.0056	0.0665	0.0061	2.6	0.14	0.2179	0.005	0.14814
94	145	45.9	0.31655172	0.081	0.004	0.061	0.0053	2.436	0.11	0.2179	0.0046	0.60354
95	255	90.2	0.35372549	0.0848	0.0043	0.0657	0.0054	2.623	0.12	0.223	0.0042	0.46769
96	427	145.9	0.34168618	0.083	0.004	0.0637	0.0052	2.581	0.11	0.2249	0.0039	0.63174
97	206	76.9	0.37330097	0.0884	0.0044	0.0701	0.0057	2.993	0.13	0.2478	0.0041	0.37701
98	126.3	76.7	0.60728424	0.0908	0.0046	0.0871	0.0075	3.143	0.14	0.2502	0.0046	0.33907
99	89.1	32.9	0.36924804	0.0916	0.0049	0.0714	0.006	3.048	0.14	0.2437	0.0042	0.16957

Anexo 3. Tabla de radios corregidos para los zircones obtenidos por Decantación.

	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 2s$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 2s$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 2s$	Best age (Ma)	$\pm 2s$	Disc %
1	170.4	3.9	167.5	9.1	90	130	170.40	3.9	-1.73134328
2	182	4.2	186	13	270	180	182.00	4.2	2.15053763
3	187.6	6.1	183	18	110	240	187.60	6.1	-2.5136612
4	247	11	268	38	490	310	247.00	11	7.8358209
5	247.9	6.5	258	15	280	160	247.90	6.5	3.91472868
6	249	11	297	35	560	300	249.00	11	16.1616162
7	252	14	269	34	330	220	252.00	14	6.3197026
8	252.5	7.5	255	18	230	190	252.50	7.5	0.98039216
9	255	8	255	22	200	210	255.00	8	0
10	257.4	9.6	259	23	260	230	257.40	9.6	0.61776062
11	259.1	9.1	269	22	350	210	259.10	9.1	3.6802974
12	260	12	262	38	190	320	260.00	12	0.76335878
13	260.2	8.6	277	24	370	220	260.20	8.6	6.06498195
14	260.8	8.9	252	40	310	310	260.80	8.9	-3.49206349
15	280	65	338	83	650	270	280.00	65	17.1597633
16	675	33	715	37	868	120	675.00	33	5.59440559
17	761.5	26	807	29	929	110	761.50	26	5.63816605
18	857	24	964	38	1229	120	857.00	24	11.0995851
19	911	16	1026	42	1240	140	911.00	16	11.208577
20	958	25	995	37	1033	130	958.00	25	3.71859296
21	960	27	1020	52	1170	170	960.00	27	5.88235294
22	964	17	971	28	989	110	964.00	17	0.72090628
23	967	16	1021	29	1125	98	967.00	16	5.28893242
24	967	24	1005	40	1080	140	967.00	24	3.78109453
25	968.3	23	972.7	29	987	100	968.30	23	0.45234913
26	969	29	985	57	950	200	969.00	29	1.62436548
27	970	31	1034	38	1120	140	970.00	31	6.18955513
28	970	21	973	33	958	120	970.00	21	0.30832477
29	973	20	1005	39	1052	130	973.00	20	3.1840796
30	980.4	20	992	30	1003	100	980.40	20	1.16935484

31	987	20	992	35	989	120	987.00	20	0.50403226
32	988	23	1004	37	1010	140	988.00	23	1.5936255
33	988.4	16	976	32	924	120	988.40	16	-1.2704918
34	989	16	1001	29	1026	110	989.00	16	1.1988012
35	991	32	1090	61	1220	200	991.00	32	9.08256881
36	991	16	1012	28	1055	96	991.00	16	2.07509881
37	997.2	16	1004	30	1023	110	997.20	16	0.67729084
38	998	23	1046	41	1154	130	998.00	23	4.58891013
39	1002.1	16	996	30	952	110	1002.10	16	-0.6124498
40	1003	20	994	36	974	130	1003.00	20	-0.9054326
41	1004	18	1010	29	1013	110	1004.00	18	0.59405941
42	1010	23	1018	40	1010	140	1010.00	23	0.78585462
43	1010.6	15	1004.9	26	989	100	1010.60	15	-0.56722062
44	1011.9	16	1007	26	992	110	1011.90	16	-0.48659384
45	1013.1	16	1014	28	1014	90	1013.10	16	0.0887574
46	1013.4	16	1007	29	994	110	1013.40	16	-0.63555114
47	1015.3	15	1008	28	1003	100	1015.30	15	-0.72420635
48	1018	27	1118	44	1304	140	1018.00	27	8.94454383
49	1019.1	15	1029.5	27	1037	96	1019.10	15	1.01019913
50	1021	18	996	29	936	100	1021.00	18	-2.51004016
51	1022	18	1017	31	969	120	1022.00	18	-0.49164208
52	1022	17	996	32	929	120	1022.00	17	-2.61044177
53	1031	26	1071	45	1120	150	1031.00	26	3.73482726
54	1034	22	1049	32	1084	110	1034.00	22	1.42993327
55	1038	18	1044	31	1040	100	1038.00	18	0.57471264
56	1060.7	16	1049	30	1014	100	1060.70	16	-1.11534795
57	1061	22	1064	28	1049	110	1061.00	22	0.28195489
58	1062	22	1238	62	1550	180	1062.00	22	14.2164782
59	1072	22	1110	35	1188	110	1072.00	22	3.42342342
60	1073	20	1058	33	1041	110	1073.00	20	-1.41776938
61	1074.7	15	1057.3	27	1025	100	1074.70	15	-1.64570131

62	1078	18	1068	30	1065	100	1078.00	18	-0.93632959
63	1079	28	1088	35	1091	97	1079.00	28	0.82720588
64	1088	19	1080	30	1056	100	1088.00	19	-0.74074074
65	1088	27	1083	35	1107	120	1088.00	27	-0.46168052
66	1098	19	1101	32	1110	110	1098.00	19	0.27247956
67	1102	18	1103	31	1097	110	1102.00	18	0.09066183
68	1112	17	1123	30	1119	100	1112.00	17	0.97951915
69	1145	16	1141.7	28	1124	96	1145.00	16	-0.28904266
70	1148	23	1148	39	1131	120	1148.00	23	0
71	1149	18	1131	31	1097	100	1149.00	18	-1.59151194
72	1156	22	1136	38	1078	130	1156.00	22	-1.76056338
73	1160	22	1135	35	1083	120	1160.00	22	-2.20264317
74	1163	25	1313	56	1540	130	1163.00	25	11.4242193
75	1164	21	1151	32	1135	100	1164.00	21	-1.12945265
76	1178	19	1172	29	1149	100	1178.00	19	-0.51194539
77	1179	22	1191	33	1201	100	1179.00	22	1.00755668
78	1184	23	1182	39	1172	120	1184.00	23	-0.16920474
79	1190.9	17	1174	29	1138	97	1190.90	17	-1.439523
80	1192	19	1205	31	1216	90	1192.00	19	1.07883817
81	1192.5	17	1177.9	28	1152	92	1192.50	17	-1.23949401
82	1195	18	1170	29	1147	98	1195.00	18	-2.13675214
83	1223	19	1217	30	1191	99	1223.00	19	-0.49301561
84	1228	21	1187	32	1122	110	1228.00	21	-3.45408593
85	1229	23	1212	36	1182	110	1229.00	23	-1.40264026
86	1231	22	1220	36	1220	120	1231.00	22	-0.90163934
87	1241.1	18	1232	31	1215	97	1241.10	18	-0.73863636
88	1247.7	19	1237	31	1213	100	1247.70	19	-0.86499596
89	1250	20	1258	31	1249	99	1250.00	20	0.63593005
90	1251	21	1268	32	1275	98	1251.00	21	1.34069401
91	1251	23	1230	33	1204	97	1251.00	23	-1.70731707
92	1259	23	1216	35	1132	110	1259.00	23	-3.53618421

93	1270	26	1295	41	1339	130	1270.00	26	1.93050193
94	1270	24	1252	32	1222	93	1270.00	24	-1.43769968
95	1297	22	1310	33	1304	99	1297.00	22	0.99236641
96	1307	21	1294	31	1277	96	1307.00	21	-1.00463679
97	1427	21	1412	30	1394	89	1394.00	21	-1.06232295
98	1439	24	1444	36	1436	97	1436.00	24	0.34626039
99	1406	22	1421	35	1449	100	1449.00	22	1.05559465

Anexo 4. Tabla de edades corregidas para los zircones obtenidos por Decantación.

