



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA
CENTRO DE GEOCIENCIAS

ESTUDIO TERMOTECTÓNICO DE LA UNIDAD GRANITOIDES ESPERANZA
MEDIANTE U-Pb Y TRAZAS DE FISIÓN EN APATITOS

TESIS

PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

PRESENTA

SANDRA LORENA FLOREZ AMAYA

TUTOR:

DR. FANIS ABDULLIN

CONACyT – CENTRO DE GEOCIENCIAS, UNAM

MIEMBROS DEL COMITÉ SINODAL

DR. MARIANO ELÍAS HERRERA, INSTITUTO DE GEOLOGÍA, UNAM

DR. LUIGI A. SOLARI, CENTRO DE GEOCIENCIAS, UNAM

DRA. BERLAINE ORTEGA FLORES, CENTRO DE GEOCIENCIAS, UNAM

DRA. MÉLANIE NOURY, INSTITUTO DE GEOLOGÍA, ERNO, UNAM

JURIQUILLA, QUERÉTARO, AGOSTO DE 2021.



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

“Declaro conocer el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, plasmado en la Legislación Universitaria. Con base en las definiciones de integridad y honestidad ahí especificadas, aseguro mediante mi firma al calce que el presente trabajo es original y enteramente de mi autoría. Todas las citas de, o referencias a, las obras de otros autores aparecen debida y adecuadamente señaladas, así como acreditadas mediante los recursos editoriales convencionales.”

A handwritten signature in black ink, reading "Sandra Lorena Florez Amaya." The signature is written in a cursive style with some capital letters.

Sandra Lorena Florez Amaya

AGRADECIMIENTOS

Agradezco de manera sincera y especial al Consejo Nacional de Ciencias y Tecnología CONACYT, por concederme la beca nacional para poder realizar mis estudios de maestría y al proyecto “La amalgamación del Supercontinente Pangea: esclareciendo el registro tectónico del sur de México” PAPIIT – DGAPA UNAM IN101520, por los recursos brindados para el desarrollo de esta investigación.

Al Dr. Fanis Abdullin por su apoyo, asesoría, y guía en el planteamiento y desarrollo de este proyecto, su ayuda incondicional durante mi estancia en México y su amistad. También quiero agradecer a los doctores Luigi Solari y Roberto Maldonado por la asesoría, conocimiento, apoyo en campo y los espacios de gratas conversaciones que me enriquecieron tanto profesional como personalmente.

Quiero agradecer a los doctores Luigi Solari, Mariano Elías Herrera, Berlaine Ortega y Mélanie Noury, por su revisión y valiosos aportes que mejoraron este manuscrito.

Mi más sincero agradecimiento con Andrés David Núñez por apoyarme desde que esta idea surgió en Colombia, por ser el adulto responsable, por creer en mí y levantarme cuando la duda se apoderaba de mi mente, por sus consejos, apoyo y guía, por su amistad, por las largas jornadas de estudio y por haber sido parte de las etapas más importantes de esta aventura en un país extraño.

Agradezco a Walter Reategui, Karen Hernández, Daniela Peña, Steven Barrios, Héctor Romo y Víctor Vidaña, por acogerme, hospedarme, brindarme su amistad y presentarme todo lo bonito de México. De igual manera, agradezco a Antony Hernández y Alejandra Rodríguez por su apoyo, locuras y amistad, trayendo con ellos una parte especial de Colombia.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, en especial al Centro de Geociencias, los doctores con los que tuve el placer de compartir y crecer profesionalmente, a mis compañeros de universidad, a Irene Pérez, Walter Reategui, Ricardo Milian y Brighith Fonseca por su apoyo, guía y consejo en el proceso de separación mineral y procesamiento de los datos. Agradezco también al personal administrativo, quienes han sido muy amables, solidarios y de gran ayuda en todo este proceso.

A mis compañeros de casa y el parche de colombianos en Querétaro por su ayuda y hacerme sentir muchas veces en mi hogar.

Finalmente, gracias a mi familia por su apoyo, cariño, comprensión y la confianza depositada al dejarme vivir libremente esta etapa de mi vida.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	10
INTRODUCCIÓN.....	12
1.1. OBJETIVOS	13
1.1.1. Objetivo General.....	13
1.1.2. Objetivos Específicos	13
1.2. HIPÓTESIS	13
1.3. LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	14
2. MARCO TEÓRICO	16
2.1. Sistema de U–Pb en apatito	17
2.2. Trazas de fisión	19
3. MARCO GEOLÓGICO	22
3.1. Terreno Maya.....	23
3.2. Microcontinente Oaxaquia.....	24
3.3. Terreno Cuicateco.....	25
3.4. Terreno Xolapa	26
3.5. Terreno Mixteco	26
3.5.1. Granitoides Esperanza (GE).....	27
3.6. Arco magmático del este de México.....	29
3.7. Historia evolutiva.....	29
4. METODOLOGÍA.....	31
4.1. Trabajo de campo.....	31
4.2. Petrografía de láminas delgadas.....	32
4.3. Separación de minerales accesorios.....	32
4.4. Geocronología U–Pb en zircones.	32
4.5. Método U–Pb y geoquímica de apatito.....	34
4.6. Trazas de fisión en apatitos (TFA).....	35
4.7. Modelos tiempo–Temperatura (t–T).....	37
5. RESULTADOS	39
5.1. Descripción litológica y análisis petrográfico	40

5.2.	Geocronología U–Pb en zircones	46
5.3.	Geocronología U–Pb en apatito.....	50
5.4.	Geoquímica de apatitos.....	52
5.5.	Trazas de Fisión en Apatito (TFA)	55
6.	DISCUSIÓN.....	59
6.1.	Metamorfismo de la unidad Granitoides Esperanza (GE)	59
6.2.	Cristalización y primer evento metamórfico de los Granitoides Esperanza (GE) .	62
6.3.	Metamorfismo de retrogresión de los Granitoides Esperanza (GE)	65
6.4.	Exhumación de los Granitoides Esperanza (GE) durante la Orogenia Mexicana .	69
6.5.	Evolución de los Granitoides Esperanza (GE)	74
7.	CONCLUSIONES.....	77
	REFERENCIAS	79
	ANEXO A: Petrografía	91
	ANEXO B: Imágenes de cátodoluminiscencia de zircones	98
	ANEXO C: Análisis U–Pb en zircones mediante LA–ICP-MS.....	102
	ANEXO D: Análisis U–Pb en apatitos mediante LA–ICP-MS	107
	ANEXO E: Análisis geoquímico de apatitos mediante LA–ICP-MS	112
	ANEXO F: Datos trazas de fisión de granos individuales de apatitos	119
	ANEXO G: Mediciones de longitudes de trazas de fisión en apatitos.....	122
	ANEXO G: Datos de las muestras utilizadas para el análisis geoquímico	124

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. a) Provincias fisiográficas relacionadas con el Complejo Acatlán. S.M.S= Sierra Madre del Sur; F.V.T.M= Faja Volcánica Trans-Mexicana, b) Basamento metamórfico del sur de México, c) Mapa geológico de la zona de estudio. Modificado de Ortega-Gutiérrez et al. (2018).....	15
Figura 2. Temperaturas de cierre de los diferentes termocronómetros. Modificado de Lynn (2005).	17
Figura 3. Proceso para generación de una traza de fisión a) Fisión nuclear del U-238, b) Ionización, c) Desplazamiento electrostático, d) Vista general de a+b+c, e) Trazas de fisión en el cristal; TINCLE= traza confinada con intersecciones en clivaje o fractura. TINT= Traza confinada con intersección con otra traza. Modificado de Fleischer et al. (1975) y Malusà y Fitzgerald (2019).	19
Figura 4. Mapa de terrenos tectonoestratigráficos de México a) Modelo de Campa y Coney (1983), b) Modelo de Sedlock et al. (1993), c) Modelo de Keppie (2004), donde se incluye el Terreno Oaxaquia, d) Modelo Centeno-García (2017). Modificado de Keppie (2004) y Centeno-García (2017).	22
Figura 5. Disposición de las rocas del basamento metamórfico de los terrenos del sur de México G: Guerrero, C: Cuicateco, Mi: Mixteco, O: Oaxaquia, M: Maya y X: Xolapa (Modificado de Ortega-Gutiérrez et al., 2018).	24
Figura 6. Montaje de los zircones de la muestra Pxt-8, los círculos amarillos resaltan el área de la ablación de borde y/o núcleo, en blanco se encuentran los números de grano seguido de la edad medida en el grano. a) Imagen de catodoluminiscencia de los cristales, b) Cristales bajo luz reflejada.	33
Figura 7. Procedimiento para la preparación de las muestras para el análisis por trazas de fisión en apatito: 1) Montaje del cristal, 2) Pulido de la muestra, 3) ataque químico para la revelación de las trazas, 4) Medición del U mediante la ablación láser directamente en el cristal. Modificado de Malusà y Fitzgerald (2019).	36
Figura 8. Mapa geológico de la zona de estudio (Modificado de Ortega-Gutiérrez et al., 2018). Los polígonos pertenecientes a las muestras indican los análisis practicados en ellos: GAp (geoquímica de apatito), U-Pb Ap o Zr (geocronología U-Pb), TFA (trazas de fisión en apatito).	39
Figura 9. Fotografías de campo de los GE a) Contacto de los augengneises con una roca máfica altamente recrystalizada en la localidad tipo, b) Variación textural de los GE en el sector de Patlanoaya, margen derecha del río Balsas, c) Megacristales de feldespatos potásicos unidos, formando un lente, d) Megacristales escalonados, e) Feldespato con bordes blanquecinos y formas sigmoides.....	41
Figura 10. Características generales de los Granitoides Esperanza (GE) a) Textura lepidogranoblástica en la muestra Pxt – 6, b) Minerales hojosos orientados en sentido de la foliación principal en la muestra Pxt – 0, c) Mica fish que indica una cinemática sinistral en la muestra Pxt – 9b, d) Individuos de Feldespato potásico y plagioclasa con inclusiones de moscovita tabular de la muestra Pxt – 7.	42
Figura 11. a) Microfracturas con relleno de calcita que cortan la foliación principal en la muestra Pxt – 7, b) Moscovita reemplazada por calcita en la muestra Pxt – 6, c) Clorita en la	

muestra Pxt – 6, d) Fragmentos de granate en medio de clorita y biotita en la banda lepidoblástica.....	43
Figura 12. a, b) Testigos de las muestras Pxt-9 y 10 donde se ve la foliación y los cristales de Qtz y Kfs, c) Cristales de Qtz con evidencia de recristalización, d) Individuos de Mc (macla de tartán), Kfs, Qtz y Ms, e) Textura pertítica en Kfs, f) Textura poiquiloblástica en Kfs, inclusiones de Ms tabulares.....	45
Figura 13. a) Imagen en nícoles cruzados de individuos de moscovita deformada (mica fish) con dirección concordante a la foliación, b) Imagen en nícoles cruzados de agregados de turmalina con una ligera elongación paralela a la foliación, c y d) Imágenes en nicoles paralelos y cruzados respectivamente de porfidoblasto de granate fragmentado.....	46
Figura 14. Diagrama de concordia muestra Pxt-8 e imágenes de cátodoluminiscencia (CL) de algunos de los zircones analizados, donde se resalta con el círculo amarillo el área del spot y la edad medida en ese punto.....	47
Figura 15. Diagrama de Concordia de la muestra Pxt-9b con edad de intersección y media ponderada de los 16 zircones del grupo inferior analizados, con algunas imágenes de cátodoluminiscencia, donde se resalta con el círculo amarillo el área del spot y la edad medida en ese punto.....	48
Figura 16. Diagrama de Concordia de la muestra Pxt-10 con edad de intersección y media ponderada de los zircones analizados con algunas imágenes de cátodoluminiscencia, donde se resalta con el círculo amarillo el área del spot y la edad medida en ese punto.....	49
Figura 17. Diagrama de Concordia de la muestra Pxt-11 con edad de intersección y media ponderada de los 13 zircones del grupo inferior analizados, con algunas imágenes de cátodoluminiscencia, donde se resalta con el círculo amarillo el área del spot y la edad medida en ese punto.....	50
Figura 18. Diagramas de concordia Tera-Wasserburg de los apatitos de la unidad Granitoides Esperanza a) Muestra Px – 1, b) Muestra Pxt – 5, c) Muestra Pxt – 7, d) Muestra Pxt – 9b, e) Muestra Pxt – 11.....	51
Figura 19. Diagramas de patrón de elementos de tierras raras (REE) normalizados a condrito (McDonough y Sun, 1995) de los apatitos recolectados de las muestras de la unidad GE..	53
Figura 20. Diagrama de Y vs Sr (ppm) en apatitos de las muestras recolectadas.....	54
Figura 21. Diagrama de las concentraciones de U vs Th (ppm) en apatitos de las muestras recolectadas.....	55
Figura 22. Diagramas tipo radial de edades de TFA y gráficos de %Cl vs Edad TFA, a) Muestra Px – 1, b) Muestra Pxt – 5, c) Muestra Pxt –7, d) Muestra Pxt – 9b y e) Muestra Pxt – 11.....	57
Figura 23. Diagramas de Presión – Temperatura (P-T) a) Patrones de referencia de complejos de subducción y colisión, b) Patrón para la Suite Esperanza, donde se resaltan las localizaciones aproximadas de los eventos M1 y M2. ZE: facies zeolita; PP: facies fengita – pumpelita; B: facies esquistos azules; GS: facies esquistos verdes; EA: facies epidota – anfibolita; A: facies anfibolita; EC: facies eclogita; G: facies granulita. Modificado de Vega-Granillo et al., 2007.....	61

Figura 24. Mapa de edades reportadas para la unidad Granitoides Esperanza en este estudio y por Galaz et al. 2013; Ortega-Gutiérrez et al. 1999; Sánchez-Zavala et al. 2004; Talavera-Mendoza et al. 2005 y Vega-Granillo et al. 2007.....	63
Figura 25. Edades U-Pb en zircón mediante modelo de discordia con edades de intercepto superior e inferior para las muestras a) Pxt-9b y b) Pxt-11.....	64
Figura 26. Diagramas multielemental normalizados a condrito (McDonough y Sun, 1995) REY (tierras raras e itrio)+ Sr + Th + U de los apatitos correspondientes a las muestras de la unidad GE. Las líneas discontinuas corresponden a los valores promedio de apatitos de muestras conocidas en diferentes facies litológicas. Granito tipo “S” (Sha y Chappell, 1999), Alto grado metamórfico (Henrichs et al., 2018; Nutman, 2007), Ortogneis y Metapelita (Henrichs et al., 2018).	66
Figura 27. Esquema de categorización de máquina de vectores (SVM) de O’Sullivan et al. (2020) para la clasificación de granos de apatitos de las muestras de la unidad GE mediante la relación Sr/Y vs ΣLREE (Las abreviaciones para los grupos son: BM= Rocas de grado bajo a medio de metamorfismo; AM= Alto grado de metamorfismo; S= Granitoides tipo “S” y tipo I “félsicos”; UM= rocas ultramáficas que incluyen carbonatitas, piroxenitas y lherzolitas; IM= Granitoides máficos tipo I y rocas ígneas máficas; ALK= Rocas ígneas ricas en álkalis.	68
Figura 28. Modelos termales t – T basados en longitudes y edades de trazas de fisión de las muestras Px – 1 (a)) y Pxt – 9b (b)) de la unidad GE. La línea de color azul indica el valor promedio ponderado por el GOF de todos los pasos y, la negra, el “best fit model”.....	70
Figura 29. Mapa regional del bloque Acatlán – Oaxaca donde se resaltan las muestras reportadas con edades de TFA hacia el este, en la región de Piaxtla (este estudio); la región central, en cercanías de la población de Caltepec (Muestras ABM-02, 05, 10; Bedoya Mejía, 2018); hacia el oeste en la región de Tehuacán (Muestras RN-3, V-1; Milián, 2019). Modificado de Ortega-Gutiérrez et al. (2018) y Servicio Geológico Mexicano, (1998b, 1998a, 2000, 2001).	72
Figura 30. Modelos termales t-T, a) Muestra ABM-02, b) Muestra ABM-05, c) Muestra ABM-10 (Bedoya Mejía, 2018); d) Muestra RN-3, e) Muestra V-1 (Milián, 2019).	73
Figura 31. Modelos de migración de la deformación en la Sierra Madre del Sur a) Deformación por contracción b) Extensión horizontal NE, modificado de Nieto-Samaniego et al. (2006).....	74

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Localización y litología de las muestras recolectadas en la fase de trabajo de campo. GE: Granitoides Esperanza.....	31
Tabla 2. Resumen de edades reportadas en este estudio.	65
Tabla 3. Datos de longitudes media de trazas de fisión, edad y prueba de Chi-cuadrado, correspondientes a las muestras con modelos de historia termal	69

RESUMEN

La unidad Granitoides Esperanza (GE) hace parte del conjunto de rocas que conforman la *suite* de alta presión del Complejo Acatlán. Esta unidad se caracteriza por la presencia de augengneises en facies de anfibolita, milonitizadas con megacristales de feldespatos potásicos. Para dicha unidad se ha definido una edad de cristalización ordovícica temprana, mientras que para su metamorfismo se infiere que tuvo lugar entre el Silúrico tardío y Devónico Temprano. Por último, se han determinado algunas edades de enfriamiento entre el Devónico Tardío y Misisípico, las cuales son determinadas y atribuidas a procesos de exhumación. Para entender mejor los eventos tectonotermales que ha sufrido la unidad GE, se recolectaron diez muestras entre las localidades de Patlanoaya, Acatlán, Tecomatlán y Mariscal de Juárez; cuyas características litológicas varían de augengneises protomiloníticos a ultramiloníticos y pegmatitas altamente foliadas. Para establecer la historia tectono-térmica, se implementaron las técnicas de trazas de fisión en apatitos y U–Pb en zircón y en apatito. Los augengneises en la zona de estudio se describen como rocas que evidencian facies de eclogita como su pico de metamorfismo, con dos estados de retrogresión: uno en facies anfibolita y el segundo de baja temperatura. Los estudios geocronológicos de U–Pb en zircón realizados arrojan edades entre 464.7 ± 3.3 y 469 ± 3.5 Ma para el subgrupo litológico de los augengneises, y de 461.6 ± 3.3 Ma para las rocas pegmatíticas; éstas son definidas como edades de cristalización que tuvieron lugar en el Ordovícico Medio para ambas litologías. Mediante los fechamientos por U–Pb en apatito ($T_c = 450\text{--}550$ °C), se encontraron edades entre 333 ± 9 y 366 ± 19 Ma en los augengneises (en un único ajuste en la línea de discordia); lo que permite constreñir el primer evento metamórfico de retrogresión en facies anfibolita–epidota ($450\text{--}550$ °C), con apatitos que presentan características químicas de metamorfismo de grado medio y alto. Por último, las edades encontradas mediante el método de trazas de fisión varían de 53.4 ± 3.5 a 71.8 ± 2.9 Ma; lo que indica edades de enfriamiento correspondientes a eventos de exhumación y acortamiento de los GE, durante la Orogenia Mexicana en la Sierra Madre del Sur. Esta orogenia ha sido interpretada en este rango de tiempo como una fase de régimen transpresivo, ideal para el levantamiento de las rocas que conforman el basamento polimetamórfico del Complejo Acatlán.

ABSTRACT

The Granitoides Esperanza (GE) unit is an assemblage of metamorphic lithologies which form part of a high-pressure suite belonging to the Acatlán Complex. This unit includes augen gneisses of amphibolite facies, milonitized with megacrystals of milonitized K-feldspar. A lower Ordovician crystallization age was proposed for this unit, whereas the main metamorphic event took place between the upper Silurian and lower Devonian. Some cooling ages, ranging from upper Devonian to Mississippian, were also determined and attributed to exhumation processes. To better understand the thermotectonic events that affected the Granitoides Esperanza unit, ten samples were collected between the localities of Patlanoaya, Acatlán, Tecomatlán y Mariscal de Juárez. Their lithological composition varies from protomylonitic to ultramylonitic augen gneisses and strongly foliated pegmatites. Zircon and apatite U–Pb geochronology and apatite fission-track analysis were used to establish the thermotectonic history. The Augen gneisses from the study area are described as high-pressure rocks with their peak of metamorphism reached at eclogite facies, with two retrogression events: the first event at amphibolite facies and the second one at low-temperature conditions. The geochronological analyses of zircon U–Pb yielded ages from 464.7 ± 3.3 and 469 ± 3.5 Ma for the augen gneisses, and 461.6 ± 3.3 Ma for the pegmatitic rocks. These data are interpreted as the crystallization ages that took place during the middle Ordovician. Based on apatite U–Pb ($T_c = 450\text{--}550$ °C) thermochronology, ages of 346 ± 8 and 366 ± 19 Ma were obtained for the augen gneiss samples (in a single line of discord setting), which allowed detecting the first metamorphic event during retrogression at amphibolite–epidote facies ($450\text{--}550$ °C). These apatites have chemical characteristics of medium and high-grade metamorphism. Finally, apatite fission-track ages obtained in this study vary from 53.4 ± 3.5 to 71.8 ± 2.9 Ma, which were interpreted as cooling ages during shortening and exhumation events of the Granitoides Esperanza unit linked to Mexican Orogeny in the Sierra Madre del Sur. This orogenic event may be interpreted as a phase of transpressive regime, an ideal setting for the uplift of metamorphic rocks from the polymetamorphic basement of the Acatlán Complex.

INTRODUCCIÓN

El Complejo Acatlán conforma el basamento cristalino del terreno Mixteco al sur de México, donde se describe como un complejo polimetamórfico, con protolitos sedimentarios e ígneos, que presenta gran variación en los grados de metamorfismo regional e intensa deformación (Ortega-Gutiérrez et al., 2018). Este complejo se subdivide en dos grupos principales: Petlalcingo (Migmatita Magdalena y las Formaciones Chazumba y Cosoltepec) y Piaxtla (Formación Xayacatlán y Granitoides Esperanza). El Grupo Piaxtla consiste en una unidad metasedimentaria en facies anfibolita que localmente presenta lentes compuestos de rocas máficas y ultramáficas con metamorfismo en facies eclogita y esquisto azul, denominada como la Formación Xayacatlán; además, este grupo presenta una serie de metagranitoides con megacrystales de feldespato potásico, con alto grado de deformación definidos como Granitoides Esperanza (Ortega-Gutiérrez et al., 1999). Esta última unidad, junto con otros granitoides con megacrystales han sido interpretados como el resultado de procesos de fusión por deshidratación (Ortega-Gutiérrez et al. 1999), a su vez, se ha discutido si estos son producto de un arco magmático (Talavera-Mendoza et al., 2005; Vega-Granillo et al., 2007) o, de acuerdo con los datos obtenidos por Miller et al. (2007) puede indicar además, fusión de una fuente calco-alcalina o contaminación por sedimentos derivados de una provincia geológica mesoproterozoica.

Ortega-Gutiérrez et al. (2018) consideran a la unidad Granitoides Esperanza como la representación de una corteza continental subducida, cuya edad de cristalización es estimada entre 485 y 460 Ma por el método U–Pb en zircones (Galaz et al., 2013; Sánchez-Zavala et al., 2004; Vega-Granillo et al., 2007) y edades más jóvenes encontradas de 442 y 440 Ma mediante U–Pb en zircones por Talavera-Mendoza et al. (2005) y U–Pb en monacita por Ortega-Gutiérrez et al. (1999) respectivamente, las cuales se asocian a eventos de metamorfismo. Por último, se han reportado edades de enfriamiento de 374–317 Ma en moscovita y ca. 430 Ma en hornblenda (Galaz et al., 2013), para las rocas de alta presión en el área de Tehuizingo (metagranitoides y metabasitas del Grupo Piaxtla).

Este trabajo de tesis busca complementar la historia tectono-térmica de los Granitoides Esperanza (GE), mediante el uso de la termocronología de media y baja temperatura (U–Pb

y trazas de fisión en apatitos). Estas herramientas permiten establecer mediante las diferentes temperaturas de cierre de los minerales accesorios como el apatito en diferentes sistemas, los eventos tectonotérmicos que tuvieron lugar después de los picos de metamorfismo de dichas unidades; ya sea en relación con los movimientos tectónicos, sepultamiento y/o exhumación principalmente.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo General

Determinar la historia térmica asociada a la evolución tectónica para la unidad Granitoides Esperanza en el Complejo Acatlán, al sur de México.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Determinar la existencia de eventos geológicos que puedan estar asociados a las edades de enfriamiento obtenidas mediante la técnica de U–Pb en apatitos en las rocas pertenecientes a los Granitoides Esperanza.
- Establecer mediante las características químicas de los granos de apatito pertenecientes a la unidad Granitoides Esperanza, el tipo de metamorfismo asociado a dicha unidad.
- Definir la cronología de los eventos de enfriamiento/exhumación de la unidad Granitoides Esperanza.

1.2. HIPÓTESIS

El planteamiento inicial de esta investigación se basa en una posible exhumación homogénea de los cuerpos asociados a la unidad Granitoides Esperanza, en otras palabras, durante un solo evento (e.g., el evento tipo Laramídico). Sin embargo, con el implemento de diferentes métodos analíticos como U–Pb y trazas de fisión en apatitos, se podría igualmente establecer que el enfriamiento de este complejo polimetamórfico pudo ocurrir de forma heterogénea; es decir, diversos episodios de uno o más eventos que pueden anteceder al evento Laramídico.

1.3. LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El Complejo Acatlán se encuentra ubicado al sur de México, entre las provincias fisiográficas de la Sierra Madre del Sur (SMS) y la Faja Volcánica Trans-Mexicana (FVTM) (Figura 1a). Al sur del país se observa en la actualidad una tectónica activa, debido a la subducción de la Placa de Cocos bajo la Placa Norteamericana y hacia el sureste la interacción de dichas placas con la Placa Caribe marcado por el límite transformante del sistema de fallas Polochic – Motagua.

El Complejo Acatlán hace parte de los complejos metamórficos del Paleozoico (Figura 1b), y se extiende geográficamente desde el sur del estado de Puebla, siguiendo por el margen oeste del estado de Oaxaca y el margen este del estado de Guerrero.

El área de estudio se encuentra entre las coordenadas geográficas: 18°30'0" N, 98°20'0" W y 17°93'0" N, 98°0'0" W, las cuales abarcan los estados de Puebla y Oaxaca. La zona está definida entre las poblaciones de San Salvador Patlanoaya (Puebla) al norte y Mariscala de Juárez (Oaxaca) al sur; al este por la población de Acatlán y al oeste por la población de Tecamatlán. Este estudio hace hincapié en el cinturón medio de orientación N–S donde aflora principalmente la unidad Granitoides Esperanza, la cual se encuentra afectada por la Falla Tetla–Quicayán (Ortega-Gutiérrez et al., 2018), la cual es una falla de rumbo N–S con cinemática de tipo dextral (Figura 1c).

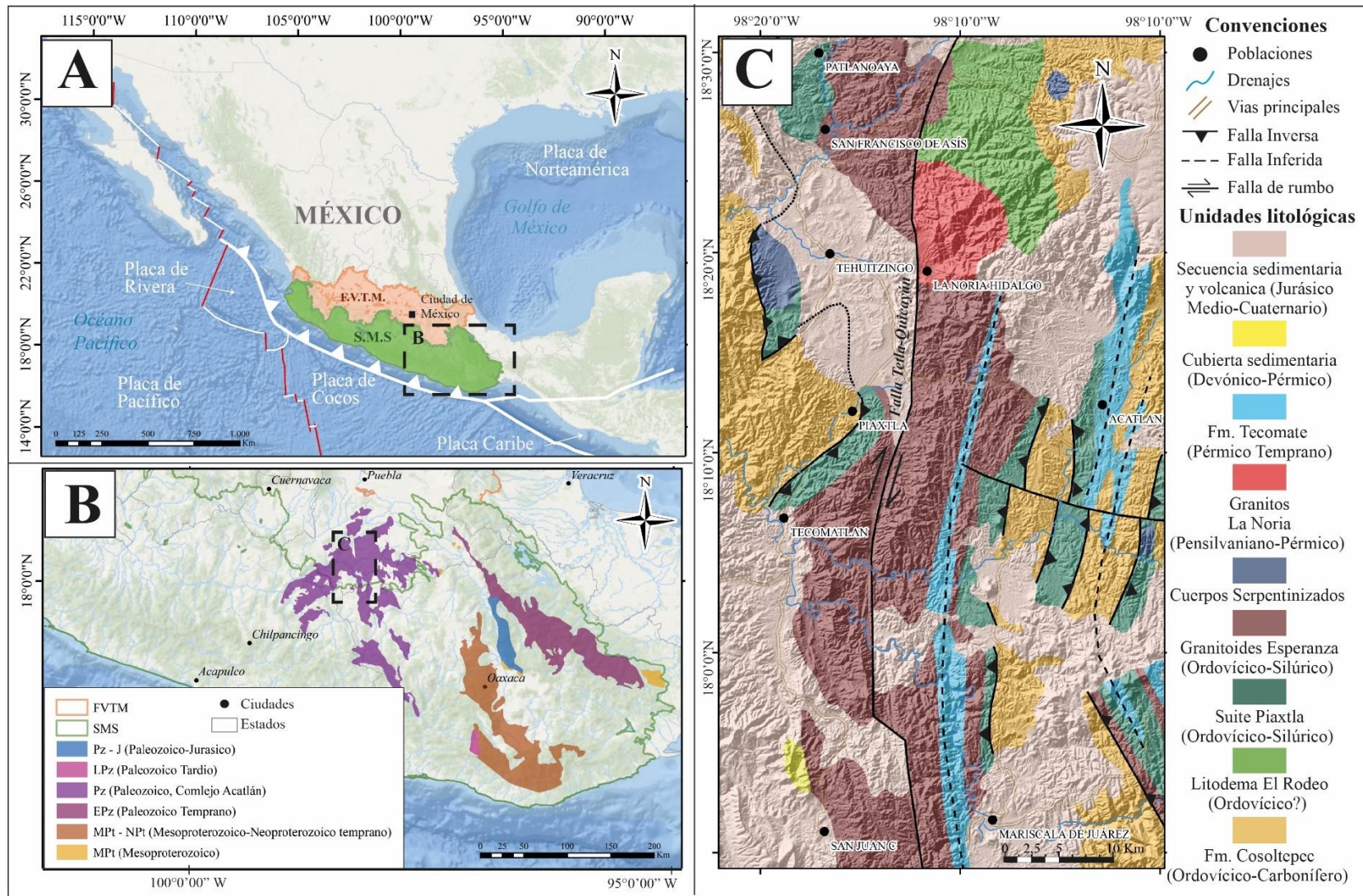


Figura 1. a) Provincias fisiográficas relacionadas con el Complejo Acatlán. S.M.S= Sierra Madre del Sur; F.V.T.M= Faja Volcánica Trans-Mexicana, **b)** Basamento metamórfico del sur de México, **c)** Mapa geológico de la zona de estudio. Modificado de [Ortega-Gutiérrez et al. \(2018\)](#).

2. MARCO TEÓRICO

La termocronología es considerada como la ciencia y practica de obtener información sobre la historia térmica de minerales y rocas, a partir de propiedades químicas, isotópicas o físicas de aquellos minerales que son sensibles a la temperatura y tiempo. Se basa en la acumulación de los isótopos hijo generados a través del decaimiento radioactivo de los isótopos padre en la roca o en la fase mineral y la eliminación de estos isótopos hijo por la difusión producto de la actividad térmica; sin embargo, algunos sistemas se basan en el daño en la estructura cristalina del mineral y borrado de los mismos (trazas de fisión). Debido a que la temperatura se incrementa con la profundidad en la litósfera, los datos obtenidos pueden ser interpretados directamente como información de la estructura termal de la corteza. En terrenos con basamento cristalino que ha sido erosionado, en los cuales las rocas que se encuentran en la superficie provenientes de decenas de kilómetros de profundidad, la termocronología permite determinar y cuantificar la temporalidad de exhumación (Braun et al., 2006).

Los tipos de procesos involucrados en la historia termal dependen de la tasa a la cual la roca es llevada a la superficie por exhumación, por lo que es imprescindible una interpretación de la historia tectono-morfológica; es decir, la tasa a la cual la roca es exhumada como una combinación de dos procesos tectónicos, el levantamiento y la erosión. Diferentes procesos físicos que determinan la estructura termal de la litósfera, están relacionados al transporte y producción de calor en la corteza, es decir por conducción, advección tectónica y el decaimiento de elementos radioactivos (Reiners y Brandon, 2006).

En una forma simple, la termocronología puede ser considerada como una herramienta que permite datar el momento en el que un mineral o una roca atraviesa su temperatura de cierre específica (T_c); la cual se define como la temperatura en la cual un mineral ya no presenta intercambio de elementos o isótopos, en otras palabras la difusión es despreciable (Dodson, 1973). Los minerales tienen diferentes temperaturas de cierre de acuerdo a su sistema isotópico específico (Figura 2) y, por tanto, es posible asignar una edad a la temperatura de cierre que, a su vez, corresponde a la edad mineral en el sistema geocronológico implementado (termocronómetro). Al usar un conjunto de termocronómetros en una sola muestra, se puede reconstruir su historia de enfriamiento/exhumación (Lynn, 2005).

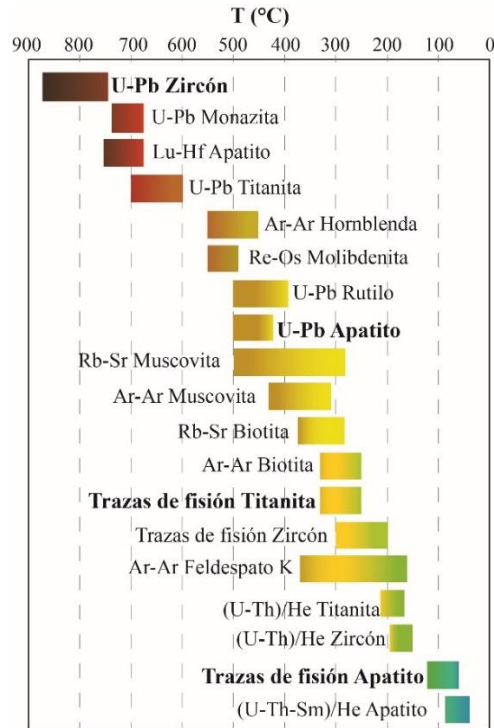


Figura 2. Temperaturas de cierre de los diferentes termocronómetros. Modificado de Lynn (2005).

Los termocronómetros pueden ser de baja, media y alta temperatura, donde este último se encuentran por encima de los 750°C (U–Pb en zircón principalmente). El sistema de U-Pb en zircón para rocas de basamento cristalino (ígneo/metamórfico) es implementado mayormente para su fechamiento, ya que la probabilidad de que el sistema haya sufrido un reseteo es muy baja (Lynn 2005). Algunos de los sistemas de media y baja temperatura son explicados a continuación.

2.1. Sistema de U–Pb en apatito

El apatito es un mineral de fosfato, común en rocas ígneas y metamórficas de composición pelítica, carbonatada, basáltica, ultramáfica y en todos los grados de metamorfismo desde ambientes diagenéticos transicionales a migmatitas (Spear y Pyle, 2002 en Chew et al., 2011). Este mineral puede ser empleado como un termocronómetro de media a alta temperatura, debido a que en el sistema U–Pb la temperatura de cierre efectiva es de ca. 550–450 °C (Chamberlain y Bowring, 2000). Este sistema puede ser usado para constreñir el enfriamiento

desde una temperatura alta e inferir tasas de exhumación de rocas metamórficas y plutónicas presentes en cinturones orogénicos activos y antiguos, si se cuenta con información adicional de otros termocronómetros, profundidad de emplazamiento, entre otros (Mezger et al., 1989; Cochrane et al., 2014). Además, puede aportar información para restringir eventos tiempo-temperatura en procesos retrógrados, prógrados de baja temperatura y eventos metamórficos regionales de mediano grado (Kirkland et al., 2018; Reiners et al., 2018).

La determinación de la edad por el sistema U–Pb en apatito presenta varios inconvenientes relacionados a las bajas concentraciones de U, Th y Pb radiogénico, en contra parte con las altas concentraciones de Pb común (Chew et al., 2011). Otra limitación se encuentra asociada a la cuantificación del contenido de Pb radiogénico cuando los granos de apatito son muy jóvenes (e.g., edades < 20 Ma) y cuando los granos de apatito presentan pérdida de Pb. Por lo anterior, no se genera con frecuencia la misma precisión que otorgan los zircones en el mismo sistema (Chew y Donelick, 2012; Kirkland et al., 2018).

El apatito frecuentemente incorpora cantidades sustanciales de Pb inicial cuando cristaliza, comparado con el contenido de U, lo que conlleva a que sus edades sean discordantes. Es por esta razón que los cocientes isotópicos U–Pb obtenidos pueden ser juzgados a través de una concordia o isócrona en un conjunto de granos cogenéticos con una propagación/dispersión en la relación Pb común (Pb_c) contra Pb radiogénico (Pb_r); en este caso, la relación Pb_c/Pb_r de varios granos logra definir un arreglo lineal en un diagrama de concordia o isócrona (Chew y Donelick, 2012), proyectando una intercepta a través de los datos no corregidos en un diagrama tipo Tera–Wasserburg (TW; Tera y Wasserburg, 1972) y así, determinar la componente de Pb_c en la intercepta con el eje Y ($^{207}Pb/^{206}Pb$). La edad corresponde a la intercepta inferior con la línea de concordia (Chew y Donelick, 2012), la cual debe tener sentido geológico (edad de enfriamiento, metamorfismo, de mineralización, etc.). El arreglo lineal en el diagrama TW es típico de granos cogenéticos de una sola fuente ígnea o metamórfica, a diferencia de granos detríticos que pueden producir una distribución más aleatoria y surtida (Mark et al., 2016).

Otro método para analizar los cocientes isotópicos U–Pb es mediante una corrección de éstos, basada en una elección apropiada de la composición inicial de Pb (Chew y Donelick, 2012). En este caso, es necesario corregir individualmente los análisis por Pb inicial utilizando la

corrección por ^{204}Pb , ^{207}Pb o ^{208}Pb (Williams, 1998). El método de corrección por ^{204}Pb es el más adecuado de los tres, ya que es el único que no asume concordancia de U-Pb_r (Chew et al., 2011; Chew y Donelick, 2012).

2.2. Trazas de fisión

La datación por trazas de fisión se basa en la fisión espontánea de núcleos del ^{238}U en los minerales (Price y Walker, 1963), donde dicho proceso no necesita la excitación externa generada por la desintegración de isótopos pesados, ya que el núcleo se divide en dos átomos nuevos que salen disparados en direcciones contrarias en consecuencia del proceso de fisión (Figura 3). En el proceso se emite mucha energía ca. 200 MeV, mientras que los dos nuevos átomos producidos a ca. 180° uno del otro, producen una única zona de daño de forma aproximadamente lineal en la red cristalina, visible en forma de traza; sin embargo, el daño inicial es el resultado a una ráfaga de ionización en el camino de una partícula cargada (el átomo que es disparado a partir de la fisión del ^{238}U) que genera un arreglo electrostático inestable de iones adyacentes expelidos entre si desde sus sitios originales hacia espacios intersticiales.

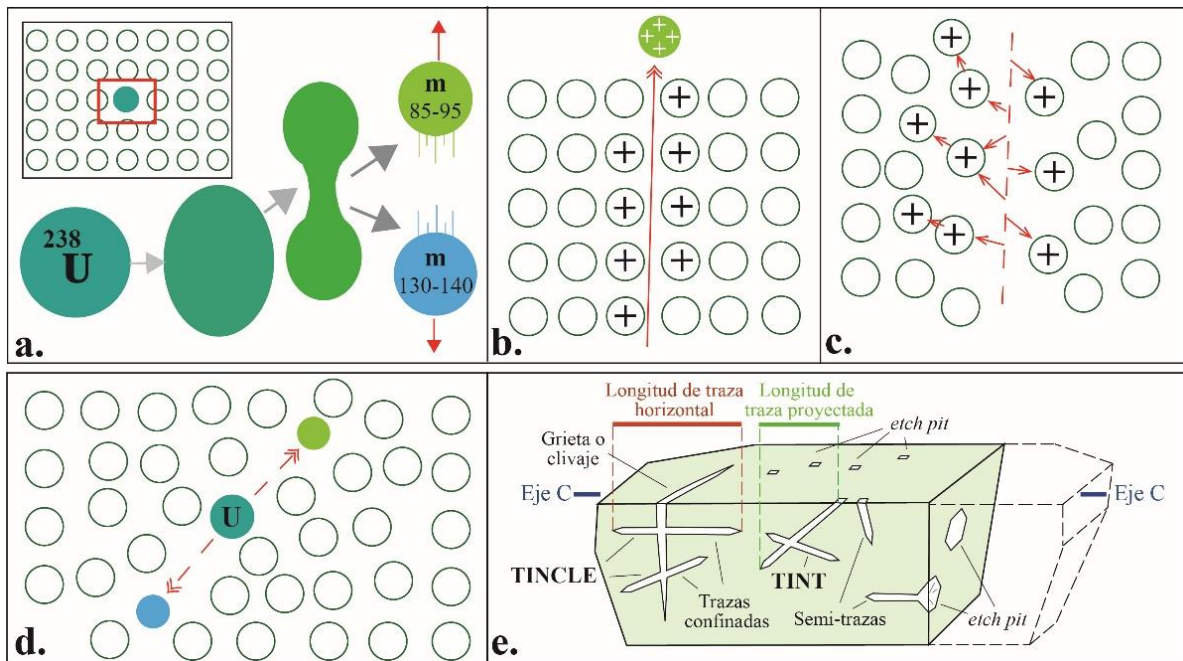


Figura 3. Proceso para generación de una traza de fisión **a)** Fisión nuclear del U-238, **b)** Ionización, **c)** Desplazamiento electrostático, **d)** Vista general de a+b+c, **e)** Trazas de fisión en el cristal; TINCLE= traza confinada con intersecciones en clivaje o fractura. TINT= Traza confinada con intersección con otra traza. Modificado de Fleischer et al. (1975) y Malusà y Fitzgerald (2019).

Luego ocurre la relajación elástica, la cual consiste en la producción de esfuerzos locales de Coulomb a partir de átomos intersticiales y vacantes cristalográficas que disminuyen cuando el esfuerzo se distribuye en un área mayor; con este proceso las trazas de fisión son observables en un microscopio de luz transmitida (Fleischer et al., 1975).

La datación por trazas de fisión por el método de LA-ICP-MS se basa en la siguiente ecuación:

$$t = \frac{1}{\lambda} \left(1 + \frac{\lambda}{\lambda f} \frac{2Ns}{[^{238}\text{U}]A_s L q} \right) = \frac{1}{\lambda} \left(1 + \frac{\lambda}{\lambda f} \frac{2\rho s}{[^{238}\text{U}]L q} \right)$$

Donde λ es la constante de decaimiento alfa total del ^{238}U la cual equivale a $1.55125 \times 10^{-10} \text{ a}^{-1}$ (Jaffey et al., 1971); λf es la constante de decaimiento por la fisión espontánea de U-238 y es igual a $8.45 \times 10^{-17} \text{ a}^{-1}$ (Holden y Hoffman, 2000), ρs es la densidad de trazas de fisión espontáneas en la superficie interna del cristal, $[^{238}\text{U}]$ es la concentración medida de ^{238}U , expresada como el número de átomos de ^{238}U por unidad volumétrica y, L corresponde a la longitud atacable con ácido de las trazas (Galbraith, 1981). El factor q es un “factor de eficiencia” ($0 < q < 1$), el cual depende de la mineralogía, las condiciones del ataque químico y de la experiencia del operador (Vermeesch, 2017).

Las trazas de fisión están constituidas por zonas dañadas en la red cristalina, con longitudes típicas menores a 20 μm y un ancho que puede variar de 3 a 14 nm (Paul, 1993), para el caso de los apatitos son de ca. 16 μm (Green et al., 1986).

Un aspecto importante para el análisis de trazas de fisión es el aumento de temperatura del sistema, ya que puede ocurrir el proceso de *annealing*, el cual consiste en el borrado térmico parcial o total de los defectos cristalinos por el ascenso de la temperatura; este proceso provoca una reacomodación a la posición inicial de los átomos desplazados dentro de la red cristalina (Wagner y Van den Haute, 1992).

El apatito es un mineral del grupo de los fosfatos, siendo el más común en la corteza terrestre de este grupo (Deer et al., 2013) y, representa una serie isomórfica cuyos miembros finales son: el fluorapatito $[\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}]$, el cloroapatito $[\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl}]$ y el hidroxiapatito $[\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}]$. El fluorapatito es el más abundante en la naturaleza (Deer et al., 2013) y a su vez, el más usado para la técnica de trazas de fisión; este termocronómetro presenta un

rango de temperatura de 60 a 120 °C, el cual se conoce como zona de borrado parcial PAZ (*partial annealing zone*; [Green et al., 1986](#)). El borrado parcial reduce entonces las edades aparentes y acorta las longitudes de las trazas de fisión, mientras que el borrado total reinicia las edades de las trazas de fisión hasta 0 Ma ([Gleadow et al., 1986](#)). Para los apatitos con un alto contenido de Cl ($\geq 3\%$ wt.), la PAZ ronda aproximadamente entre 90 y 160 °C ([Donelick et al., 2005](#)), lo que produce que las trazas de fisión en estos apatitos sean más resistentes al borrado térmico, si se comparan con las trazas en los fluorapatitos ([Ketcham et al., 1999](#)). Esta tendencia se observa mayormente durante la datación de muestras clásticas, en donde existe una correlación positiva entre el contenido de Cl y edades de granos individuales.

3. MARCO GEOLÓGICO

La configuración tectónica de México ha sido estudiada en diversos trabajos que se han concentrado en la división tectonoestratigráfica del país; aunque estos difieren entre sí, al hacer una observación general de los modelos existentes en la región sur, la división por terrenos es similar en cuanto a su distribución geográfica y número de terrenos. El primer trabajo corresponde a la división realizada por [Campa y Coney \(1983\)](#), donde hacia la región sur de la Faja Volcánica Trans-Mexicana (FVTM) se encuentran los terrenos Guerrero, Mixteca, Oaxaca, Juárez, Xolapa y Maya ([Figura 4](#)). Esta subdivisión presenta dos categorías de acuerdo con su proveniencia para los terrenos del sur: los de proveniencia del Pacífico acrecionados durante el Cretácico (terrenos Guerrero, Mixteca, Oaxaca, Juárez, Xolapa) y los provenientes de Gondwana (terreno Maya).

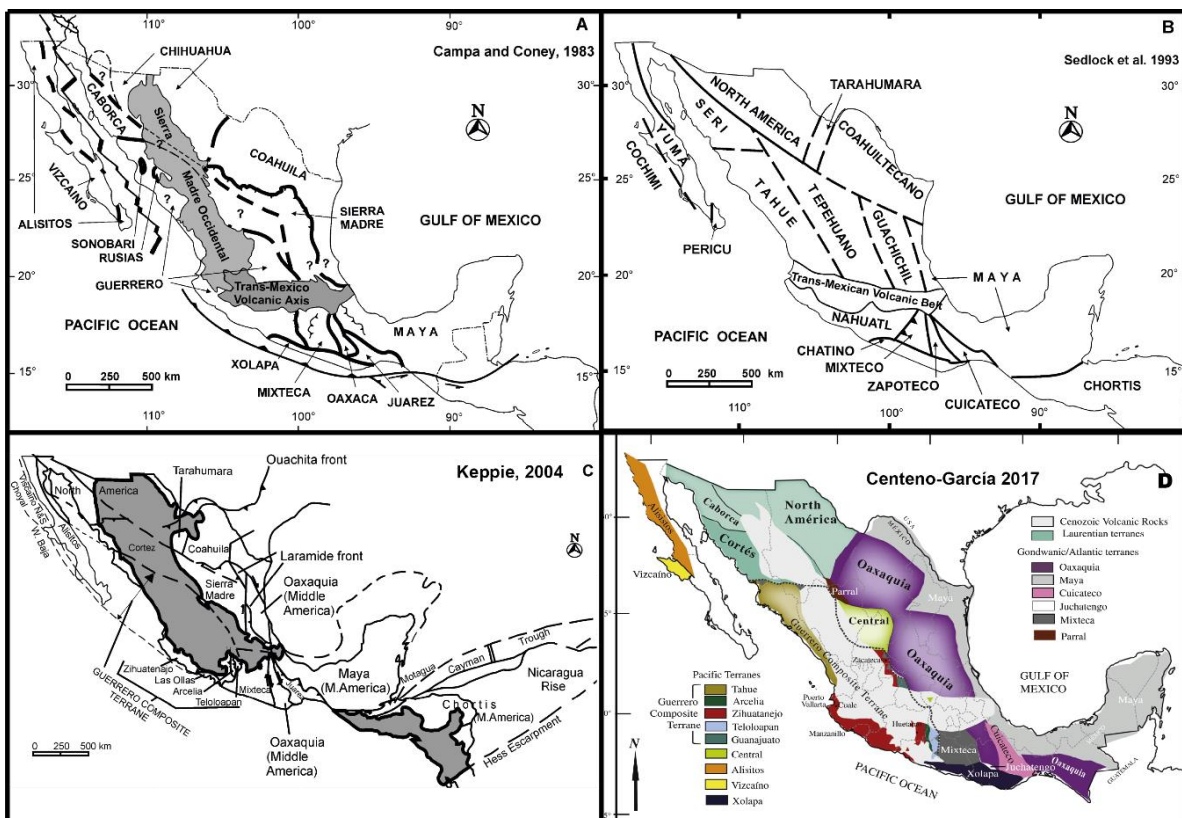


Figura 4. Mapa de terrenos tectonoestratigráficos de México **a)** Modelo de [Campa y Coney \(1983\)](#), **b)** Modelo de [Sedlock et al. \(1993\)](#), **c)** Modelo de [Keppie \(2004\)](#), donde se incluye el Terreno Oaxaquia, **d)** Modelo [Centeno-García \(2017\)](#). Modificado de [Keppie \(2004\)](#) y [Centeno-García \(2017\)](#).

Posteriormente, [Sedlock et al. \(1993\)](#) proponen los terrenos Náhuatl, Mixteco, Zapoteco, Cuicateco, Chatino y Maya, donde este último se extiende al norte de la FVTM. Estas subdivisiones difieren del modelo de [Campa y Coney \(1983\)](#), principalmente en su nomenclatura y en los límites tectónicos de cada terreno ([Figura 4b](#)). Los modelos posteriores han subdividido los grandes terrenos y contemplado otros aspectos como las características del basamento cristalino, incorporando por ejemplo el microcontinente Oaxaquia ([Keppie, 2004](#)). El modelo de [Keppie \(2004\)](#) tiene aspectos más relevantes en las variantes de los terrenos, ya que se introduce el Terreno Compuesto Guerrero, el cual tiene cinco subdivisiones ([Centeno-García et al., 2003, 2000, 1993; Freydier et al., 2000; Talavera-Mendoza y Suastegui, 2000](#)) y a Oaxaquia principalmente, además de algunos cambios de nomenclatura. [Centeno-García \(2017\)](#) presenta una evolución tectónica de los terrenos de México, basados en el trabajo de [Campa y Coney \(1983\)](#), donde también se tienen tres proveniencias para los terrenos, productos de la interacción entre Laurencia, Gondwana y la placa paleo-Pacífica. En los terrenos Gondwánicos se incluyen los terrenos Mixteca, Maya, Juchatengo, Cuicateco y el microcontinente Oaxaquia hacia el sur; mientras que en los terrenos de proveniencia del Pacífico está el terreno compuesto Guerrero, Alisitos, entre otros. Dichos terrenos presentan características particulares, principalmente en sus rocas de basamento ([Figura 5](#)), los cuales son descritos a detalle a continuación.

3.1. Terreno Maya

Este terreno se extiende hacia el sur por la Península de Yucatán y el sureste de México, desde el istmo de Tehuantepec hasta Guatemala. El Macizo de Chiapas forma el basamento cristalino del sur del Terreno Maya y consiste, en su mayor parte, de rocas ígneas y metamórficas de edad pérmica. Como basamento metamórfico hay reportes de gneises y migmatitas de una posible edad panafricana o precámbrica ([Weber et al., 2002](#)). Los gneises se encuentran fuertemente deformados; además, se observan anatexitas y anfibolitas intruidas por granitoides con un nivel de deformación menor a las anfibolitas, rocas metasedimentarias y rocas ígneas (unidades Sepultura, Custepec y Jocote; [Schaaf et al., 2002; Weber et al., 2008](#)). La estratigrafía pre-mesozoica del Terreno Maya está constituida por la Formación Santa Rosa que está cubierta discordantemente por la Formación Grupera y ésta, a su vez, concordantemente sobreyacida por la Formación Paso Hondo. Las rocas del Jurásico hasta

el Cretácico están dominadas por lechos rojos y calizas (e.g., los grupos Todos Santos y Sierra Madre).

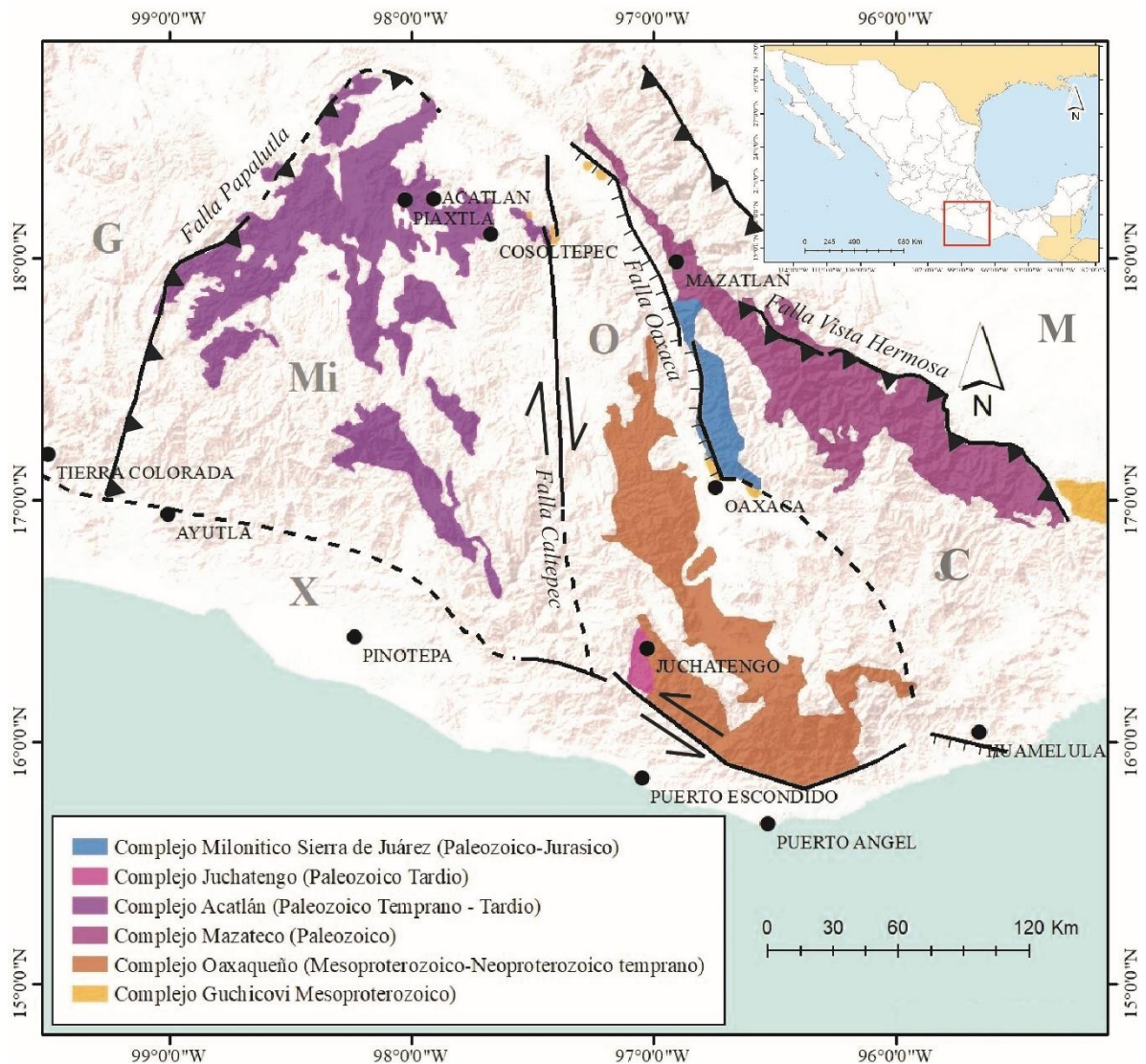


Figura 5. Disposición de las rocas del basamento metamórfico de los terrenos del sur de México G: Guerrero, C: Cuicatenco, Mi: Mixteco, O: Oaxaquia, M: Maya y X: Xolapa (Modificado de Ortega-Gutiérrez et al., 2018).

3.2. Microcontinente Oaxaquia

Este bloque fue descrito por Ortega-Gutiérrez et al. (1995), para denominar a las rocas de alto grado metamórfico (gneises y anfibolitas principalmente) del Neso-Mesoproterozoico visibles en la zona este de México en dirección N-S. Esta zona se encuentra limitada en la

región sur por el terreno Mixteco (Falla Caletpec) al oeste y al este por los terrenos Maya y Cuicateco (Centeno-García, 2017). Se caracteriza por tener un basamento Mesoproterozoico representado en la región sur por los complejos Guichicovi y Oaxaqueño (Keppie et al., 2003, 2001; Solari et al., 2003); estas unidades son isotópicamente similares a los Andes Colombianos. El complejo Oaxaqueño constituye la mayor exposición de rocas en facies granulita y se caracteriza por presentar un registro magmático entre aproximadamente 1,210 y 1179 Ma (Weber y Schulze, 2014), una edad de migmatización a ca. 1,100 Ma y posteriormente un registro de metamorfismo en facies granulita entre ~1000 y 980 Ma (Solari et al., 2003). Los Complejos Guichicovi y Oaxaqueño incluyen litologías como meta-anortosita, ortogneis, charnockita, metagabro, metagranito, rocas metasedimentarias clásticas, mármoles y rocas calcosilicatadas que han experimentado un metamorfismo de alto grado en facies de granulitas (Weber y Köhler, 1999; Ortega-Gutiérrez et al., 1995; Keppie y Ortega-Gutiérrez, 2010). El Complejo Oaxaqueño se encuentra discordantemente bajo rocas sedimentarias marinas y continentales con edades que van del Paleozoico (Formaciones Tiñu, Ixtaltepec, Santiago, Matzitzi) al Cenozoico (Ángeles-Moreno, 2006).

3.3. Terreno Cuicateco.

Es el único terreno del mesozoico que presenta una afinidad Gondwánica/Atlántica en el territorio mexicano (Centeno-García, 2017), el cual está compuesto por rocas metasedimentarias en facies de esquistos verdes, las cuales se encuentran intercaladas localmente con metabasitas y rocas ultramáficas parcialmente serpentinizadas (Ángeles-Moreno, 2006; Mendoza-Rosales et al., 2010). El basamento del Terreno Cuicateco no se conoce bien; sin embargo, se ha considerado que puede corresponder a rocas gabroicas y ultrabásicas del Complejo Milonítico Sierra de Juárez (Delgado-Argote, 1988; Alaniz-Álvarez et al., 1994), a esquistos del Paleozoico que están en contacto tectónico con los gneises del Complejo Guichicovi (Murillo-Muñeton, 1996) o a bloques paleozoicos como el Complejo Mazateco (Ángeles-Moreno, 2006). Se describen dos complejos metamórficos presentes al N-NE de Teotitlán y San Juan de Coyula, estos corresponden al Complejo Mazateco (esquistos La Nopalera y Mazatlán de las Flores de edad pre-Titoniano) y el Complejo Migmatítico Teotitlán.

3.4. Terreno Xolapa

Este terreno se encuentra a lo largo de la costa sur de México en los estados de Guerrero y Oaxaca, conformado por el Complejo Xolapa, el cual se caracteriza litológicamente por ortogneises y paragneises, afectados por un grado variable de migmatización. El basamento del Complejo Xolapa está también afectado por diversos episodios de magmatismo granítico de afinidad geoquímica calco-alcalina y edades que van desde el Jurásico hasta el Oligoceno ([Ortega-Gutiérrez, 1981](#)).

3.5. Terreno Mixteco

El Terreno Mixteco está conformado por un basamento polimetamórfico y polideformado que corresponde al Complejo Acatlán. Este terreno es delimitado por el Terreno Guerrero al oeste; su límite sur con el terreno Xolapa es definido por el sistema de fallas Chacalapa–La Venta ([Tolson, 2005](#)) y al este, la zona de falla de Caltepec que lo separa de las rocas que conforman el microcontinente Oaxaquia.

El Complejo Acatlán fue descrito inicialmente como “Formación Acatlán” por [Ordóñez \(1906\)](#), para denominar a las rocas metamórficas del área de Acatlán. Trabajos posteriores incluyeron datos geocronológicos de algunas muestras y [Rodríguez-Torres \(1970\)](#) presenta una cartografía del área de Acatlán y el Progreso, donde define el Grupo Acateco (Formaciones Esperanza y Acatlán). Pero fue [Ortega-Gutiérrez \(1978\)](#) quien propuso y definió el término Complejo Acatlán para dos subgrupos litológicos: el Grupo inferior denominado Petlalcingo, al cual pertenecen las Migmatitas Magdalena y las Formaciones Chazumba y Cosoltepec; mientras que el Grupo superior denominado Acateco lo conforman las Formaciones Xayacatlán, Tecomate y Granitoides Esperanza.

[Ramírez-Espinoza \(2001\)](#) realizó una cartografía detallada de aproximadamente 30,000 km² donde redefine al subgrupo Acateco como el Grupo Piaxtla (Formación Xayacatlán y Granitoides Esperanza) basado en sus características petrológicas y geoquímicas. Estudios posteriores redefinen por completo el Complejo Acatlán; las unidades pertenecientes al subgrupo Petlalcingo como la Migmatita Magdalena y el litodema Chazumba fueron redefinidas como el Complejo Ayú ([Keppie et al., 2004](#); [Helbig et al., 2012, 2013](#)); dichas

unidades están parcialmente migmatizadas, donde este proceso se acotó en 171 Ma (Keppie et al., 2004) y cortadas por numerosos diques y cuerpos intrusivos de composición granítica, los cuales fueron emplazados entre 171 y 160 Ma (Helbig et al., 2012). Con base en estos datos, Helbig et al. (2012), asocian el origen de los intrusivos del Complejo Ayú al proceso de migmatización de las rocas meta-sedimentarias.

Las unidades que actualmente se han descrito como parte del Complejo Acatlán son: la *suite* Piaxtla (SP), que está conformada por rocas básicas metamorfoseadas y parcialmente milonitizadas, en facies esquisto verde, anfibolita, eclogita y, litologías como metagabro, serpentinita, esquistos pelíticos y cuarcitas (Ramírez-Espinoza, 2001; Keppie et al., 2004). Los Granitoides Esperanza (GE), los cuales consisten principalmente en granitos milonitizados y sus facies pegmatíticas, aplitas y diques máficos asociados; todas las litologías de esta unidad se definen como retrogresivas por Ortega-Gutiérrez et al. (1999). El litodema El Rodeo es conformado por rocas verdes de bajo a medio grado y metapsamitas (Keppie et al., 2004). La Formación Cosoltepec está conformada por rocas de bajo grado de metamorfismo a facies sub-esquistos verdes, que incluyen algunos fragmentos de corteza oceánica, como complejos de diques con láminas de basaltos almohadillados y una cubierta sedimentaria pelágica (Keppie et al., 2007). Por último, se encuentran unidades sedimentarias como las Formaciones Tecomate y Mazatlán con metamorfismo de bajo grado (Ortega-Gutiérrez et al., 2018).

Sobreyaciendo discordantemente al Complejo Acatlán se encuentra la sucesión de unidades sedimentarias constituidas por areniscas, lutitas y lentes de conglomerado de la Formación Matzitzi (Centeno-García et al., 2009), y cubriendo a la Formación Matzitzi se encuentra la unidad denominada “Lechos rojos” de edad Triásico–Jurásico (Moran-Zenteno et al., 1993), depósitos continentales y fluviales del Jurásico Medio–Tardío (formaciones Piedra Hueca, Otlaltepec, Tecomazúchil y Chimeco) cubren discordantemente al Complejo Acatlán, y estos depósitos, a su vez, son sobreyacidos por carbonatos de la plataforma del Cretácico.

3.5.1. Granitoides Esperanza (GE)

La unidad GE fue descrita inicialmente de manera informal por Rodríguez-Torres (1970), como Formación Esperanza; posteriormente, Ortega-Gutiérrez (1978), describe los

Granitoides Esperanza como una secuencia de rocas graníticas, aplíticas y pegmatíticas, con metamorfismo y características cataclásticas y/o milonitizadas en las regiones de Acatlán y Tehuiztingo. Estas primeras descripciones establecen a los GE como cuerpos intrusivos altamente deformados y metamorfoseados (Ortega-Gutiérrez et al., 1999; Ramírez-Espinoza, 2001; Reyes-Salas, 2003). Posteriormente, Reyes-Salas (2003) describe cinco subgrupos litológicos que conforman la unidad Granitoides Esperanza: augen–gneises protomilonítico–milonítico–ultramilonítico, migmatitas, cuerpos máficos, rocas metasedimentarias y pegmatitas. El protolito de esta unidad ha sido descrito como rocas graníticas con características de granitos tipo “S”, peraluminosas, (Ramírez-Espinoza, 2001; Reyes-Salas, 2003).

Los diferentes grados de metamorfismo que exhiben los GE han sido interpretados a detalle por Reyes-Salas (2003), donde describe un estado prógrado asociado al pico metamórfico (M1) en facies eclogita para rocas cuarzofeldespáticas, representada por la asociación mineral Grt + Rt + Phe (rica en Si) + Zo + Kfs + Bt (con Ti) + Qtz. Este estado prógrado es descrito por otros autores con algunas variaciones en la asociación mineral, agregando plagioclasa, epidota, variaciones en las concentraciones de Si en la fengita y en algunos casos la presencia de onfacita en rocas de composición máfica (Ortega-Gutiérrez et al., 1999; Vega-Granillo et al., 2007; Galaz et al., 2013). Se han descrito dos estados metamórficos posteriores, los cuales corresponden a facies de retrogresión: el primero de ellos en facies anfibolita–epidota, definida por una asociación mineral de Ep + Ti + Phe (pobre en Si) + Ab + Qtz + Bi (pobre en Ti) + Mc (Reyes-Salas 2003); además, algunos granates muestran transformaciones en clinozoicita, lo que indica reequilibrio incipiente en estas facies (Vega-Granillo et al., 2007). El tercer estado metamórfico se encuentra asociado a una facies de retrogresión de baja temperatura, asociada a Ep + Chl + Ms + Ser + Qtz + Ilmenita (Reyes-Salas 2003). En algunos sectores donde la unidad GE se encuentra aflorando, no se distinguen las facies de retrogresión anfibolita–epidota; esto relacionado con una posible exhumación rápida o la ausencia de fluidos y deformación durante el levantamiento de dicha unidad (Vega-Granillo et al., 2007).

Los GE han sido datados por diferentes autores que definen una edad de cristalización ígnea entre 485 y 440 Ma (Ortega-Gutiérrez et al., 1999; Sánchez-Zavala et al., 2004; Talavera-

[Mendoza et al., 2005](#); [Vega-Granillo et al., 2007](#); [Galaz et al., 2013](#)); donde la mayor parte de dichas dataciones se localizan en las regiones aledañas a la localidad tipo, definida por [Ortega-Gutiérrez \(1978\)](#) sobre la vía que comunica la población de Acatlán con la población de Piaxtla, algunos datos en la región de Olinalá y alrededores.

3.6. Arco magmático del este de México

En el este y sur de México se localizan una serie de plutones y rocas volcánicas que tuvieron lugar durante el Carbonífero–Pérmico, formando un arco magmático continental producto de la subducción hacia el este del Pacífico debajo del margen oeste de Gondwana; dichas rocas corresponden al Granito Etna (ca. 255 Ma), stock Carbonera (ca. 272 Ma), Granito Cozahuico (ca. 276 Ma), batolito Zanitza (ca. 287 Ma), batolito Honduras (ca. 290 Ma), Plutón Cuanana (ca. 311 Ma), Plutón de Totoltepec (289–306 Ma) y las lavas félsicas de la Riolita Sosola (ca. 270 Ma) ([Solari et al., 2001](#); [Kirsch et al., 2012](#); [Ortega-Obregón et al., 2014](#)).

3.7. Historia evolutiva

Los eventos que tuvieron lugar durante el Paleozoico–Mesozoico en el sur de México, están caracterizados por una combinación de regímenes de subducción y extensión, con algunos eventos colisionales. Estos últimos asociados a la acreción de terrenos como el Mixteco y el Zapoteco o Oaxaquia ([Elías-Herrera et al., 2005](#); [Kirsch et al., 2012](#); [Martini et al., 2016](#)), la generación de un arco magmático en el borde occidental del super continente Pangea (Arco del este) para la cual se ha sugerido una edad Pérmica ([Dickinson y Lawton, 2001](#)) o Carbonífero–Pérmico ([Kirsch et al., 2012](#); [Ortega-Obregón et al., 2014](#)).

El Mesozoico fue dominado por deformación extensional influenciada por dos procesos geodinámicos principales: la subducción de la Placa Farallón debajo del margen continental pacífico de Norteamérica y la ruptura del supercontinente Pangea y apertura del Océano Atlántico, ([Martini y Ortega-Gutiérrez, 2018](#)). Este último evento tuvo lugar desde el Triásico Tardío al Jurásico, asociada a un régimen netamente extensional y, asocia el desarrollo de cuencas subsidiarias, exhumación de bloques de basamento y construcción de plataformas carbonatadas ([Martini y Ortega-Gutiérrez, 2018](#)).

Durante el Jurásico tardío y Cretácico temprano, la extensión en la cuenca trasarco Arperos produjo una desconexión entre el Terreno Guerrero y la parte mexicana de Norteamérica (Martini et al., 2011; Martini et al., 2014), por lo que el registro estratigráfico entre estos dos bloques tectónicos difiere para esta época. Durante este intervalo un intenso magmatismo de arco en el margen pacífico produjo flujos volcánicos intermedios a máficos e intrusivos graníticos y granodioríticos (e.g., Solari et al., 2007; Martini et al., 2009, 2014).

Durante el Cretácico temprano dominó la extensión cortical, lo cual es evidenciado por el desarrollo de las cuencas sedimentarias (Mendoza-Rosales et al., 2010; Sierra-Rojas et al., 2016). Para algunas de ellas se han propuesto varios mecanismos tectónicos que incluyen: una cuenca tras arco asociada al retroceso de la Placa Farallón subducida (Delgado-Argote et al., 1992), mecanismo de *pull-apart* asociado a un régimen transtensional (Ángeles-Moreno, 2006), cuenca de rift desarrollada en una intersección falla transformante-dorsal, asociada a la apertura del Golfo de México (Mendoza-Rosales, 2010) o una cuenca extensional de tras arco asociado al retroceso del *slab* de Arperos (Sierra-Rojas et al., 2016).

El límite Cretácico–Paleógeno se encuentra dominado por la influencia del evento tipo Laramídico, el cual hacia la Sierra Madre del Sur es evidenciado por la inversión de estructuras bajo un régimen transpresional (Nieto-Samaniego et al., 2006).

4. METODOLOGÍA

4.1. Trabajo de campo

Se recolectaron un total de diez muestras de roca, distribuidas alrededor de las poblaciones de Patlanoaya, Acatlán, Piaxtla, Tecamatlán, Mariscala de Juárez y San Juan de Cieneguilla, (Tabla 1); en donde se encontró roca aflorante de la unidad GE del Complejo Acatlán, limitando estructuras importantes como la Falla de Tetla–Quicayán. Para ello, se tomó como base el mapa geológico de Ortega-Gutiérrez et al. (2018), y se concentró el recorrido en el cinturón medio donde aflora principalmente la unidad de Granitoides Esperanza. Se tomaron coordenadas de cada punto de muestreo con la ayuda de un equipo GPS Garmin, fotografías y descripciones detalladas de los afloramientos, que incluyen litología, textura, mineralogía, y estructuras presentes. Cada punto de muestreo fue seleccionado con base en el nivel de alteración, procurando que la muestra estuviese lo más fresca posible. Para siete de las muestras recolectadas se extrajo una porción para lamina delgada, una porción como testigo y una porción para la realización del triturado y la posterior separación de minerales accesorios.

Tabla 1. Localización y litología de las muestras recolectadas en la fase de trabajo de campo. GE: Granitoides Esperanza.

Muestra	Latitud (°N)	Longitud (°W)	Elevación (m.s.n.m.)	Litología	Unidad
Pxt – 0	18°08'13.8"	98°16'37.7"	1110	Augengneis	GE
Px-1	18°13'38"	98°14'42.4"	-	Augengneis	GE
Pxt – 5	18°13'36"	98°11'42.2"	1202	Augengneis	GE
Pxt – 6	18°04'28.6"	98°15'18.8"	960	Augengneis	GE
Pxt – 7	18°04'43.3"	98°16'11.8"	995	Augengneis	GE
Pxt – 8	17°51'56.8"	98°14'33.8"	1595	Augengneis	GE
Pxt – 9	17°51'9.8"	98°11'38.9"	1456	Pegmatita	GE
Pxt – 9b	17°51'14.8"	98°11'36.8"	1467	Augengneis	GE
Pxt – 10	17°51'14"	98°11'02.5"	1474	Pegmatita	GE
Pxt – 11	18°28'53.1"	98°17'35.9"	1026	Augengneis	GE

4.2. Petrografía de láminas delgadas

La descripción y análisis petrográfico de las siete láminas delgadas fue realizado mediante el uso de un microscopio óptico Olympus BX51 del Centro de Geociencias, UNAM. En primera instancia se identificaron las texturas y minerales presentes, luego se determinaron las asociaciones minerales (paragénesis) y así mismo la identificación de las facies de metamorfismo para la definición de la roca ([ANEXO A: Petrografía](#)).

4.3. Separación de minerales accesorios

Para la separación de los minerales de interés (zircón y apatito) se implementó inicialmente una metodología clásica para ocho de las muestras, con la pulverización y tamizado de las porciones de roca, mediante mallas no. 80 y 120, en el taller de Molienda del Centro de Geociencias UNAM. Los siguientes pasos se realizaron en el Laboratorio de Caracterización Mineral (CARMINLab): se lavaron las muestras para remover el material más fino y menos denso; se secó el material en el horno (temperatura entre 40–50°C) para luego utilizar el separador magnético tipo Frantz. Se uso una inclinación de 10° lateral y frontal en el separador Frantz, para aislar la fracción de minerales no magnéticos dentro de los cuales se encuentran los zircones y apatitos. Este concentrado de minerales es sometido a una nueva separación por diferencia de densidades utilizando bromoformo como líquido pesado, cuya densidad es menor que la del zircón y apatito, pero superior a otras fases minerales como el cuarzo y feldespatos potásico (densidad del bromoformo: ca. 2.83, densidad del zircón: ca. 4.7; densidad del apatito: ca. 3.2).

4.4. Geocronología U–Pb en zircones.

Se analizaron cuatro muestras correspondientes a la unidad de Granitoides Esperanza, de las cuales se separaron alrededor de 70 cristales de zircón, montados posteriormente en una resina epóxica, marca EpoFix Struers. Las probetas de resina fueron desgastadas utilizando diferentes papeles abrasivos (P-800, P-1500 y P-2500) hasta exponer los granos aproximadamente a la mitad de su grosor y lograr una superficie homogénea. Posteriormente se capturaron imágenes bajo catodoluminiscencia (CL) utilizando el equipo *Relitron Cold Cathode Cathodoluminescence* del Laboratorio de Fluidos corticales (LFC) en el Centro de

Geociencias, sobre las cuales se seleccionaron los puntos de cada cristal (núcleo/borde) para posteriormente realizar la ablación láser (Figura 6; ANEXO B: Imágenes de catodoluminiscencia de zircones).

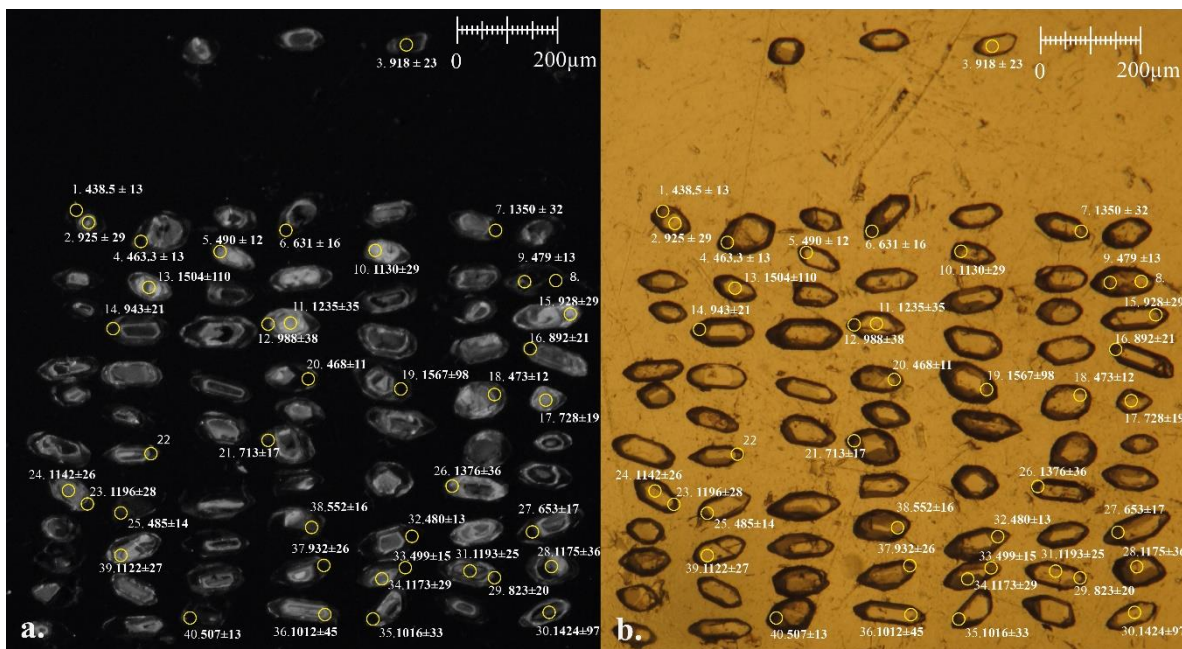


Figura 6. Montaje de los zircones de la muestra Pxt-8, los círculos amarillos resaltan el área de la ablación de borde y/o núcleo, en blanco se encuentran los números de grano seguido de la edad medida en el grano. **a)** Imagen de catodoluminiscencia de los cristales, **b)** Cristales bajo luz reflejada.

Los análisis correspondientes a la datación U–Pb se realizaron en el Laboratorio de Estudios Isotópicos (LEI) del Centro de Geociencias, mediante un espectrómetro de masas con plasma de acoplamiento inductivo (LA–ICP–MS). El sistema de ablación láser es modelo *RESolution* M50 de la marca *Resonetics* equipado con un láser LPX Pro tipo excímero de 193 nm de longitud de onda que utiliza una mezcla de Fluoruro de Argón (ArF) para generar la pulsación. Éste se encuentra conectado a un ICP–MS cuadrupolar *Thermo iCap Qc*, o un ICP–MS multicolector *Thermo Neptune Plus*. La metodología aplicada para los análisis se realizó siguiendo el trabajo de [Solari et al. \(2010\)](#); el tamaño del spot fue de 23 μm, con una frecuencia de repetición de 5 Hz. El fraccionamiento entre las masas Pb, Th y U fue controlado a partir de los zircones estándares 91500 ($1,062.6 \pm 2.42$ Ma; [Wiedenbeck et al., 1995](#)) y Plešovice (337.13 ± 0.37 Ma; [Sláma et al., 2008](#)); adicionalmente, se analizó el vidrioro NIST 612 ([Jochum et al., 2011](#)), de composición conocida como estándar para el cálculo de

la concentración de elementos traza. Durante el análisis se midieron señales de los isotopos ^{206}Pb , ^{207}Pb , ^{208}Pb , ^{232}Th , ^{238}U , ^{29}Si , ^{31}P , ^{49}Ti , ^{89}Y , ^{93}Nb y ^{178}Hf y elementos de Tierras Raras (REE).

La reducción de datos para los fechamientos U–Pb y las concentraciones elementales de los zircones se realizó con el software Iolite 3.5 y los esquemas de reducción de datos analíticos, cálculo de edades, errores y su correspondiente propagación (Paton et al., 2010; Petrus y Kamber, 2012). El error sistemático del Pb común y la constante de decaimiento del U se reportan al nivel de 2 sigma (2σ).

Los datos obtenidos (ver ANEXO C: Análisis U–Pb en zircones mediante LA–ICP–MS) se graficaron en diagramas de concordia usando IsoplotR (Vermeesch, 2018), con diagramas de *Wetherill* para las relaciones isotópicas $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ y $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$. Para el cálculo de las edades se optó por la discriminación de datos correspondientes a núcleos heredados mediante gráficos KDE e interpretación de las imágenes de CL *post*-ablación. Se encontraron edades de concordia y se usaron cálculos de promedio ponderado para los grupos de interés.

4.5. Método U–Pb y geoquímica de apatito

Los análisis para el sistema U–Pb y geoquímica en apatitos (elementos traza y REE), se realizaron en el Laboratorio de Estudios Isotópicos (LEI), del Centro de Geociencias, UNAM; mediante el uso de LA–ICP–MS, siguiendo la metodología descrita por Abdullin et al. (2018) y Ortega-Obregón et al. (2019). Se empleó un diámetro de ablación de 60 μm y una tasa de repetición de 4Hz. Se empleó como material de referencia primario el apatito *First Mine Discovery de Madagascar* (ca. 480 Ma; Thomson et al., 2012) y como estándar secundario el apatito Durango (31.4 ± 0.2 Ma; McDowell et al., 2005). El vidrio estándar NIST –612 de composición conocida fue utilizado como referencia para el cálculo de las concentraciones de REE y elementos traza.

Los datos empleados para el cálculo de edades en el sistema U–Pb de apatitos fueron graficados en los diagramas de concordia Tera–Wasserburg (ver ANEXO D: Análisis U–Pb en apatitos mediante LA–ICP–MS) utilizando el *software* IsoplotR (Vermeesch, 2018). Se empleó un modelo de discordia para encontrar el mejor ajuste de los datos individuales en una tendencia lineal coherente, cuya intercepta inferior es interpretada como la edad de los

granos cogenéticos (Chew y Donelick, 2012). El ajuste de la línea de discordia a través de los datos se hizo usando el algoritmo de máxima probabilidad de Ludwig (1998), el cual asume que la dispersión de los datos se debe únicamente a las incertidumbres analíticas. La edad de los granos cogenéticos y el error se reportaron como $t \pm z$ o $t \pm y$ cuando $MSWD > 1$ y $MSWD < 1$, respectivamente (Ludwig, 1998). En ambos casos, t representa la estimación de probabilidad máxima de la edad; y representa el intervalo de confianza (2σ) para t usando el número apropiado de grados de libertad y z representa el intervalo de confianza aproximado para t con sobredispersión, calculado como $z = y\sqrt{MSWD}$ ($MSWD = Mean Square Weighted Deviation$; Ludwig, 1998).

Para los datos de geoquímica de apatito se midieron señales de las masas ^{206}Pb , ^{207}Pb , ^{208}Pb , ^{232}Th y ^{238}U , además del Ca, Mg, Mn, Sr, P, Cl, Y, Sr y REE (ver ANEXO E: Análisis geoquímico de apatitos mediante LA-ICP-MS). La reducción de datos, la propagación de los errores, la corrección por Pb común frente a materiales de referencia y el cálculo de las edades se realizaron utilizando el software Iolite 3.5 y los esquemas de reducción de datos VizualAge y VizualAge_UcomPbine (Chew et al., 2014; Paton et al., 2010; Petrus y Kamber, 2012).

4.6. Trazas de fisión en apatitos (TFA)

Se analizaron cinco muestras de roca correspondientes a la unidad Granitoides Esperanza (Pxt-5, 7, 9b, 11 y Px-1). Los apatitos separados por muestra fueron entre 150 y 300 granos, de forma manual con el uso de un microscopio binocular y pinzas de acero; los granos fueron adheridos con cinta doble cara a una base dentro de un aro plástico de 2,5 cm de diámetro, en el cual se incorporó la resina EpoFix. Una vez curada la resina, fueron desbastadas utilizando lijas húmedas P1500/2500 hasta exponer los granos aproximadamente a la mitad de su grosor (para la geometría 4π), seguido de abrasivos en suspensiones de alúmina de 3, 1, 0.3 y 0.05 μm . En cada cambio de paño y abrasivo se realizó la limpieza de las probetas con agua destilada en un baño ultrasónico de aproximadamente 5 minutos. Durante todo el proceso se controló el estado del pulido bajo un microscopio óptico con luz reflejada y

transmitida; al terminar el proceso se limpió la probeta con agua destilada y se secó al aire libre.

Para revelar las trazas de fisión espontánea, se efectuó el ataque químico (*etching*), que inició con la inmersión en ácido nítrico (HNO_3) a 5.5 M a una temperatura de 21° por 20 segundos. Por último, se limpió la probeta con agua destilada y se secó al aire libre.

Para la selección de los granos óptimos a analizar, se observaron bajo el microscopio óptico de luz transmitida Zeiss AxioScope A-1 y se usó un software de tratamiento de imágenes, para las mediciones de área y control del conteo de trazas, el cual es calibrado de acuerdo con el objetivo visual del microscopio. Se descartaron los granos de apatito que presentaban zoneamiento fuerte de U (distribución heterogénea de las trazas en el cristal), gran cantidad de microfracturas, e inclusiones.

El análisis por trazas de fisión se realizó por el método alternativo de medición de contenido de U (Figura 7), donde la concentración de ^{238}U en los cristales, es medida de forma *in situ*, mediante el uso de la ablación láser asociada a un espectrómetro de masas con fuente de plasma inductivamente acoplado LA-ICP-MS (Hasebe et al., 2004; Donelick et al., 2005).

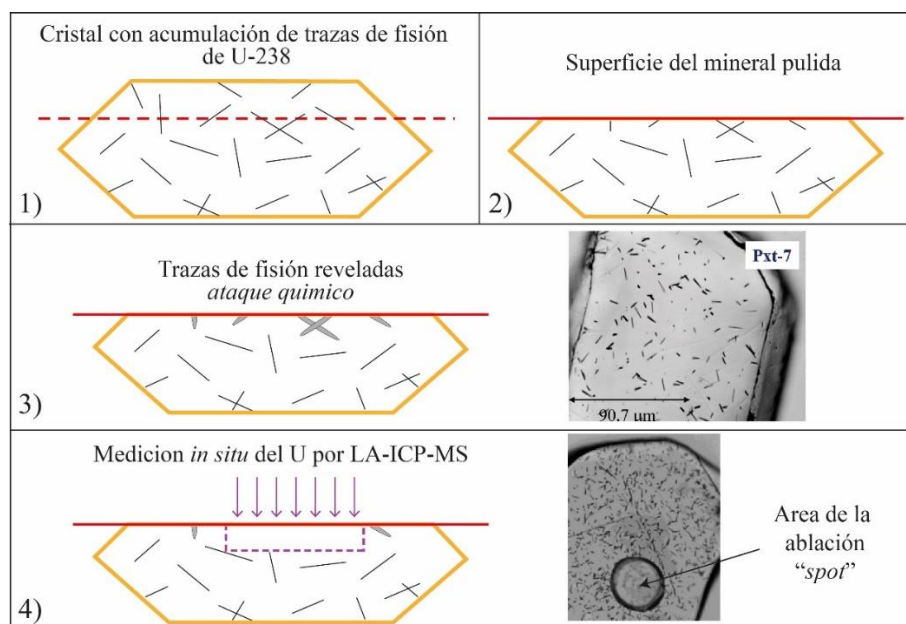


Figura 7. Procedimiento para la preparación de las muestras para el análisis por trazas de fisión en apatito: 1) Montaje del cristal, 2) Pulido de la muestra, 3) ataque químico para la revelación de las trazas, 4) Medición del U mediante la ablación láser directamente en el cristal. Modificado de Malusà y Fitzgerald (2019).

Se realizó un mapa de localización de los cristales, con el objetivo de facilitar el conteo de trazas y la ubicación de los puntos para la ablación láser. El tamaño de la ablación fue de 60µm de diámetro y una tasa de repetición de 4 Hz. Como materiales de referencia se emplearon el apatito de Durango y el vidrio NIST-612 de composición conocida para el cálculo de las concentraciones incluyendo la del ^{238}U . Los resultados obtenidos se normalizaron al estándar interno ^{43}Ca tomando un promedio de la concentración de CaO de todos los apatitos analizados ($55 \pm 2\%$; e.g., [Lesnov, 2012](#)). Las edades relativas por trazas de fisión en apatitos se calcularon con el software IsoplotR ([Vermeesch, 2018](#)) y aplicando la corrección zeta de acuerdo con los resultados obtenidos en el estándar primario F-apatito Durango (Ver [ANEXO F: Datos trazas de fisión de granos individuales de apatitos](#))

Estos datos fueron graficados utilizando RadialPlotter v. 9.4 ([Vermeesch, 2009](#)) y la prueba chi-cuadrado (X^2) se utilizó para evaluar si las edades de granos individuales pertenecen a una sola población de edades. El conjunto de datos con valores de $X^2 > 5\%$ indican una edad aceptable ([Galbraith, 1981](#)) y pueden representar una edad central lo que corresponde a un promedio ponderado de las edades ([Galbraith, 1981](#); [Galbraith y Green, 1990](#); [Galbraith y Laslett, 1993](#); [Vermeesch, 2009](#)).

4.7. Modelos tiempo–Temperatura (t–T)

Para realizar el modelo se hicieron entre 55 y 153 mediciones de longitudes de trazas confinadas en las muestras Px-1 y Pxt-9b. El modelado basado en las trayectorias tiempo temperatura (t–T), se realizó empleando el software HeFTy ([Ketcham, 2005](#); versión 1.9.3.) con el modelo de inversión de Monte Carlo y el modelo de *annealing* multicomponente de trazas de fisión de [Ketcham et al. \(2007\)](#). Las curvas de enfriamiento derivadas de los valores medios (*mean fit path*) y de mejor ajuste (*best fit path*), se determinaron con hasta 200 escenarios de buenas historias térmicas (*Good thermal histories*). Las muestras Px-1 y Pxt-9b presentan cristales típicos de fluorapatito con concentraciones medias (% en peso) de Cl de 0.061 ± 0.011 (SD) y 0.057 ± 0.011 , respectivamente; por consiguiente, su zona de borrado parcial (PAZ) está bien definida entre los 120/110° y 60°C ([Gleadow et al., 1986](#); [Green et al., 1989](#)). Para una mejor delimitación del modelo se emplearon cajas que restringen posibles

soluciones para los modelos t - T basados en eventos geológicos identificados en la Sierra Madre del Sur ([Bedoya Mejía, 2018](#); [Ramírez-Calderón, 2018](#); [Milián, 2019](#)).

5. RESULTADOS

Los datos obtenidos de los análisis practicados en las muestras recolectadas en la zona de estudio, permitieron estudiar y encontrar algunas variaciones mineralógicas, geoquímicas, geocronológicas e isotópicas entre las mismas. Cabe resaltar que no todos los análisis fueron practicados en el total de las muestras, debido a las diferencias composicionales encontradas tanto litológicas como mineralógicas (Figura 8).

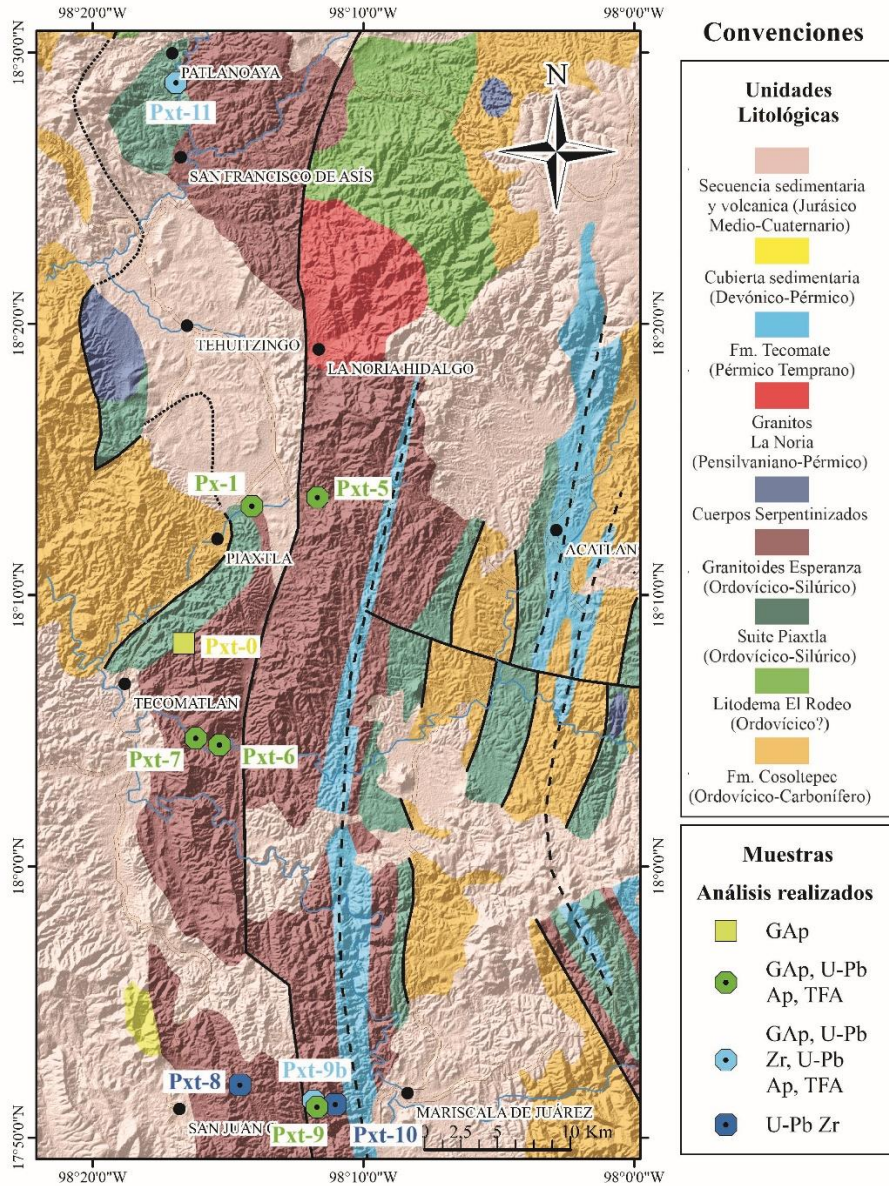


Figura 8. Mapa geológico de la zona de estudio (Modificado de [Ortega-Gutiérrez et al., 2018](#)). Los polígonos pertenecientes a las muestras indican los análisis practicados en ellos: GAp (geoquímica de apatito), U-Pb Ap o Zr (geocronología U-Pb), TFA (trazas de fisión en apatito).

5.1. Descripción litológica y análisis petrográfico

Con el objetivo de lograr una visión detallada sobre las características litológicas de las muestras recolectadas, se realizó una descripción de las muestras (ANEXO A: Petrografía), en donde se distinguieron diferentes facies litológicas principales que subdividen a los Granitoides Esperanza (GE).

Para la descripción petrográfica de láminas delgadas se usó la nomenclatura mineral propuesta por [Whitney y Evans \(2010\)](#).

5.1.1. Augengneises (GE):

Los augengneises conforman la mayor parte de las muestras analizadas y de la unidad GE. Las muestras Pxt – 0, 5, 6, 7, 8, 9b y 11 recolectadas a lo largo de la zona de estudio, corresponden a dichas facies apreciables en muestra de mano y/o en lamina delgada; sin embargo, éstas pueden ser diferenciadas de acuerdo con variaciones texturales y estructurales ([Figura 9a, b](#)).

Esta unidad presenta una dirección de foliación predominante NW-SE a N-S con buzamiento $\sim 70^\circ$ E-NE; bandeamiento polimineral, un alto nivel de deformación (protomilonitas a ultramilonitas), donde se resalta la presencia de fracturas rellenas de calcita, algunos planos estriados y plegamientos.

En general las características litológicas de esta facies corresponden a megacrystales de feldespato potásico de color rosado anaranjado, con estructura de augen o microaugen ([Figura 9b](#)), que pueden estar unidos a otros megacrystales ([Figura 9c](#)), escalonados ([Figura 9d](#)), o deformados ([Figura 9e](#), sigmoides), alcanzando tamaños de hasta 6 cm; también se observa reemplazamiento por plagioclasa en los bordes del feldespato y, a su vez, estos se encuentran envueltos en una matriz que varía de muy fina a media, de cuarzo, moscovita, biotita y granates en menor proporción ([Figura 9e](#)).

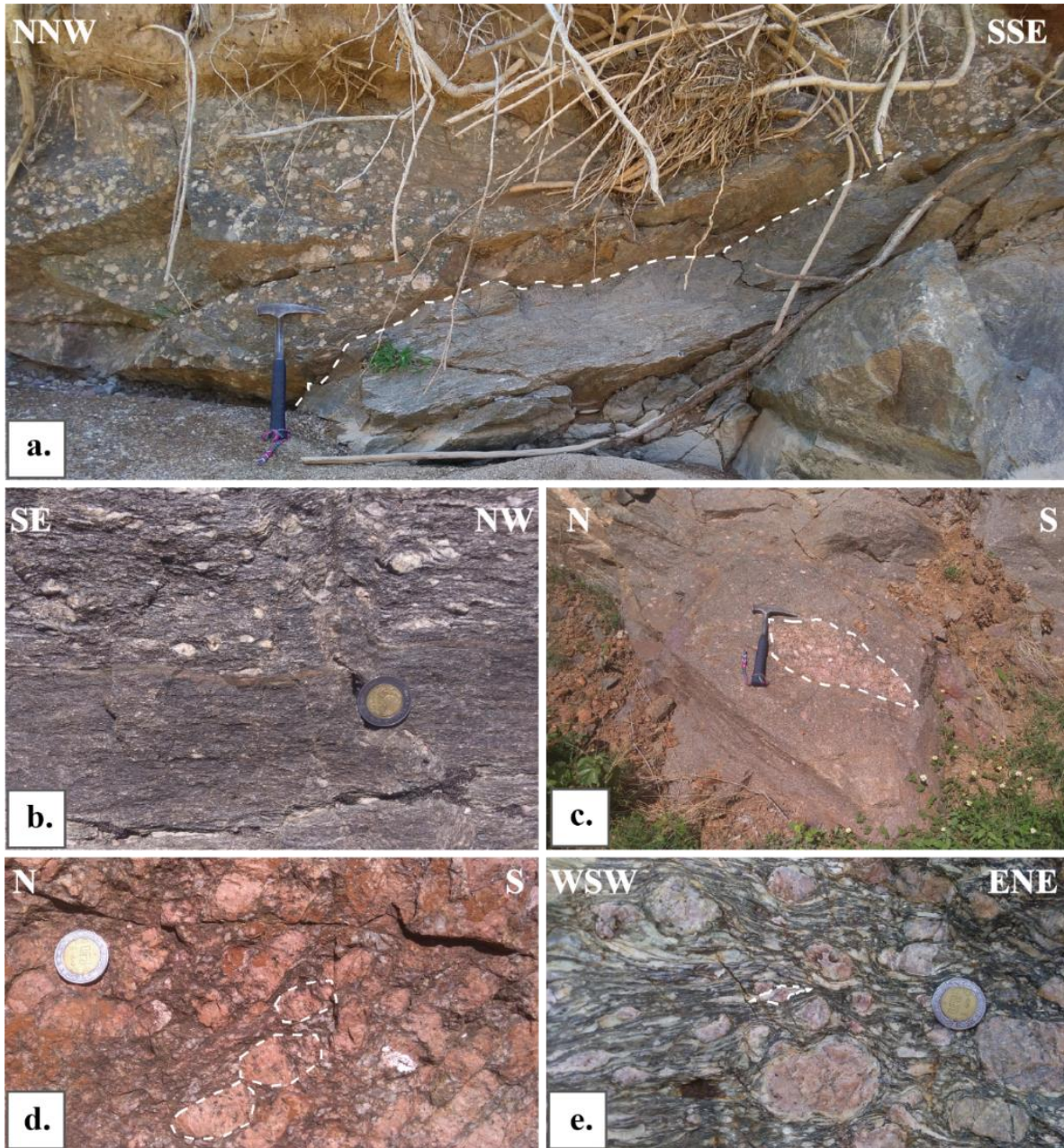


Figura 9. Fotografías de campo de los GE **a)** Contacto de los augengneises con una roca máfica altamente recrystalizada en la localidad tipo, **b)** Variación textural de los GE en el sector de Patlanoaya, margen derecha del río Balsas, **c)** Megacrystalos de feldespato potásico unidos, formando un lente, **d)** Megacrystalos escalonados, **e)** Feldespato con bordes blanquecinos y formas sigmoides.

La petrografía de las láminas delgadas muestra en general la presencia de texturas lepidogranoblásticas, con bandas de cuarzo que presentan bordes irregulares, extinción ondulante y contactos suturados que indican recrystalización (Figura 10a); además, estas

bandas también presentan plagioclasa con macla polisintética y feldespato potásico como la ortoclasa con o sin macla de Carlsbad y microclina con la característica macla de tartán. Las bandas lepidoblásticas son principalmente de mica blanca y biotita con alteración a clorita, donde la mayor parte se encuentra elongada en sentido concordante con la foliación (**Figura 10b**); la asociación mineral predominante es $Qtz + Kfs + Wm + Plg \pm Bt + Grt + Rt + Ep \pm Zo - Czo \pm Ap \pm Zr \pm Ttn$. Los minerales correspondientes a mica (fengita y moscovita) presenta formas tipo mica *fish* (**Figura 10c**); mientras que el feldespato potásico y la plagioclasa presentan bordes irregulares y textura poiquiloblástica caracterizada por inclusiones de moscovita tabular (**Figura 10d**).

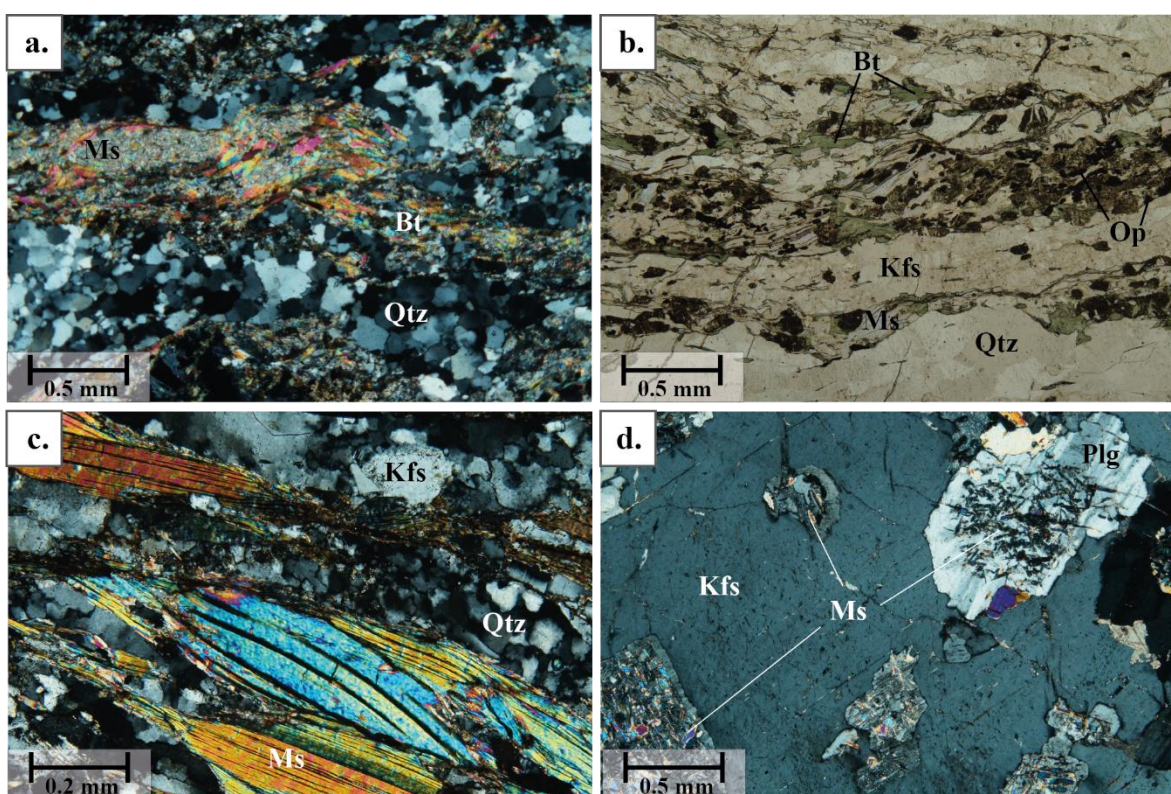


Figura 10. Características generales de los Granitoides Esperanza (GE) **a**) Textura lepidogranoblástica en la muestra Pxt – 6, **b**) Minerales hojosos orientados en sentido de la foliación principal en la muestra Pxt – 0, **c**) Mica *fish* que indica una cinemática sinistral en la muestra Pxt – 9b, **d**) Individuos de Feldespato potásico y plagioclasa con inclusiones de moscovita tabular de la muestra Pxt – 7.

Las muestras Pxt – 6 y 7 presentan microfisuras con relleno de calcita que interrumpen la foliación preexistente (**Figura 11a**), algunos minerales se encuentran parcial o totalmente reemplazados por calcita (**Figura 11b**). Estas muestras contienen biotita altamente alterada a

clorita, en algunas partes se observa diseminada (Figura 11c). La muestra Pxt – 6 presenta granate altamente fracturado, y entre los fragmentos se encuentra biotita altamente cloritizada (Figura 11d). Estos granates se encuentran principalmente en las bandas lepidoblásticas. También se observa la presencia de sericita de forma diseminada.

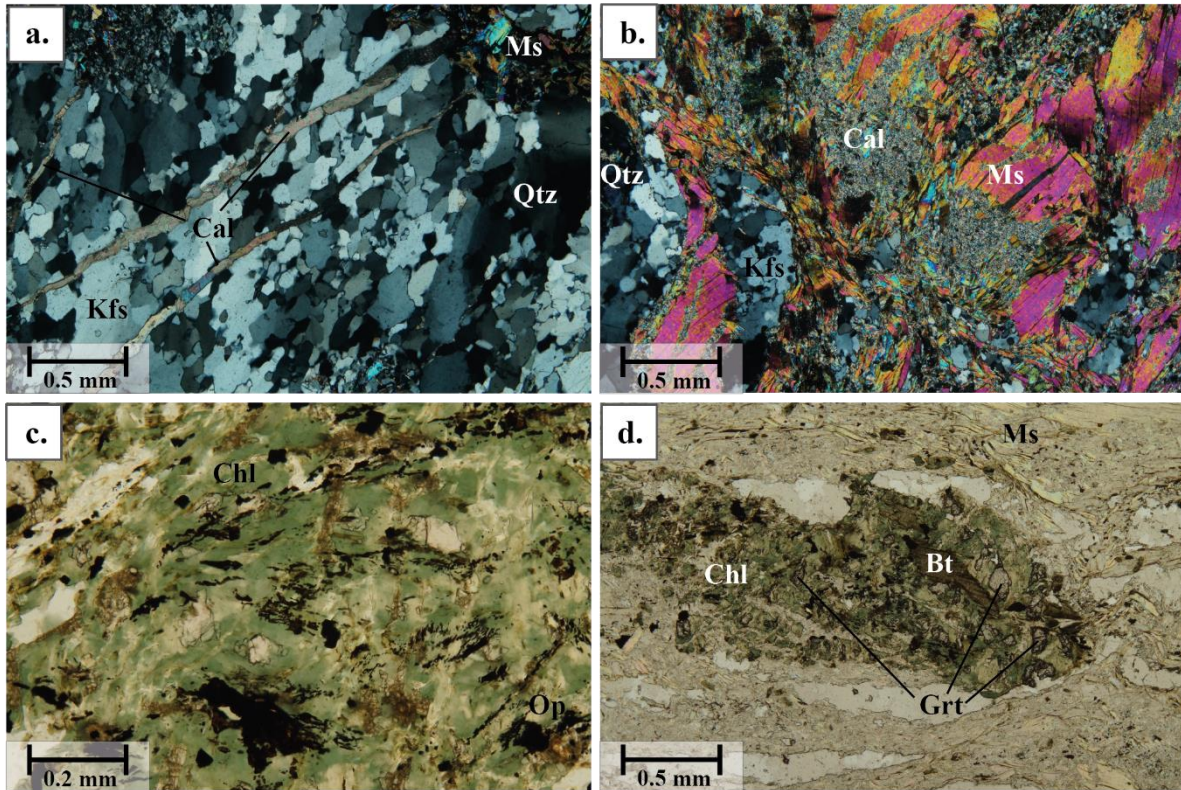


Figura 11. **a)** Microfracturas con relleno de calcita que cortan la foliación principal en la muestra Pxt – 7, **b)** Moscovita reemplazada por calcita en la muestra Pxt – 6, **c)** Clorita en la muestra Pxt – 6, **d)** Fragmentos de granate en medio de clorita y biotita en la banda lepidoblástica.

Otros minerales como la zoisita se encuentran presentes en las muestras Pxt-0, 5 y 9b, en las bandas granoblásticas junto con el feldespato potásico y cuarzo, en ocasiones junto la epidota y la clinozoisita, donde esta última también se asocia a la alteración de la epidota. La presencia de rutilo en las muestras es menor con respecto a los minerales anteriormente descritos; sin embargo, es distinguible por su color marrón rojizo, alto relieve, cristales xenoblásticos y de ~ 40 μm de tamaño.

Por último, como minerales accesorios se encuentran el zircón con formas idioblásticas a subidioblásticas, alto relieve y colores de birrefringencia de tercer orden; en la mayor parte de los casos, su orientación es concordante con la dirección de foliación. El apatito se encuentra

en formas subidioblásticas, algunos fracturados, sin inclusiones aparentes, con tamaños que varían entre 50 a 110 μm , con orientación concordante con la dirección de foliación principal y en menor proporción algunos cristales no presentan una orientación aparente. La titanita y la monacita son los minerales menos abundantes en todas las muestras, ya que solo se observaron en la muestra Pxt-9b, donde la titanita se encuentra rodeando algunos minerales opacos y la monacita en dirección concordante con las micas blancas.

5.1.2. Pegmatitas (GE):

Esta facie se caracteriza por tener grano grueso, consiste principalmente de cuarzo, feldespato potásico y mica blanca (moscovita, fengita), con una dirección de foliación predominante NW- SE, observada solo en la región sur de la zona de estudio (cercañas a Mariscal de Juárez) en contacto neto con los augengneises.

En el análisis petrográfico se observó que las muestras Pxt – 9 y 10 correspondientes a estas facies ([Figura 12a y b](#)), son granoblásticas e inequigranulares, presentan una asociación mineral conformada por Qtz, Kfs, Ms, Plg; donde dichas asociaciones se encuentran en contacto neto entre ellas y con diferentes grados de recristalización. Los cristales de cuarzo no presentan una forma cristalina definida, en su mayoría con bordes irregulares, extinción ondulante y en contacto suturado entre los mismos ([Figura 12c](#)).

Los cristales de feldespato potásico son los de mayor tamaño, algunos con maclado tipo tartán y, junto con la plagioclasa, presentan formas subidioblásticas, bordes rectos a irregulares. La plagioclasa presenta maclado polisintético característico y ambos minerales se encuentran relacionados en texturas pertíticas y micropertíticas ([Figura 12e](#)); además de texturas poiquiloblásticas asociadas, donde las inclusiones son principalmente de moscovita de forma tabular sin orientación preferencial ([Figura 12f](#)).

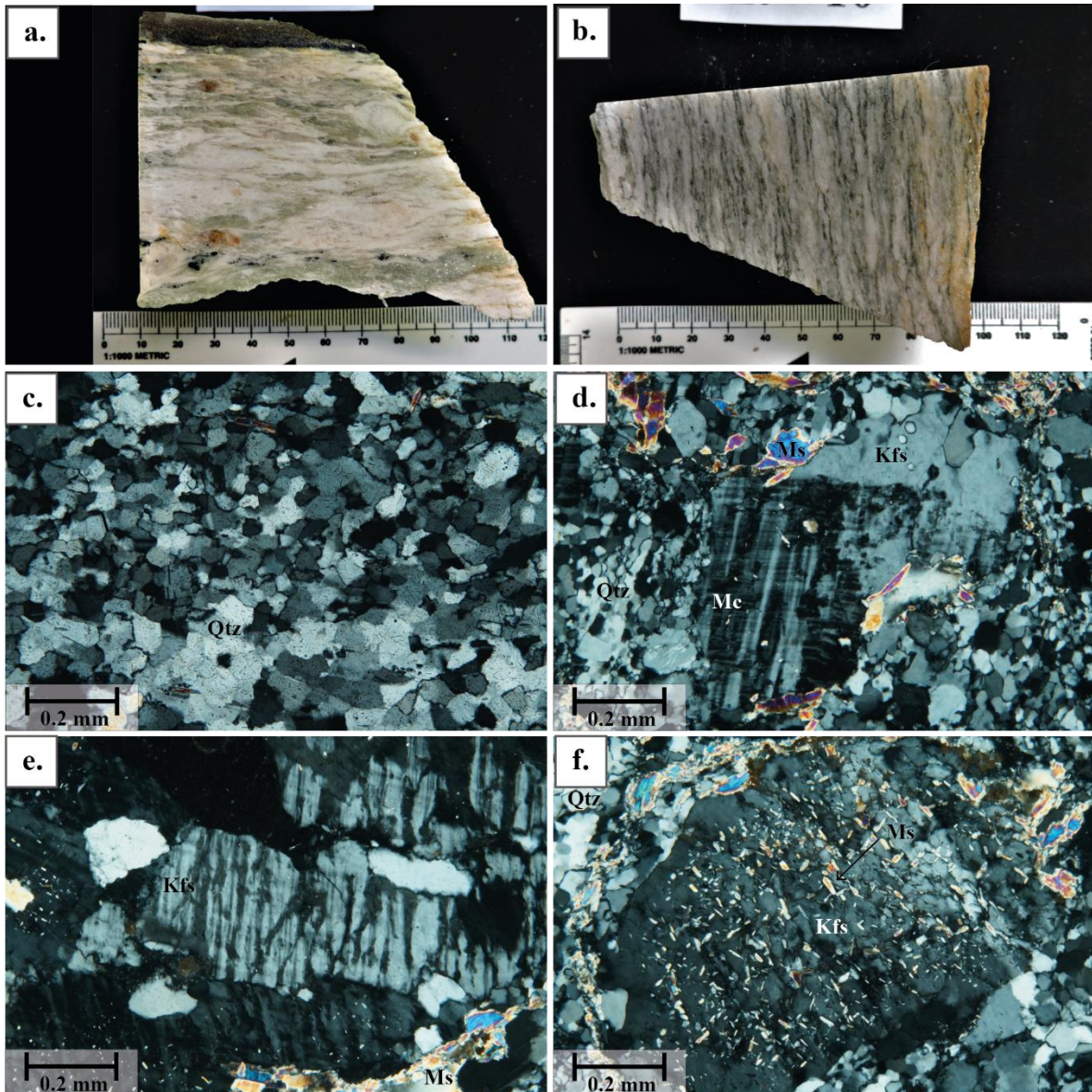


Figura 12. **a, b)** Testigos de las muestras Pxt-9 y 10 donde se ve la foliación y los cristales de Qtz y Kfs, **c)** Cristales de Qtz con evidencia de recrystalización, **d)** Individuos de Mc (macla de tartán), Kfs, Qtz y Ms, **e)** Textura pertítica en Kfs, **f)** Textura poiquiloblástica en Kfs, inclusiones de Ms tabulares.

La moscovita se presenta principalmente en agregados hojosos, de habito laminar, como mineral constituyente de la roca y como relleno de fracturas; además la muestra Pxt-9 presenta localmente bandas de moscovita y mica *fish* (Figura 13a), donde el sentido de la elongación es concordante con la dirección de foliación principal. En esta muestra también se encontró turmalina subidioblástica, con cristales en algunos casos alargados en dirección de la foliación principal (Figura 13b), al igual que porfidoblastos de granate fracturados,

orientados concordantemente a la dirección de foliación, en donde las fracturas entre fragmentos se encuentran rellenas de moscovita y en menor proporción biotita con alteración a clorita (**Figura 13c y d**).

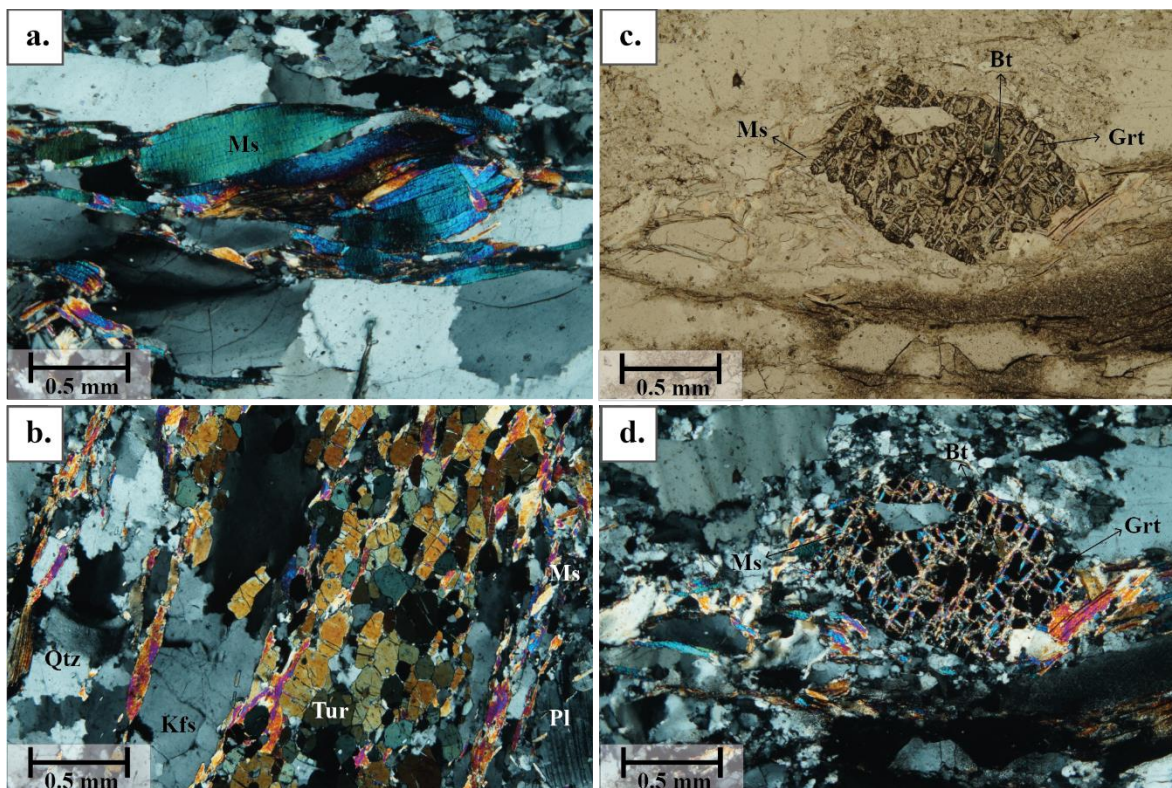


Figura 13. a) Imagen en nicoles cruzados de individuos de moscovita deformada (*mica fish*) con dirección concordante a la foliación, **b)** Imagen en nicoles cruzados de agregados de turmalina con una ligera elongación paralela a la foliación, **c y d)** Imágenes en nicoles paralelos y cruzados respectivamente de porfidoblasto de granate fragmentado

5.2. Geocronología U–Pb en zircones

Los análisis de U–Pb en zircones fueron realizados a las muestras Pxt–8, 9b y 11, que pertenecen a los augengneises; mientras que la muestra Pxt–10 corresponde a una roca pegmatítica foliada. Estos análisis tuvieron como objetivo encontrar edades de cristalización y/o relacionadas al metamorfismo, con ayuda de las imágenes de catodoluminiscencia y edades por medio de interceptos inferiores de líneas de discordia, para la región sur de la zona de estudio. Los fechamientos reportados para esta unidad se centran en los alrededores de la localidad tipo y en la región de Olinalá.

Muestra Pxt-8: Recolectada al sur de la zona de estudio en cercanía de la población de San Juan de Cieneguilla. Los cristales obtenidos presentan formas prismáticas euhedrales a subhedrales, alargados, de entre 100 y 160 μm de largo. Los 38 datos obtenidos se distribuyen a lo largo de la concordia definiendo varios grupos de edades, donde gran parte de ellos son discordantes; por tanto, se obtuvo una edad de intercepto inferior de 356.8 ± 24.2 Ma y una de intercepción superior de 1273 ± 28.1 Ma (Figura 14).

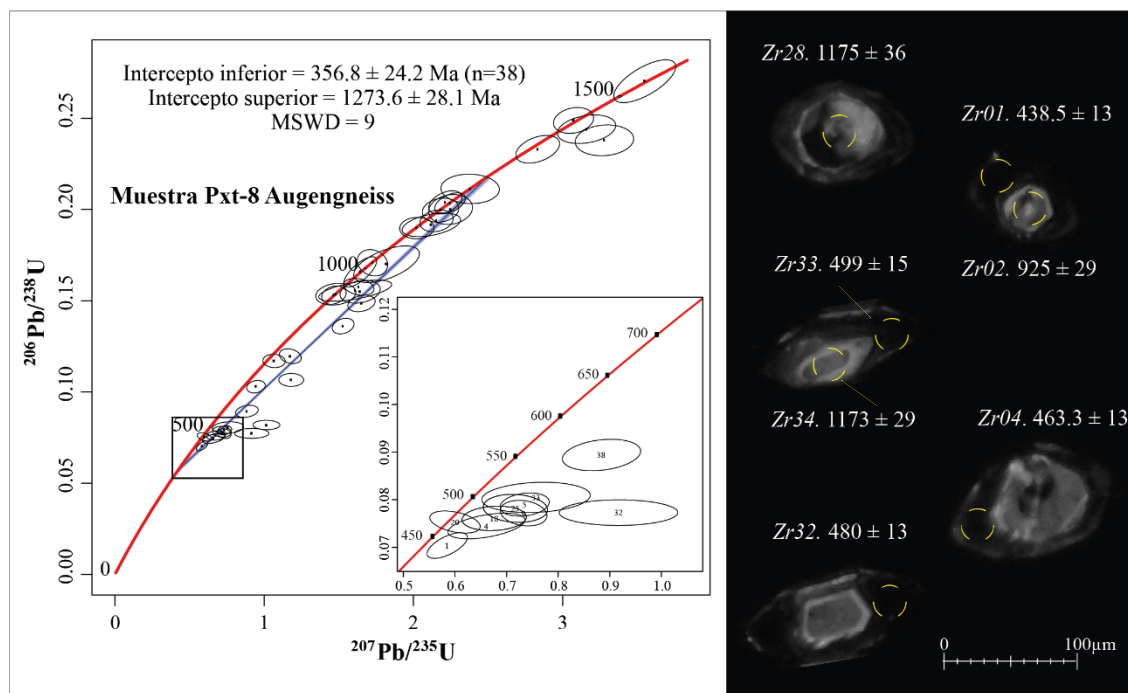


Figura 14. Diagrama de concordia muestra Pxt-8 e imágenes de cátodoluminiscencia (CL) de algunos de los zircones analizados, donde se resalta con el círculo amarillo el área del spot y la edad medida en ese punto.

Muestra Pxt-9b: Localizada hacia el sur en cercanías de la población de Mariscal de Juárez, se seleccionaron 40 zircones para el análisis con ablación láser localizados en bordes y núcleos. Estos zircones presentan formas prismáticas, euhedrales a subhedrales, con bordes rectilíneos a ligeramente curvilíneos, algunos aplanados y ligeramente redondeados o alargados de entre 90 a 230 μm .

En la distribución de edades a lo largo de la concordia se distinguen dos grupos predominantes (Figura 15); el superior presenta un rango de dispersión de los datos más amplios (870–1220 Ma), donde las edades fueron medidas en el núcleo de los cristales, principalmente. El grupo inferior presenta una menor dispersión, lo que permite obtener una

edad de intersección de 463.8 ± 2.6 Ma y un promedio ponderado de 464.7 ± 3.3 Ma para 16 granos de zircón. Estas edades corresponden principalmente a las mediciones realizadas en el borde del cristal (Figura 15).

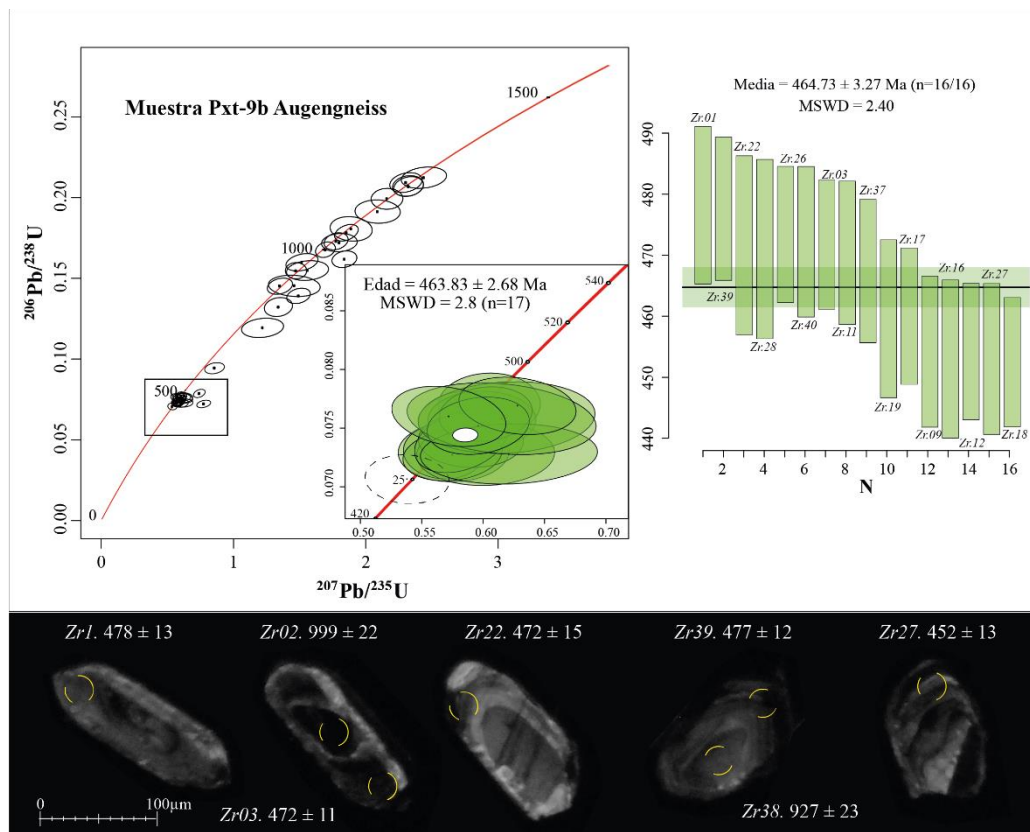


Figura 15. Diagrama de Concordia de la muestra Pxt-9b con edad de intersección y media ponderada de los 16 zircons del grupo inferior analizados, con algunas imágenes de cátodoluminiscencia, donde se resalta con el círculo amarillo el área del spot y la edad medida en ese punto.

- **Muestra Pxt-10:** Esta muestra se localiza al sur en cercanías de la población de Mariscal de Juárez, la cual es la única muestra analizada correspondiente al subgrupo litológico de pegmatitas. Se seleccionaron 24 zircons para el análisis con ablación láser localizados en bordes y núcleos. Estos zircons presentan formas prismáticas euhedrales, con bordes rectilíneos a ligeramente curvilíneos, alargados de entre 60 y 140 μm (Figura 16).

Se distingue un grupo concordante de edades con una intersección de 463 ± 2.6 Ma y un promedio ponderado de 461.6 ± 3.3 Ma (Figura 16). Estas edades corresponden tanto a los bordes como a los núcleos de los zircons.

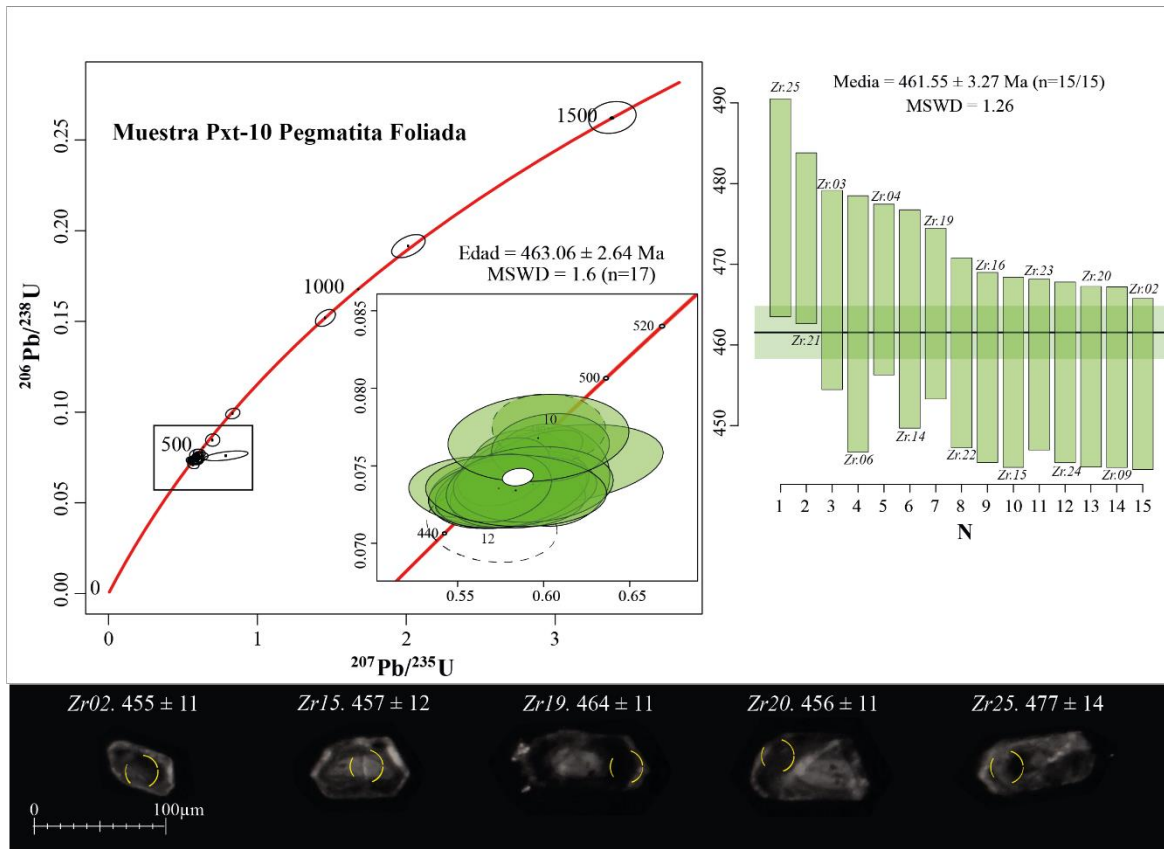


Figura 16. Diagrama de Concordia de la muestra Pxt-10 con edad de intersección y media ponderada de los zirrones analizados con algunas imágenes de catodoluminiscencia, donde se resalta con el círculo amarillo el área del spot y la edad medida en ese punto.

- **Muestra Pxt-11:** Localizada en la región de Patlanoaya, al norte de la zona de estudio. Se analizaron 38 zirrones en bordes y núcleos, con formas euhedrales a subhedrales, con bordes rectilíneos a ligeramente curvilíneos y formas alargadas de entre 70 y 150 μm (Figura 17).

Se distinguen 3 grupos de edades a lo largo de la concordia, donde el grupo inferior presenta una edad de intersección de 471.7 ± 2.9 Ma y un promedio ponderado de 469 ± 3.5 Ma (Figura 17). Todas las edades obtenidas del grupo inferior, corresponden a los bordes de los cristales.

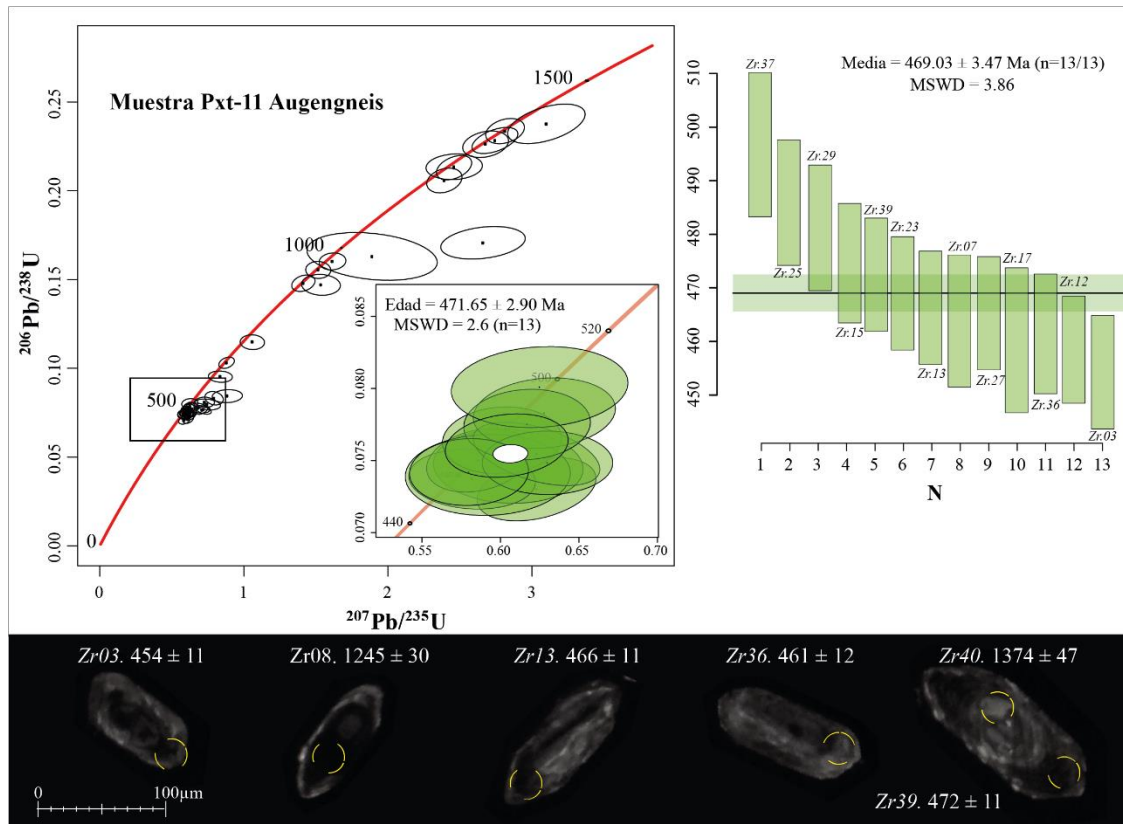


Figura 17. Diagrama de Concordia de la muestra Pxt-11 con edad de intersección y media ponderada de los 13 zircons del grupo inferior analizados, con algunas imágenes de catódoluminiscencia, donde se resalta con el círculo amarillo el área del spot y la edad medida en ese punto.

5.3. Geocronología U–Pb en apatito

Se realizaron los fechamientos isotópicos por el sistema U–Pb en apatitos de cinco muestras (Px–1, Pxt–5, 7, 9b y 11) correspondientes a la unidad Granitoides Esperanza. Los granos de apatito analizados presentan en general formas subredondeadas, alargados en su eje “C” y de apariencia traslúcida.

Los datos correspondientes a los cocientes isotópicos se presentan en diagramas de concordia TW (Figura 18), en los que se observa un único arreglo general coherente para cada una de las muestras en la línea de discordia.

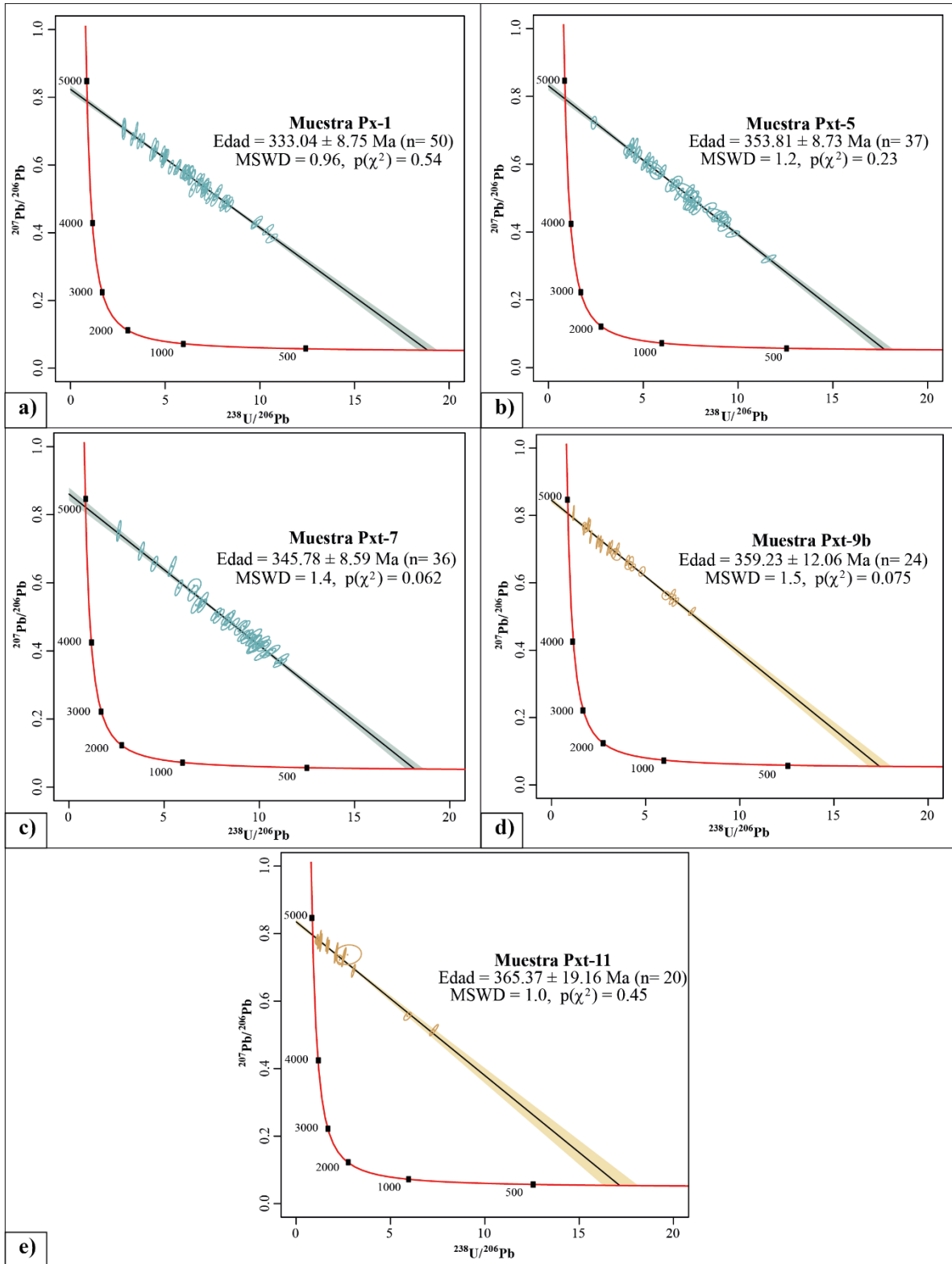


Figura 18. Diagramas de concordia Tera-Wasserburg de los apatitos de la unidad Granitoides Esperanza **a)** Muestra Px – 1, **b)** Muestra Pxt – 5, **c)** Muestra Pxt – 7, **d)** Muestra Pxt – 9b, **e)** Muestra Pxt – 11.

Se analizaron entre 40 y 50 cristales de apatito por el método U–Pb por cada muestra; sin embargo, no todos se usaron para el cálculo de las edades, ya que algunos no presentaban señal de U, Th, Pb o de elementos traza durante la corrida analítica.

En la muestra Px–1 se lograron obtener datos de todos los granos analizados (50), cuyo único arreglo lineal forma una intersección inferior de 333 ± 8 Ma (Figura 18 a), lo que corresponde al Misisípico Medio. Para las muestras Pxt–5 y Pxt–7 se utilizaron 37 cristales para el análisis, los cuales forma un arreglo lineal y un intercepto de 353 ± 8 Ma y 346 ± 9 Ma, respectivamente (Figura 18 b, c); éstas corresponden al Misisípico Medio. Para la muestra Pxt–9b se emplearon 24 cristales de apatito, donde los datos presentan un único arreglo lineal con intercepto de 359 ± 12 Ma. Por último, en la muestra Pxt–11 se usaron 20 cristales, que al igual en las otras muestras, presentan un único arreglo lineal, sin embargo, estos presentan un intercepto de 365 ± 19 Ma. Estas dos últimas muestras corresponden al Devónico Tardío (Figura 18 d, e).

5.4. Geoquímica de apatitos

El análisis de química de apatitos se realizó para cinco muestras (Px–1, Pxt–5, 7, 9b y 11) con 40 granos cada una, todas correspondientes a la unidad GE. Las concentraciones de los elementos se obtuvieron durante la ablación láser usada para la geocronología U–Pb. Como primer análisis se emplearon gráficos de patrones de elementos de tierras raras (REE), para observar el comportamiento de éstas (Figura 19). En general, se puede observar una anomalía negativa en Eu y tres patrones predominantes: el primero (presente en 4 de las 5 muestras) se encuentra definido por un leve empobrecimiento de los elementos de tierras raras ligeras (LREE) y patrones semi aplanados de los elementos de tierras raras pesadas (HREE) resaltados en color verde; el segundo se encuentra definido por un patrón aplanado de los elementos LREE y empobrecimientos más marcados de los elementos HREE (azul). Por último, el patrón menos abundante es el determinado por el empobrecimiento de LREE y enriquecimiento de HREE (morado). Además, se realizaron gráficos para observar las abundancias de elementos como Sr, Y, U y Th (Figura 20 y Figura 21).

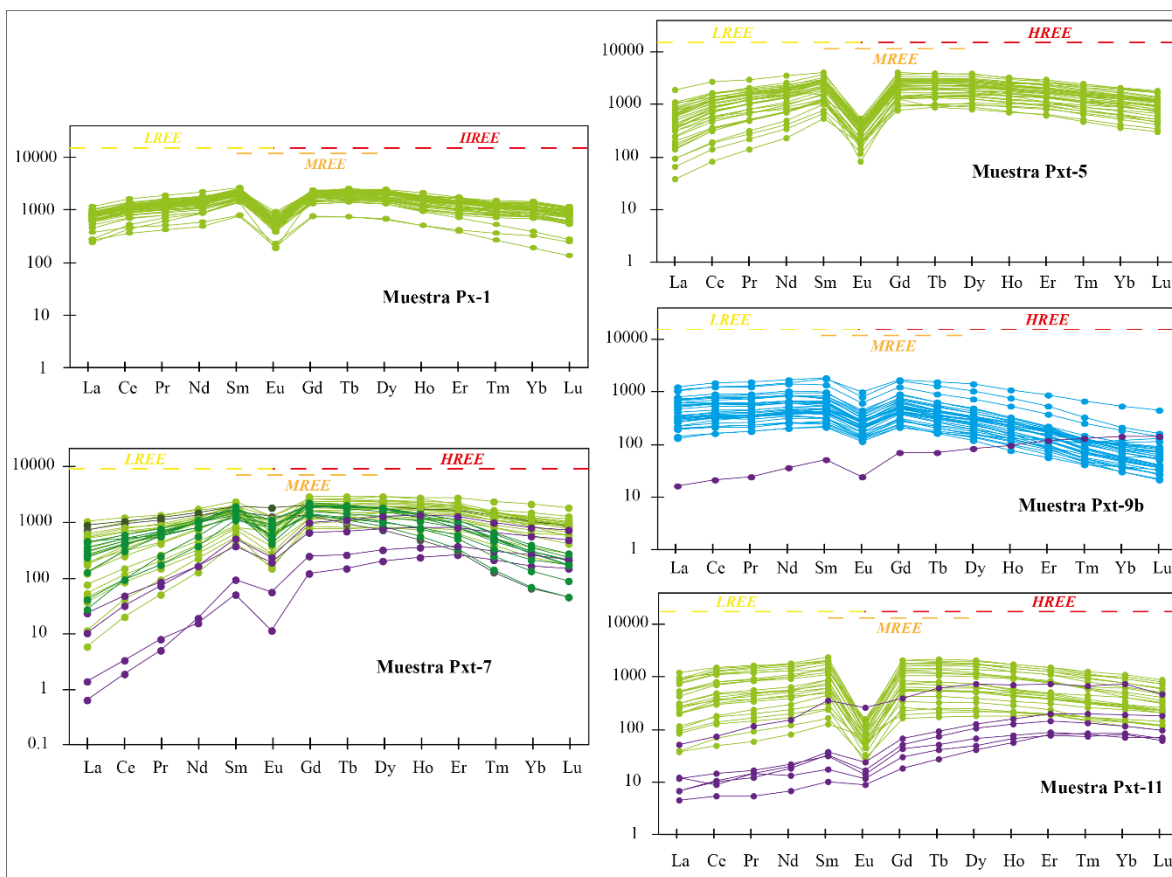


Figura 19. Diagramas de patrón de elementos de tierras raras (REE) normalizados a condrito (McDonough y Sun, 1995) de los apatitos recolectados de las muestras de la unidad GE.

Las muestras Px-1 y Pxt-5 presentan un comportamiento homogéneo de las REE, donde la totalidad de los granos analizados revelan el primer patrón predominante y abundancias bajas de Sr y altas de Y (Figura 20), al igual que la muestra Pxt-7; sin embargo, en esta última muestra se observa un subgrupo con anomalías negativas de Eu menos marcadas a tenues (verde oscuro) y un segundo grupo de granos que presenta empobrecimiento de LREE y enriquecimiento de HREE.

Para la muestra Pxt-9b la mayor parte de los granos exhibe un comportamiento de las REE correspondiente al segundo patrón, excepto en un grano donde se observa un enriquecimiento de las HREE y bajas abundancias de tanto de Y como de Sr (Figura 20).

La muestra Pxt-11 presenta dos grupos: el primer grupo presenta el patrón predominante (verde) similar a la muestra Pxt-5; mientras el segundo grupo presenta el patrón determinado

por el enriquecimiento de las HREE (morado). Además, presenta una mayor abundancia de Sr y valores intermedios a bajos de Y (Figura 20), con respecto a las otras muestras.

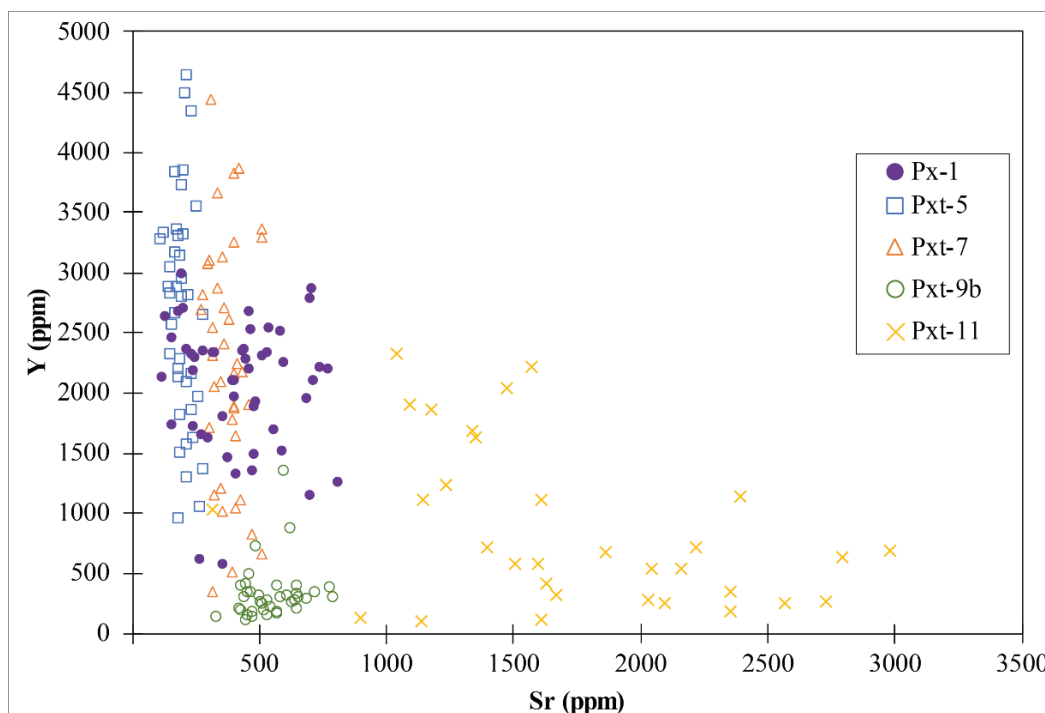


Figura 20. Diagrama de Y vs Sr (ppm) en apatitos de las muestras recolectadas.

Los diagramas de U vs Th muestran relaciones lineales entre los elementos de las 5 muestras analizadas (Figura 21). La mayor parte de los datos se concentran en la región comprendida entre las líneas de relación Th/U iguales a 0.1 y 1.0. Se observan dos granos que sobrepasan el límite 1.0, que corresponden a las muestras Pxt-5 y 11.

Los datos de la muestra Px-1 presenta valores de relación Th/U entre 0.032 y 0.22; sin embargo, la mayor parte son inferiores a 0.1. En general, se observan bajas concentraciones de Th en las muestras con respecto al contenido de U. Algunos pocos datos indican bajo contenido de U correspondientes a las muestras Pxt-7, 9b y 11.

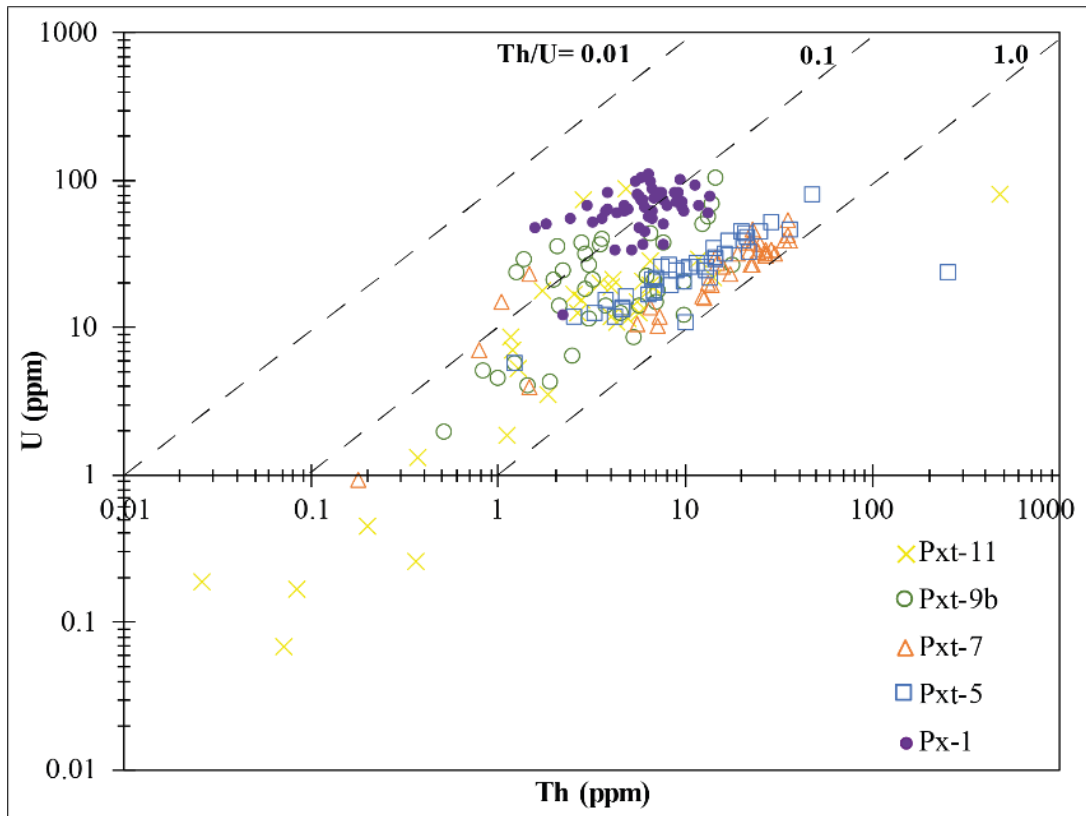
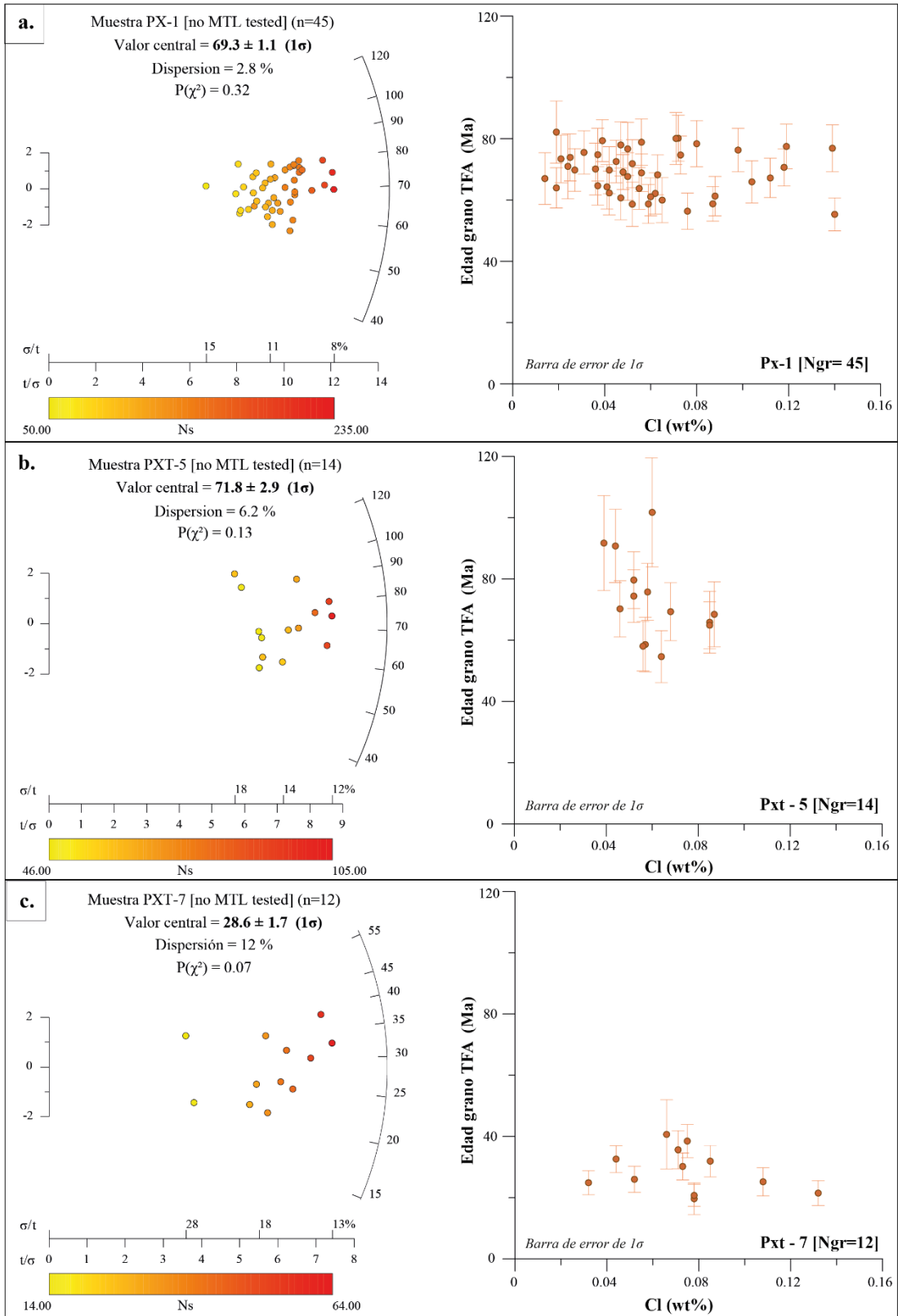


Figura 21. Diagrama de las concentraciones de U vs Th (ppm) en apatitos de las muestras recolectadas.

5.5. Trazas de Fisión en Apatito (TFA)

Se ejecutó el análisis de TFA para cinco muestras de la unidad Granitoides Esperanza (Px – 1, Pxt – 5, Pxt – 7, Pxt – 9b y Pxt – 11), cuantificando el contenido de U a través de LA-ICP-MS (método de medición del contenido de U por LA-ICP-MS: [Hasebe et al., 2004](#)). Los granos analizados corresponden a fluorapatitos típicos con muy bajas cantidades entre 0 y 0.16 (% wt) de Cl ([Figura 22](#)).

En la muestra Px-1 se contaron entre 50 y 235 trazas de fisión espontáneas por cristal de apatito, con un contenido de ^{238}U que varía entre 33.46 y 110.56 ppm. Con estos datos se obtuvo una edad central de 69.3 ± 1.1 (1σ) Ma, con una dispersión del 2.8% y valor de prueba χ^2 de 32%, por lo que se infiere que las edades individuales son consistentes con una sola población de granos ([Galbraith, 1981; Figura 22a](#)).



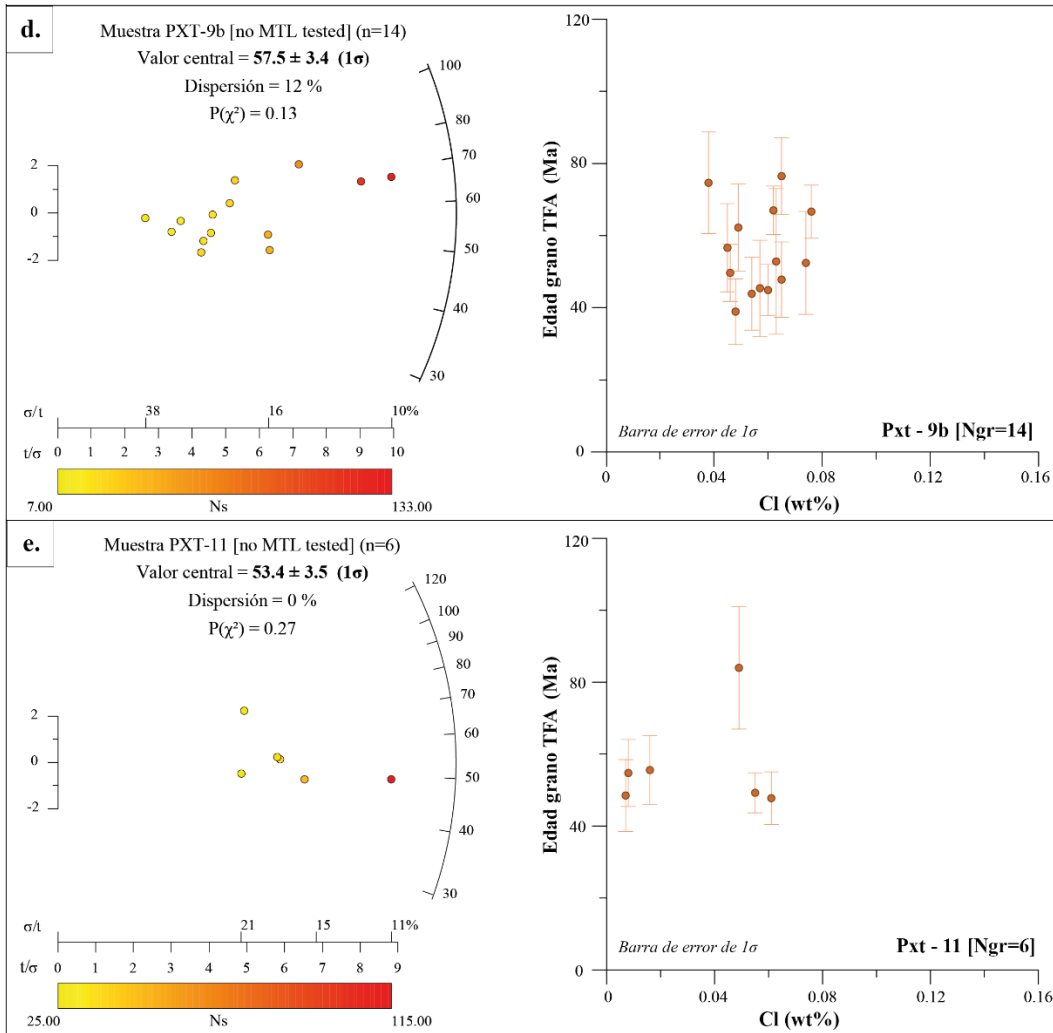


Figura 22. Diagramas tipo radial de edades de TFA y gráficos de %CI vs Edad TFA, **a)** Muestra Px – 1, **b)** Muestra Pxt – 5, **c)** Muestra Pxt –7, **d)** Muestra Pxt – 9b y **e)** Muestra Pxt – 11.

Para la muestra Pxt-5 se realizó un conteo entre 46 y 105 trazas de fisión espontánea por cristal de apatito, con un contenido de ^{238}U que varía entre 15.18 y 43.13 ppm. La edad central encontrada es de 71.8 ± 2.9 (1σ) Ma, con una dispersión del 6.2%; la prueba χ^2 es de 13%, por lo que se asume que las edades individuales son consistentes con una sola población de granos (Galbraith, 1981; Figura 22b).

La muestra Pxt-7 se observaron entre 14 y 64 trazas de fisión espontánea por cristal de apatito, con un contenido de ^{238}U que varía entre 14.94 y 38.68 ppm. La edad central encontrada es de 28.6 ± 1.7 (1σ) Ma con una dispersión del 12%; la prueba χ^2 es de 7%, por

lo que se asume que las edades individuales son consistentes con una sola población de granos (Galbraith, 1981; Figura 22c).

En la muestra Pxt-9b se observaron entre 7 y 133 trazas de fisión espontánea por cristal de apatito, con un contenido de ^{238}U que varía entre 3,9 y 68,82 ppm. La edad central encontrada es de 57.5 ± 3.4 (1σ) Ma con una dispersión del 12%; la prueba χ^2 es de 13%, por lo que se asume que las edades individuales son consistentes con una sola población de granos (Galbraith, 1981; Figura 22d).

Por ultimo, en la muestra Pxt-11 se contaron entre 25 y 115 trazas de fisión espontánea por cristal de apatito, con un contenido de ^{238}U que varía entre 12,62 y 74,7 ppm. La edad central encontrada es de 53.4 ± 3.5 (1σ) Ma con una dispersión del 0%; la prueba χ^2 es de 27%, por lo que se asume que las edades individuales son consistentes con una sola población de granos (Galbraith, 1981; Figura 22e).

En las muestras Px-1 y Pxt-9b se obtuvieron datos promedio de longitudes de traza de 12.81 ± 1.48 (μm) y 13.07 ± 1.35 (μm), respectivamente. Estas longitudes fueron medidas en trazas tipo TINT (traza confinada con intersección con otra traza (ANEXO G: Mediciones de longitudes de trazas de fisión en apatitos) y estos datos fueron utilizados para la generación de los modelos térmicos de trayectorias t-T.

6. DISCUSIÓN

6.1. Metamorfismo de la unidad Granitoides Esperanza (GE)

Las muestras de roca analizadas en este trabajo correspondientes a la unidad Granitoides Esperanza (GE), coinciden con dos de los subgrupos litológicos descritos por [Reyes-Salas, \(2003\)](#): augengneises protomilonítico–milonítico–ultramilonítico y pegmatitas; esto en el área comprendida entre el sector del Cerro Lagunilla y las poblaciones de Piaxtla y Tetla. Cabe resaltar que las muestras asociadas a pegmatitas en este estudio solo se encontraron hacia la región sur (Mariscal de Juárez), mientras que los augengneises se distribuyen uniformemente en el área de estudio con sus características típicas: megacristales de feldespatos potásico, en algunos casos microclina, pertitas y en menor proporción plagioclasa, tal y como reportan diferentes trabajos (e.g., [Ortega-Gutiérrez, 1978](#); [Ortega-Gutiérrez et al., 1999](#); [Reyes-Salas, 2003](#); [Vega-Granillo et al., 2007, 2009](#)).

Las muestras analizadas para la unidad GE presentan una mineralogía definida por $Qtz + Plg + Kfs + Ep + Phe + Bt + Grt + Rt \pm Zo$, con una intensa milonitización que se evidencia en sus diferentes variaciones estructurales que van desde protomilonitas hasta ultramilonitas y, en algunas zonas, se muestran características blastomiloníticas. Algunas de las características texturales y estructurales de las rocas permiten establecer ciertas condiciones dadas durante los eventos metamórficos. Una de las texturas encontradas en la totalidad de las muestras analizadas son las pertíticas y micropertíticas, que pueden indicar exsolución durante el enfriamiento de un feldespatos homogéneo formado a temperaturas muy altas o bien, una movilización entre el sodio y el potasio a temperaturas menores ([Pryer et al., 1995](#); [Reyes-Salas, 2003](#)). Las pertitas tipo flama identificadas, se consideran estructuras que se forman bajo condiciones de deformación durante el metamorfismo retrógrado, al igual que la macla de tartán en la microclina en rocas gnéicas ([Barker, 1990](#)); mientras que la presencia de maclas por deformación en la plagioclasa representadas como ondulaciones vistas en las muestras correspondientes a los augengneises, requieren temperaturas mínimas de 550 a 650°C ([Altenberger, 1995](#); [Hanmer, 1981](#)). Por último, las texturas manto–núcleo asociadas a la recristalización dinámica y alta deformación en el cuarzo, se restringen a una temperatura entre 400 y 500°C ([Boskurt y Park, 1997](#)); por otra parte, las texturas asociadas a la recristalización dinámica del cuarzo como los “*quartz ribbons*” tipo B4 se asocian a

temperaturas alrededor de 400 y 600°C, mientras que los cuarzos recristalizados con juntas triples de ángulo de 120° refleja un ajuste termodinámico después de la deformación (Passchier y Trouw, 2005).

Con base en lo anterior, se puede afirmar que la unidad GE presenta diferentes grados de metamorfismo registrados, de acuerdo a sus características mineralógicas y texturales, donde se evidencia el metamorfismo prógrado (M1) con una asociación mineral dada por $Grt + Rt + Phe + Zo + Kfs + Bt + Qtz$; similar a las descritas para el pico metamórfico (M1) en facies eclogita, a excepción de la presencia de onfacita (Ortega-Gutiérrez et al., 1999; Vega-Granillo et al., 2007; Galaz et al., 2013). A este evento metamórfico de alta presión y temperatura se le asocia un primer evento de deformación (Vega-Granillo et al., 2009, 2007), al cual se puede atribuir la presencia de las maclas de deformación en la plagioclasa.

El segundo evento metamórfico evidenciado (M2) corresponde a facies de retrogresión (facies anfibolita – epidota), definida por una asociación mineral de $Ep + Phe + Ab + Qtz + Mc$. El metamorfismo de retrogresión descrito por Reyes-Salas (2003), incluye la presencia de titanita y biotita pobre en Ti; sin embargo en este estudio no se encontró la presencia de titanita como mineral paragenético, ni se diferenciaron grupos o familias de biotita. Este evento metamórfico puede también ser definido por rango de temperatura, con algunas características texturales como la presencia de la macla de tartán en la microclina, las pertitas tipo flama, las texturas manto-núcleo y los *quartz ribbons*. Por último, la presencia de minerales de alteración como $Ep + Chl + Ms + Ser$ y las juntas triples de cuarzos recristalizados podrían relacionarse a un tercer evento de metamorfismo de retrogresión de baja temperatura (M3), también definido por Reyes-Salas (2003).

Las condiciones de P–T en los eventos metamórficos mediante el uso de geotermobarometría no fueron implementados en este estudio; sin embargo, se cuenta con los siguientes datos:

- El evento M1 presenta condiciones de facies de eclogita, con presiones de 15 a 17 kilobares y temperaturas entre 650 y 720° C (Reyes-Salas, 2003).
- El pico metamórfico M1 en facies de eclogita es determinado por Reyes-Salas (2003) a una temperatura de 720°C y una presión de 17 kilobares y por Vega-Granillo et al. (2007) a temperaturas entre 638–748°C y, presiones entre 13.7 y 15.5 kilobares.

- El evento metamórfico M2 por descompresión en facies anfibolita–epidota, es establecido en condiciones de temperatura entre 450 a 500°C y presiones menores a 12 kilobares (Reyes-Salas, 2003).
- Algunas mediciones adicionales realizadas por Vega-Granillo et al. (2007) para la *suite* Esperanza establecen para las rocas eclogíticas condiciones de $T = 768$ a 830°C y $P = 15$ – 17 kbares (jadeíta en onfacita); mientras que para esquistos pelíticos las condiciones de T se encuentran entre 617 – 699°C y presiones entre 13.2 a 14.7 kbares.

La causa o evento tectónico relacionado con el metamorfismo de alta presión que afecta a la unidad GE ha sido definido mediante la comparación de los patrones P-T con otras trayectorias de eclogitas reportadas como lo son los terrenos de Cabo Ortegal, Carolina y los Alpes, en donde la eclogitización es producto del metamorfismo por colisión y hundimiento de un microbloque continental bajo una corteza continental (Vega-Granillo et al., 2007; Figura 23a). Otros estudios interpretan que durante el metamorfismo hubo fusión parcial, así como deformación plástica durante un evento orogénico y posterior descompresión (Ortega-Gutiérrez et al., 1999; Reyes-Salas, 2003; Talavera-Mendoza et al., 2005; Vega-Granillo et al., 2009; Ortega-Gutiérrez et al., 2018).

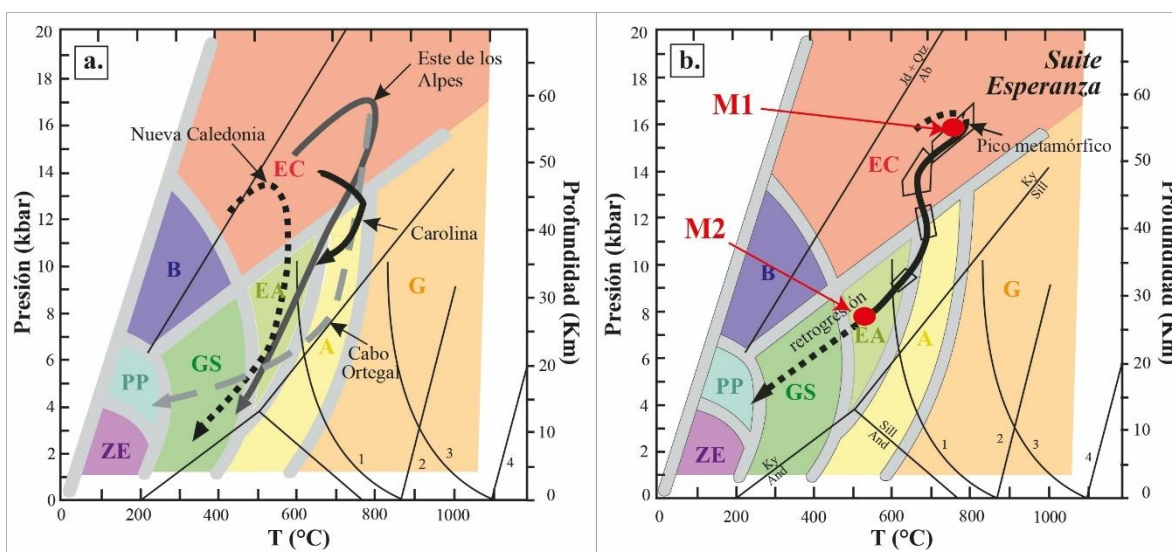


Figura 23. Diagramas de Presión – Temperatura (P-T) **a)** Patrones de referencia de complejos de subducción y colisión, **b)** Patrón para la *Suite* Esperanza, donde se resaltan las localizaciones aproximadas de los eventos M1 y M2. ZE: facies zeolita; PP: facies fengita – pumpelita; B: facies esquistos azules; GS: facies esquistos verdes; EA: facies epidota – anfibolita; A: facies anfibolita; EC: facies eclogita; G: facies granulita. Modificado de Vega-Granillo et al., 2007.

En la unidad GE no es posible determinar los estadios tempranos del metamorfismo progrado (posteriores a la cristalización y previas al pico metamórfico), debido a las condiciones de alta temperatura en las que se han encontrado estas rocas (Ramírez-Espinoza, 2001; Reyes-Salas, 2003; Vega-Granillo et al., 2007). Sin embargo, los eventos M1 y M2 identificados permiten adoptar el patrón de P–T establecido por Vega-Granillo et al. (2007) para las rocas que conforman la *suite* Esperanza, donde se puede proponer un mejor acotamiento de los eventos metamórficos M1 y M2, de acuerdo con las facies metamórficas determinadas y los datos disponibles de geotermobarometría (Figura 23b).

6.2. Cristalización y primer evento metamórfico de los Granitoides Esperanza (GE)

Las edades encontradas mediante geocronología U–Pb en zircón para las muestras Pxt–9b (zona sur–Mariscala de Juárez) y Pxt–11 (zona norte–Patlanoaya) de 465 ± 3.3 Ma y 469 ± 3.5 Ma, corresponden al rango geocronológico establecido como la edad de cristalización ígnea para la unidad GE entre 485 y 440 Ma (Ortega-Gutiérrez et al., 1999; Sánchez-Zavala et al., 2004; Talavera-Mendoza et al., 2005; Vega-Granillo et al., 2007; Galaz et al., 2013). Además, la muestra Pxt–10 al ser definida litológicamente como una roca pegmatítica de 461 ± 3.3 Ma, permite establecer que la cristalización de estas facies litológicas tuvo lugar en el mismo espacio de tiempo que las facies del augengneis.

Algunas de las edades reportadas para la unidad GE se determinaron mediante interceptas inferiores de líneas de discordia alrededor de los 440 Ma (e.g., Ortega-Gutiérrez et al., 1999; Vega-Granillo et al., 2007), las cuales pueden representar la edad de metamorfismo (Ortega-Gutiérrez et al., 2018). Por otra parte, las intersecciones superiores varían alrededor del intervalo de 1000–1200 Ma y, son interpretadas como edades correspondientes a herencias típicas de rocas metaígneas grenvilianas, con fuentes posibles de Oaxaquia, Gondwana o Laurentia (Ortega-Gutiérrez et al., 1999; Yañez et al., 1991; Talavera-Mendoza et al., 2005; Figura 24).

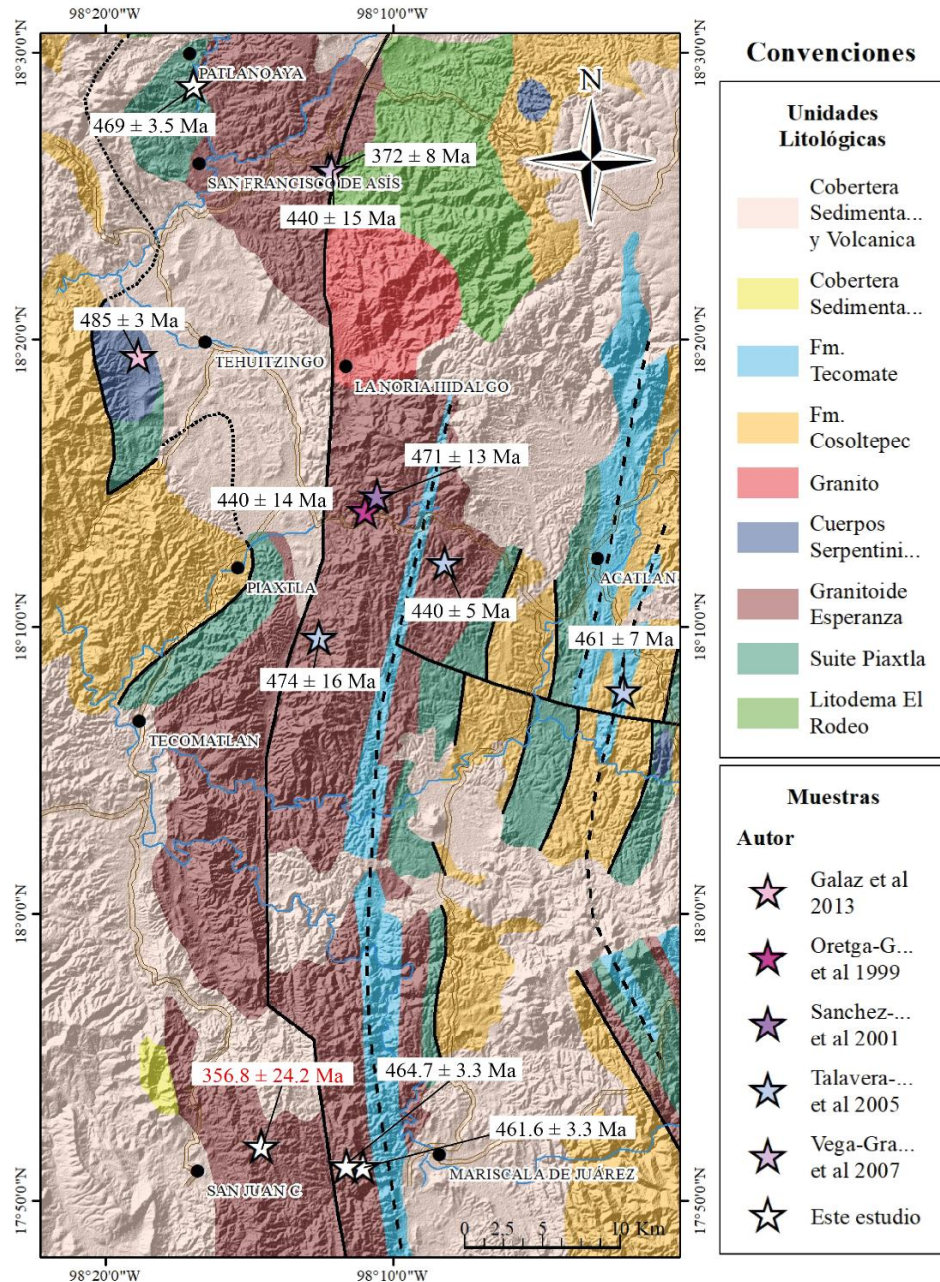


Figura 24. Mapa de edades reportadas para la unidad Granitoides Esperanza en este estudio y por Galaz et al. 2013; Ortega-Gutiérrez et al. 1999; Sánchez-Zavala et al. 2004; Talavera-Mendoza et al. 2005 y Vega-Granillo et al. 2007.

Para el caso de las muestras Pxt – 9b y Pxt – 11, la población de zircones discordantes genera intersecciones superiores de 1146 ± 37 Ma y 1279 ± 41 Ma respectivamente (Figura 25), los que puede corresponder a las herencias típicas reportadas para esta unidad (Ortega-Gutiérrez et al., 1999; Yañez et al., 1991; Talavera-Mendoza et al., 2005). Por otra parte, las interceptas inferiores de 413.5 ± 19 y 415.7 ± 15 Ma de las muestras Pxt – 9b y Pxt – 11 respectivamente,

coinciden con los resultados obtenidos en la unidad GE por [Ortega-Gutiérrez et al. \(1999\)](#), mediante el sistema U–Pb en monazita (418 ± 18 Ma), [Vega-Granillo et al. \(2007\)](#) con Ar–Ar en anfíbol (430 ± 10 Ma) y por [Yañez et al. \(1991\)](#), quienes establecen eventos tectonotermales importantes relacionados con metamorfismo y deformación en el Complejo Acatlán para el Devónico Temprano.

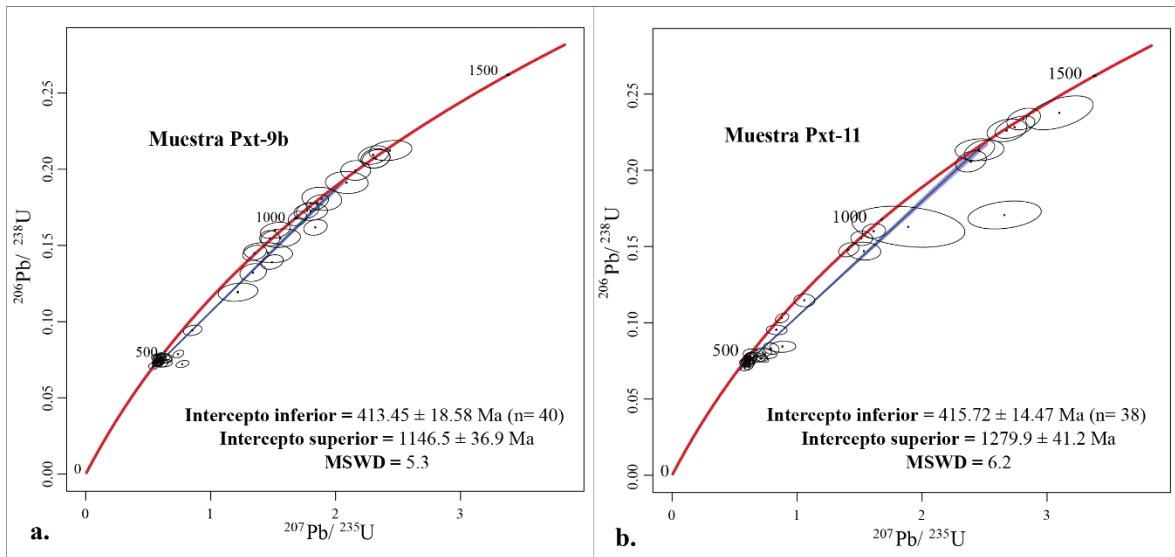


Figura 25. Edades U-Pb en zircón mediante modelo de discordia con edades de intercepto superior e inferior para las muestras **a)** Pxt-9b y **b)** Pxt-11.

La edad de intercepta inferior de la muestra Pxt – 8 de 357 ± 24 Ma no coincide con la edad de cristalización ígnea ni con la edad de metamorfismo interpretada por otros autores ([Ortega-Gutiérrez et al., 2018](#)); sin embargo, coincide con los resultados obtenidos para los análisis de U–Pb en apatitos ([Tabla 2](#)), lo que puede sugerir una posible relación de esta edad con los eventos relacionados a las edades encontradas en los apatitos. No obstante, para la interpretación de una edad discordante, no basta solo con la correspondencia de los datos a una sola línea de discordia; ya que esto puede darse por diferentes factores, tal y como lo describen [Mezger y Krogstad \(1997\)](#), en donde se mencionan algunas posibles interpretaciones: la más simple se encuentra relacionada a la edad de formación del sobrecrecimiento en el cristal. Sin embargo, esto requiere que tanto el material antiguo como el nuevo permanezcan siempre como un sistema cerrado; otra posibilidad es que la intercepta

inferior corresponda al tiempo de una perturbación térmica asociada a algún evento geológico como, por ejemplo, la exhumación (Goldich y Mudrey, 1972 en Mezger y Krogstad, 1997).

Tabla 2. Resumen de edades reportadas en este estudio.

Muestra	Tipo de Roca	Edad U-Pb Zr (Ma)		Edad U-Pb Apt (Ma)		Edad TFA (Ma)	$\pm 2\sigma$
		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 2\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 2\sigma$		
Px – 1	Metagranitoide	-	-	333	9	69.3	1.1
Pxt – 5	Metagranitoide	-	-	352	9	71.8	2.9
Pxt – 7	Metagranitoide	-	-	347	9	28.6	1.7
Pxt – 8	Metagranitoide	357	24	-	-	-	-
Pxt – 9b	Metagranitoide	465	3	358	11	57.5	3.4
Pxt – 10	Pegmatita foliada	462	3	-	-	-	-
Pxt – 11	Metagranitoide	469	3	366	19	53.4	3.5

Por otra parte, la edad de intersección superior de 1274 ± 25 Ma, es interpretada por algunos autores como Ortega-Gutiérrez et al. (1999) como herencia de Pb radiogénico Grenvilliana en los núcleos de los zircones.

6.3. Metamorfismo de retrogresión de los Granitoides Esperanza (GE)

Con los datos obtenidos a partir del análisis petrográfico de láminas delgadas, se pudo establecer dos eventos metamórficos: el primero (M1) asociado con facies eclogita (alta presión) y un segundo evento metamórfico de retrogresión (M2) en facies anfibolita a anfibolita–epidota (presión y temperaturas intermedias). Una de las características principales de los apatitos metamórficos, se centra en el contenido de halógenos y el comportamiento de los elementos de REE (Puchelt y Emmermann, 1976; Spear y Pyle, 2002).

Los granos de apatito analizados exhiben bajos contenidos de Y, anomalías de Eu negativas y relaciones de Th/U bajas (<1) y en algunos subgrupos se muestran patrones de enriquecimiento en tierras raras pesadas y anomalías positivas de Sr (Figura 26, patrones de línea gruesa y color más oscuro), característico de rocas con metamorfismo de bajo a medio grado (Bea y Montero, 1999; Henrichs et al., 2018, 2019; Nutman, 2007), lo que concuerda con apatitos de facies anfibolita de ortogneis (Figura 26, línea roja discontinua).

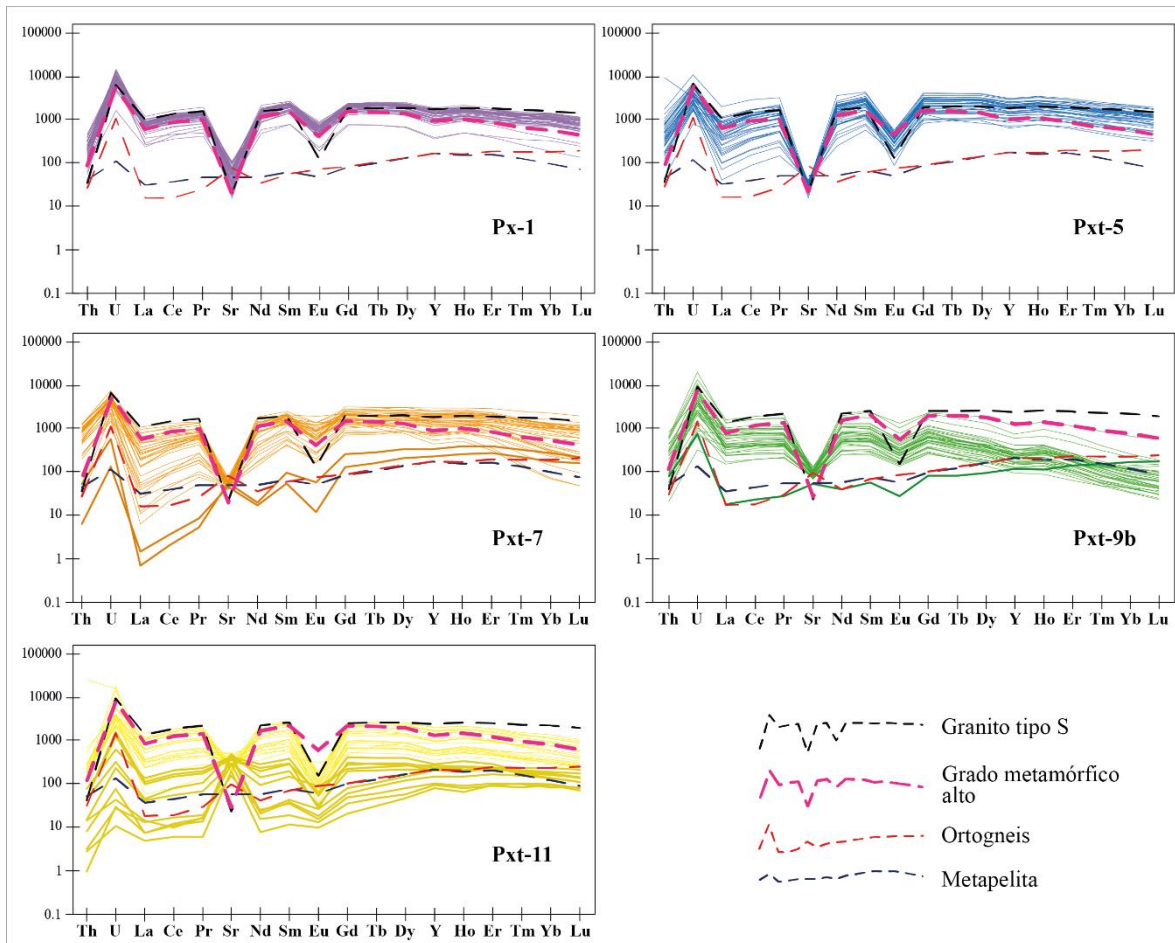


Figura 26. Diagramas multielemental normalizados a condrito (McDonough y Sun, 1995) REY (tierras raras e itrio)+ Sr + Th + U de los apatitos correspondientes a las muestras de la unidad GE. Las líneas discontinuas corresponden a los valores promedio de apatitos de muestras conocidas en diferentes facies litológicas. Granito tipo “S” (Sha y Chappell, 1999), Alto grado metamórfico (Henrichs et al., 2018; Nutman, 2007), Ortogneis y Metapelita (Henrichs et al., 2018).

Para los apatitos de rocas de alto grado metamórfico (facies anfibolitas superiores a granulitas y migmatitas) presentan abundancias altas en REE y elementos actínidos en comparación con los apatitos de rocas de menor grado metamórfico; sin embargo, si se comparan las características químicas de los apatitos de alto grado metamórfico con los apatitos de granitoides tipo “S”, estas son muy similares (O’Sullivan et al., 2020). Ya que los GE se pueden clasificar como rocas graníticas tipo “S” y que a su vez, han tenido metamorfismo de grado medio a alto (Ortega-Gutiérrez et al., 1999; Reyes-Salas, 2003; Vega-Granillo et al., 2007), se pueden distinguir características químicas típicas de los apatitos de granitos tipo “S”, como altas abundancias y patrones aplanados en los elementos de REE, con anomalías

de Eu negativas ([Figura 26](#), patrones de línea delgada y tono claro). No obstante, el empobrecimiento de elementos de tierras raras pesadas, anomalías más pequeñas de Eu y las leves anomalías negativas de Y, muestran un mejor ajuste con la línea de referencia para rocas metamórficas de alto grado ([Figura 26](#), línea fucsia discontinua).

El contenido de Cl (porcentaje en peso) para los apatitos presentes en las muestras recolectadas en este estudio, oscila entre 0.007 y 0.14%. El contenido de Cl se reduce con el aumento de grado de metamorfismo ([Spear y Pyle, 2002](#); [Nutman, 2007](#)); es decir que, en rocas de medio a alto grado metamórfico (facies anfibolita a granulita) se encuentran predominantemente fluorapatitos con muy baja presencia de Cl, tal y como lo evidencian los apatitos recolectados en las muestras de augengneis de la unidad GE. Por consiguiente, los valores muy bajos de Cl en los apatitos de las muestras de la unidad GE se interpretan como consecuencia del aumento del grado metamórfico (facies eclogita, anfibolita).

De acuerdo al esquema de categorización de máquinas de vectores de soporte (SVM) propuesto por [O'Sullivan et al. \(2020\)](#), los granos de apatito analizados para las muestras correspondientes a la unidad GE abarcan los campos de rocas de alto grado metamórfico y de grado medio a bajo, como las facies anfibolita–epidota ([Figura 27](#)); por lo que se descarta la presencia de apatitos que concuerden con características del protolito. Esto último puede deberse a que los cristales de apatito presentes previos al metamorfismo de alto grado, fueron consumidos o sobreimpresos durante el evento metamórfico ([O'Sullivan et al., 2020](#)), es decir, que sus características químicas fueron alteradas durante los eventos metamórficos posteriores.

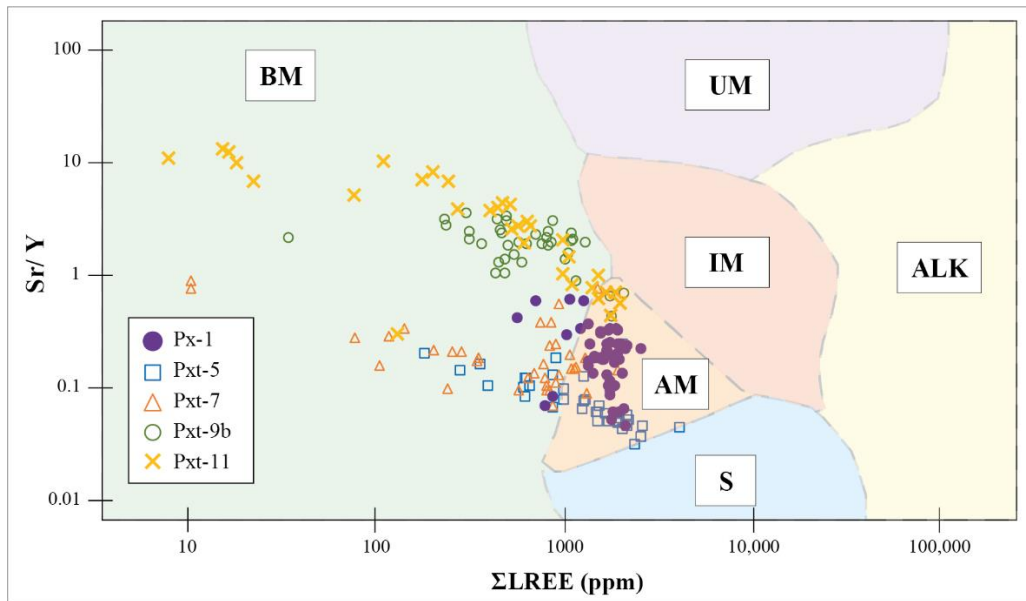


Figura 27. Esquema de categorización de máquina de vectores (SVM) de O’Sullivan et al. (2020) para la clasificación de granos de apatitos de las muestras de la unidad GE mediante la relación Sr/Y vs Σ LREE (Las abreviaciones para los grupos son: BM= Rocas de grado bajo a medio de metamorfismo; AM= Alto grado de metamorfismo; S= Granitoides tipo “S” y tipo I “félsicos”; UM= rocas ultramáficas que incluyen carbonatitas, piroxenitas y lherzolitas; IM= Granitoides máficos tipo I y rocas ígneas máficas; ALK= Rocas ígneas ricas en álcalis).

Las edades determinadas mediante geocronología U–Pb en apatito en cada una de las muestras, presentan un único ajuste en una línea de discordia (Figura 18), lo que implica que todos los granos analizados representan el mismo evento para cada una de las muestras. En rocas metamórficas las edades U–Pb en apatito, pueden reflejar el reordenamiento de la red cristalina (Dodson, 1973), cuya temperatura de cierre (T_c) oscila entre el rango de 450–550 °C (Chamberlain y Bowring, 2001); dicho rango de temperatura traslapa con el evento metamórfico M2 establecido por Reyes-Salas (2003), en facies anfibolita a anfibolita–epidota (grado medio de metamorfismo), como la mayor parte de los granos de apatito analizados en este estudio.

Las edades definidas en este estudio que se encuentran dentro del rango de 333 a 366 Ma coinciden con los datos reportados por Vega-Granillo et al. (2007) en la *suite* Esperanza, mediante Ar–Ar en fengita de ca. 346 Ma ($T_c \sim 400\text{--}300^\circ\text{C}$) asociado a eventos de exhumación por cabalgamiento sobre la *suite* Xayacatlán en la región de Santa Cruz Organal (Estado de Puebla). Otros datos para el Complejo Acatlán han sido reportados mediante Ar–Ar en hornblenda en metabasita de la *suite* Piaxtla de 373 ± 32 Ma (Galaz et al., 2013), Ar–

Ar en hornblenda de ca. 340 Ma en la *suite* Ixcamilpa en la región de Olinalá (Ramos-Arias et al., 2011) y edades más jóvenes entre 320 y 316 Ma de Ar–Ar en micas, asociadas a un evento de deformación de alta presión y temperatura en ambiente de subducción (Vega-Granillo et al., 2009; Ramos-Arias et al., 2011; Galaz et al., 2013).

6.4. Exhumación de los Granitoides Esperanza (GE) durante la Orogenia Mexicana

Los estudios termocronológicos permiten la extracción acerca de la historia termal de la roca, no obstante, en los casos donde se implican rocas de basamento cristalino exhumadas y erosionadas, la termocronología puede proveer información relacionada con la cuantificación de la temporalidad del proceso de exhumación (Braun et al., 2006).

Las edades encontradas mediante el método de trazas de fisión en las muestras de roca correspondientes a la unidad GE varían en un rango de 28 a 72 Ma (Figura 22, Tabla 2); sin embargo, los resultados pueden ser divididos en tres grupos: Maastrichtiano (72–69 Ma), Paleoceno tardío–Eoceno temprano (57–53 Ma) y Oligoceno (ca. 29 Ma), donde cada grupo indica un evento de enfriamiento. A su vez, la distribución de las mediciones de longitudes de traza para las muestras Px – 1 (69.3 ± 1.1) y Pxt – 9b (57.5 ± 3.4), se caracteriza por un solo valor pico, a pesar de que las edades no coinciden en el mismo grupo (Tabla 3; Figura 28).

Tabla 3. Datos de longitudes media de trazas de fisión, edad y prueba de Chi-cuadrado, correspondientes a las muestras con modelos de historia termal

Muestra	P (χ^2)	Edad Central	Longitud media de trazas	Grupo
Px - 1	32%	69.3 ± 1.1	12.81 ± 1.48	Cretácico (Maastrichtiano)
Pxt - 9b	13%	57.5 ± 3.4	13.07 ± 1.35	Paleoceno tardío (Thanetiense)

Los modelos de historia termal realizados para las muestras Px-1 y Pxt-9b (Figura 28) basados en el ajuste de las trayectorias de tiempo–Temperatura (t–T; Ketcham, 2005), presentan que la muestra Px – 1 experimentó una fase de enfriamiento rápido entre los ca. 92 a ca. 70 Ma que llevó a la muestra de una temperatura de ca.120 a 70°C, con una tasa de aproximadamente $2.3 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{Ma}^{-1}$ para este intervalo de tiempo (Figura 28a).

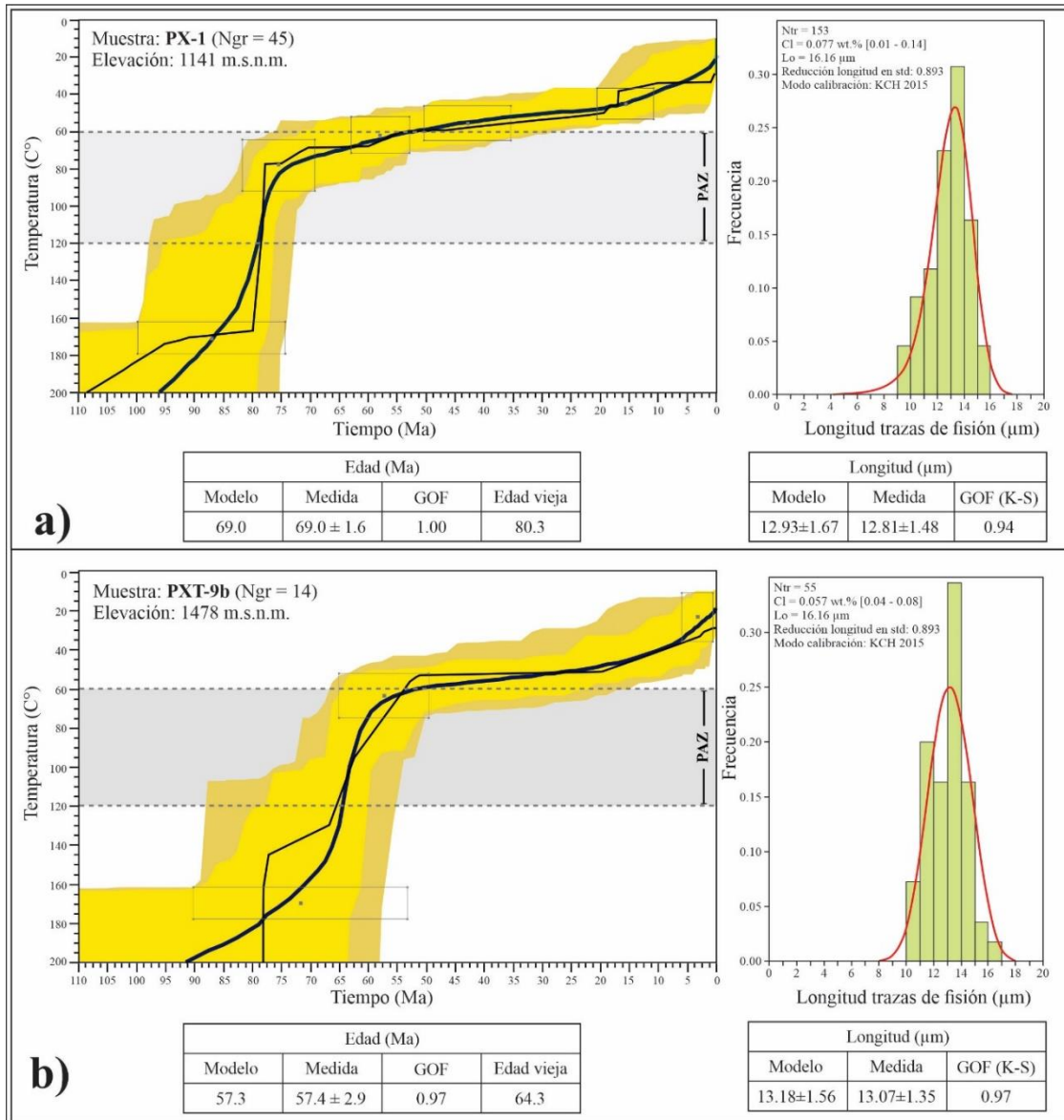


Figura 28. Modelos termales $t - T$ basados en longitudes y edades de trazas de fisión de las muestras Px – 1 **(a)** y Pxt – 9b **(b)** de la unidad GE. La línea de color azul indica el valor promedio ponderado por el GOF de todos los pasos y, la negra, el “best fit model”.

La muestra Pxt – 9b sufrió un enfriamiento rápido entre los ca. 80 y 45 Ma, ya que pasó de temperaturas alrededor de los 120 a 60°C a razón de aproximadamente $1.8^{\circ}\text{C} \cdot \text{Ma}^{-1}$; estos modelos son válidos únicamente para la zona de borrado parcial (PAZ).

La época del Cretácico a la transición Cretácico–Paleógeno en México se encuentra caracterizada por una fase importante de deformación generalizada y asociada con procesos tectónicos del sur del cratón Norteamericano, como lo son las orogénias Sevier y Laramide

(Fitz-Díaz et al., 2014; Fitz-Díaz et al., 2018); donde el evento Laramídico se asocia a episodios de acortamiento en la Sierra Madre del Sur (Sedlock et al., 1993; Nieto-Samaniego et al., 2006; Cerca et al., 2007). Esta fase orogénica del Cretácico – Paleógeno se ha definido como Orogenia Mexicana, para el sistema cordillerano de México desde Sonora hasta el sur de Oaxaca (Fitz-Díaz et al., 2018).

El primer rango de edades del Cretácico tardío (Maastrichtiano, ca. 72 – 69 Ma) dado por las muestras Pxt – 5 y Px – 1, se relacionan con el primer evento asociado a la deformación por acortamiento de la Orogenia Mexicana; ya que, el desarrollo de sistemas de cabalgamiento es un ambiente tectónico propicio para la erosión y exhumación de bloques. Este evento es definido en el Cretácico tardío hacia la plataforma Guerrero – Morelos (Cerca et al., 2007; Fitz-Díaz et al., 2018; Nieto-Samaniego et al., 2006), el cual es el límite oeste de la zona de estudio y para el bloque Acatlán – Oaxaca (Nieto-Samaniego et al., 2006). El modelo térmico de la muestra Px – 1, permite inferir que el evento de exhumación pudo comenzar alrededor de los 80 Ma, marcado por el límite de los 120°C de la zona de borrado parcial (PAZ), ya que esta muestra se localiza sobre el bloque levantado (Figura 29).

El grupo de muestras Pxt – 9b y Pxt – 11 de edades por TFA entre ca. 57 y 53 Ma, se puede interpretar como la continuación del anterior evento de deformación, en una segunda etapa, de acuerdo con lo descrito por Nieto-Samaniego et al. (2006); éste se caracteriza por el inicio del fallamiento en rumbo o reactivación del mismo, sin que el acortamiento se detenga. Si se consideran los resultados del modelo térmico de la muestra Pxt – 9b y que en la zona de estudio la estructura principal es la Falla de Tetla-Quicayán, definida como una falla principalmente de rumbo; esta fase podría acotarse para la zona de estudio entre ca. 65 y 50 Ma, con una posible actividad relacionada a la Falla Tetla-Quicayán o bien, con un aumento en la actividad tectónica compresiva. La exhumación de la muestra Pxt – 9b vista en el modelo térmico (Figura 28b), se relaciona por tiempo con el primer evento descrito para la muestra Px – 1.

La cercanía de las muestras analizadas por el método de trazas de fisión a la Falla de Tetla-Quicayán, junto con fallas locales (Figura 29), permite relacionar las edades obtenidas con la actividad tectónica de estas estructuras durante finales del Cretácico y el Cenozoico.

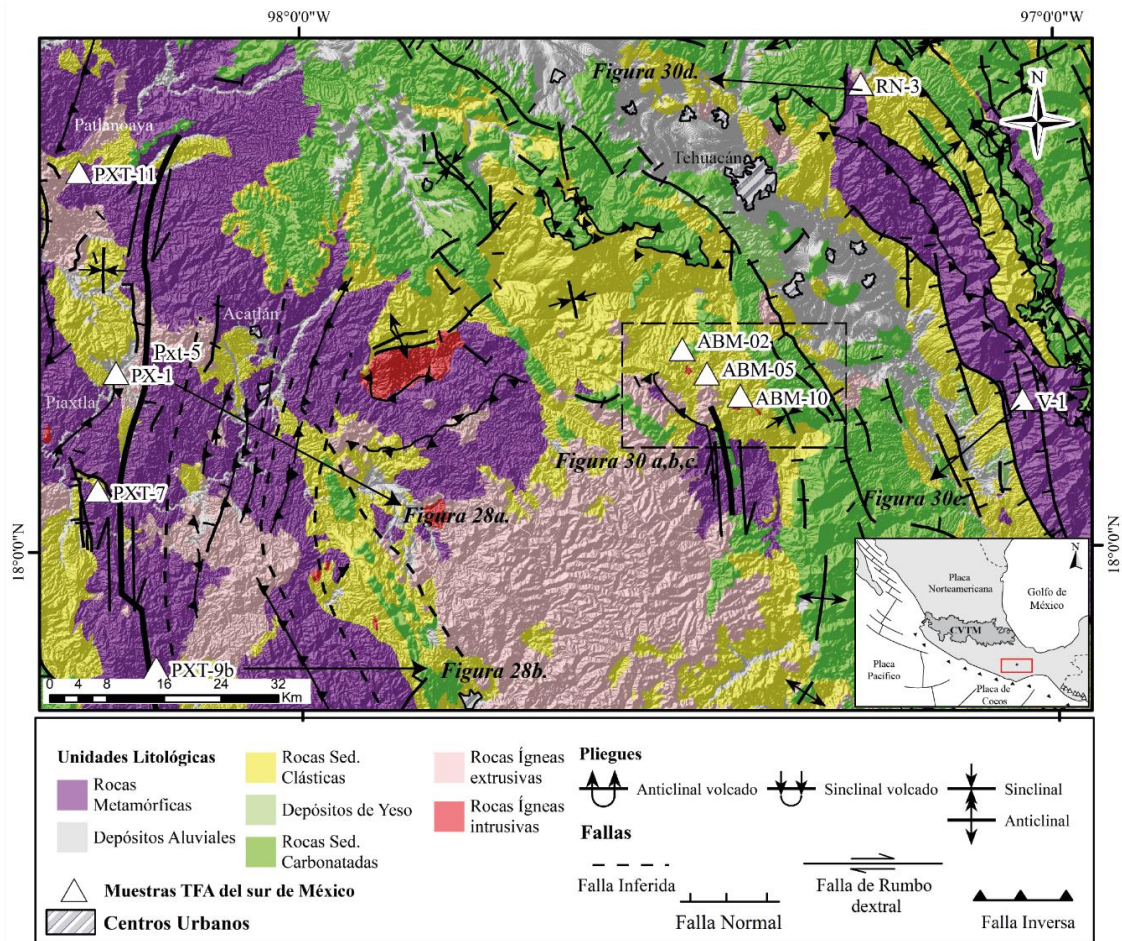


Figura 29. Mapa regional del bloque Acatlán – Oaxaca donde se resaltan las muestras reportadas con edades de TFA hacia el este, en la región de Piaxtla (este estudio); la región central, en cercanías de la población de Caltepec (Muestras ABM-02, 05, 10; [Bedoya Mejía, 2018](#)); hacia el oeste en la región de Tehuacán (Muestras RN-3, V-1; [Milián, 2019](#)). Modificado de [Ortega-Gutiérrez et al. \(2018\)](#) y [Servicio Geológico Mexicano, \(1998b, 1998a, 2000, 2001\)](#).

La edad más joven obtenida pertenece a la muestra Pxt – 7 de ~29 Ma (Oligoceno), la cual se encuentra en medio de dos fallas normales cartografiadas por el Servicio Geológico Mexicano (carta E14-5 Cuernavaca, [Figura 29](#)) entre las poblaciones de Tecmatlán y Quicayán, lo que puede indicar el inicio de una etapa de extensión local en esta área. Por otra parte, esto sería característico de la última etapa de deformación entre el Oligoceno–Mioceno, donde es más fuerte la actividad de las fallas producto de extensión cortical y fallas de desplazamiento lateral ([Nieto-Samaniego et al., 2006](#)); sin embargo, dada la baja densidad de trazas confinadas en los granos de apatito, no se pudo realizar la medición de longitudes para la construcción de un modelo t–T, por lo que no es posible afirmar y caracterizar este evento local hacia el oeste de la Sierra Madre del Sur.

Si se comparan los datos obtenidos en este trabajo, con los reportados por [Bedoya Mejía \(2018\)](#) y [Milián \(2019\)](#), se puede observar cómo las muestras del oeste (Muestras Px – 1, Pxt – 5b, 7, 9b y 11) y los modelos térmicos de las mismas ([Figura 28](#)), exhiben edades más antiguas que las reportadas hacia el área de Caltepec (muestras AMB-02,05,10) y a su vez, estos dos grupos son más antiguos que las edades encontradas hacia la región de Tehuacán (RN-3, VN-1) hacia el este ([Figura 29](#) y [Figura 30a-e](#)).

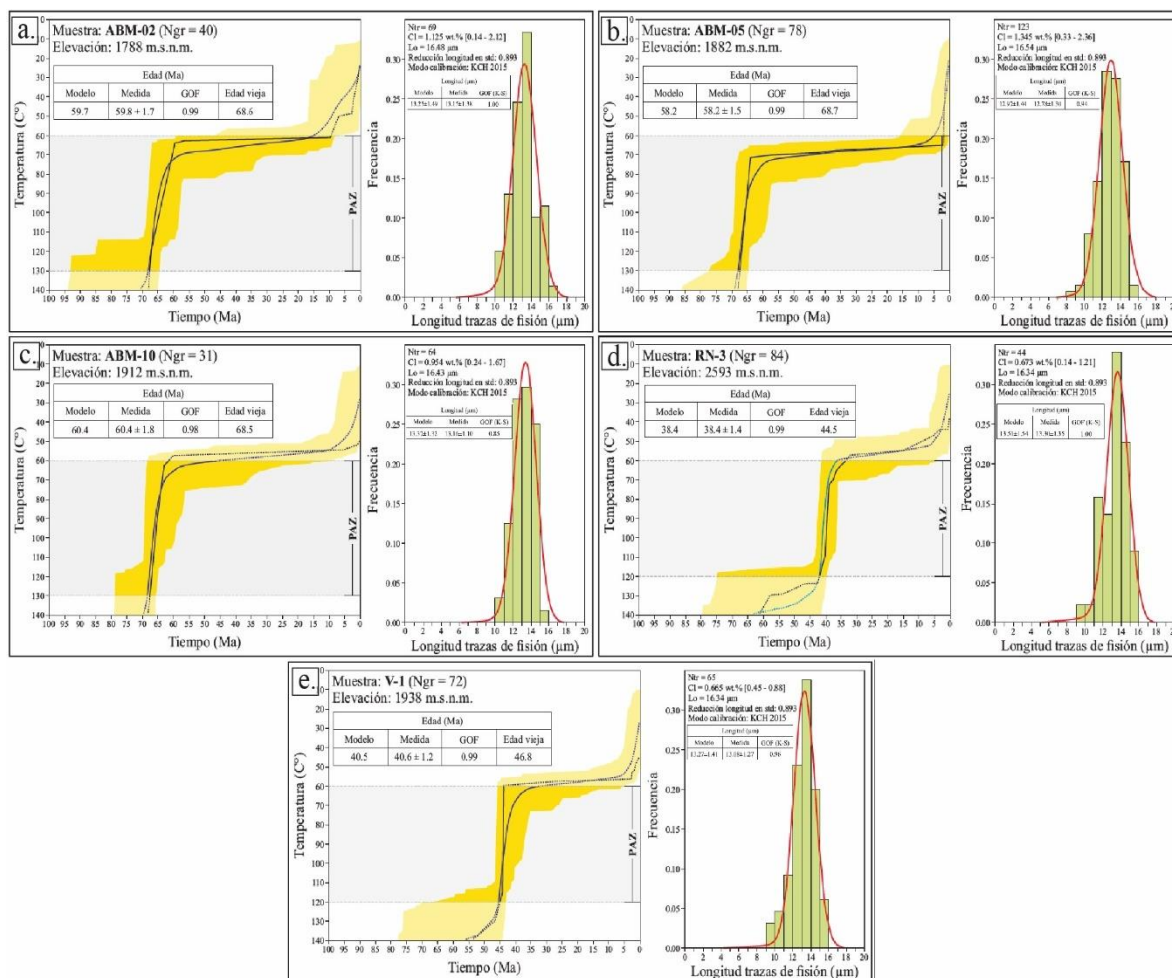


Figura 30. Modelos termales t-T, **a)** Muestra ABM-02, **b)** Muestra ABM-05, **c)** Muestra ABM-10 ([Bedoya Mejía, 2018](#)); **d)** Muestra RN-3, **e)** Muestra V-1 ([Milián, 2019](#)).

[Nieto-Samaniego et al. \(2006\)](#) proponen una migración de la deformación desde el oeste hacia el este ([Figura 31a, b](#)), donde cada una de las tres fases descritas en la evolución del sur de México desde el Maastrichtiano hasta el Mioceno, presenta un régimen característico que va migrando en sentido W-E, el cual empieza con el cese de la depositación marina en la Plataforma Guerrero – Morelos, antes del Bartoniano en el Bloque Acatlán – Oaxaca y

finaliza con el fallamiento normal a lo largo del límite este del bloque y hacia la cuenca de Veracruz en el Eoceno medio.

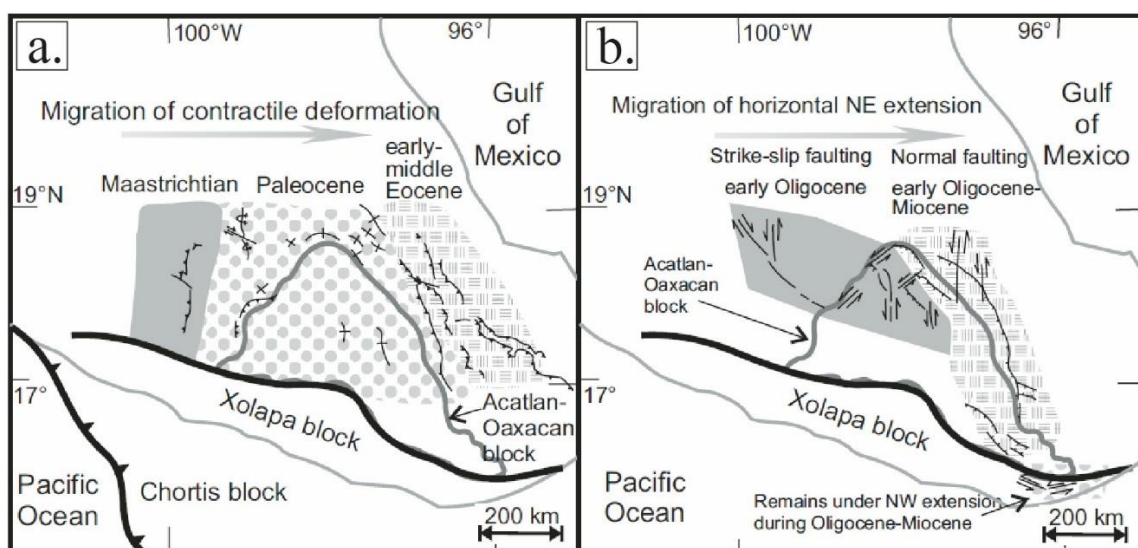


Figura 31. Modelos de migración de la deformación en la Sierra Madre del Sur **a)** Deformación por contracción **b)** Extensión horizontal NE, modificado de Nieto-Samaniego et al. (2006).

Las tasas de enfriamiento aumentan de oeste hacia el este (Figura 30), donde en la región de Piaxtla y Mariscala de Juárez se tienen tasas alrededor de 2 y 4 °C.Ma⁻¹ aproximadamente (este estudio); mientras que en la región de Tehuacán las tasas de enfriamiento son de aproximadamente 9 °C.Ma⁻¹ (Milián, 2019), donde estas últimas son asociadas a las fases de deformación de la Orogenia Mexicana. Esto puede indicar que, con la migración de la deformación aumento su intensidad, produciendo una actividad tectónica más acelerada y con mayor presencia de estructuras al este (Figura 29).

6.5. Evolución de los Granitoides Esperanza (GE)

Como se ha establecido anteriormente, la unidad GE hace parte de la *suite* de rocas de alta presión del Complejo Acatlán, por ende, su evolución se encuentra estrictamente ligada a todo el Complejo. Para este complejo, después del Precámbrico, se tienen identificados cuatro grandes etapas sucesivas de convergencia y colisión durante el Paleozoico, donde al menos tres de estas generaron ensamblajes de alta presión (Vega-Granillo et al., 2009, 2007). Los primeros eventos se encuentran relacionados a las rocas pertenecientes a las *suites* Xayacatlán, el Rodeo e Ixcamilpa (Vega-Granillo et al., 2009, 2007). A continuación, se

describen los eventos tectónicos relacionados con la evolución de la unidad GE, de acuerdo con los resultados obtenidos en este estudio y los reportados en otros trabajos:

1. Con los datos obtenidos mediante U–Pb en zircón en este estudio, se determina que la intrusión de cuerpos graníticos a las *suites* Xayacatlán y El Rodeo (Reyes-Salas, 2003; Sánchez-Zavala et al., 2004; Vega-Granillo et al., 2007, 2009), donde estos cuerpos también asocian diques máficos y pulsos pegmatíticos, ocurre en el Ordovícico Temprano–Medio entre los 472 y 462 Ma.
2. Posteriormente, estos cuerpos graníticos subdujeron a profundidades aproximadas de 60 km, en un ambiente de subducción continental (Vega-Granillo et al., 2007, 2009), donde se encontraron en condiciones de altas temperaturas y presiones (638–748°C y 13.7–17 Kbares, respectivamente; Reyes-Salas, 2003; Vega-Granillo et al., 2007) durante el Silúrico medio a Devónico Tardío desde los 430 a 410 Ma (Ortega-Gutiérrez et al., 1999, intercepta inferior U–Pb en zircón en este estudio).
3. El inicio de la exhumación de la unidad GE se asocia con el segundo evento metamórfico (retrogresión) en facies anfibolita a anfibolita–epidota en condiciones de temperatura entre 450–550 °C y presiones inferiores a 12 kilobares (Reyes-Salas, 2003), durante el Devónico Tardío al Misisípico (333–366 Ma, U–Pb en apatito en este estudio).
4. Los Granitoides Esperanza son yuxtapuestos tectónicamente por rocas con metamorfismo de alto grado y bajo grado, tales como las Formaciones Tecomate, Cosoltepec, entre otras (Ortega-Gutiérrez, 1978; Ortega-Gutiérrez et al., 2018; Ramírez-Espinoza, 2001; Reyes-Salas, 2003).
5. Posteriormente la erosión, exhumación y enfriamiento de estas rocas se vio relacionada con el cabalgamiento del bloque de las *suites* de alta presión (Xayacatlán, Ixcamilpa, Esperanza y El Rodeo) sobre la Formación Cosoltepec. Algunos datos reportados ubican este evento en el Misisípico–Pensilvánico, entre los 317–329 Ma (Vega-Granillo et al., 2009; Ramos-Arias et al., 2011; Galaz et al., 2013).
6. Durante el Pérmico ocurre un evento de deformación de tipo dextral que borró gran parte de los contactos entre las rocas de alta presión y las de bajo de grado (Galaz et al., 2013).

7. Para finales del Cretácico (ca. 69–72 Ma) se tienen los inicios de la fase de acortamiento asociado a la Orogenia Mexicana en la Sierra Madre del Sur; donde las rocas que no estaban expuestas comenzaron su exhumación por la actividad tectónica, que a su vez favoreció la erosión de las unidades estratigráficamente superiores. Hacia el Oligoceno (~29 Ma) la actividad tectónica local fue principalmente extensiva.

7. CONCLUSIONES

- La unidad Granitoides Esperanza se clasifica de acuerdo con sus características petrográficas en facies anfibolita–epidota, con microestructuras que permiten establecer condiciones de estabilidad a temperaturas entre los 450 y 600°C. A su vez, presentan asociaciones mineralógicas y algunas microestructuras propias de condiciones de alta temperatura, que son comparables con las ya establecidas por otros autores como típicas de facies eclogita.
- Se encontraron evidencias de un evento metamórfico prógrado en facie eclogita (M1) y un evento metamórfico de retrogresión en facie anfibolita–epidota (M2).
- Mediante la datación por U–Pb en zircón, se encontró que la unidad Granitoides Esperanza presenta herencias ca. 1000–1200 Ma (edades de los núcleos de los cristales y de intercepto superior de la línea de discordia). Los últimos sobrecrecimientos en los cristales datan entre los 461 y 472 Ma, lo que define el evento magmático que se asocia a la edad de cristalización del protolito de los Granitoides Esperanza en el Ordovícico Medio.
- Se encontraron los primeros datos de U–Pb en zircón relacionados con la cristalización de las pegmatitas que conforman los Granitoides Esperanza (ca. 462 Ma), que permiten afirmar que los pulsos graníticos de los augengneises asociaron pulsos pegmatíticos hacia la región de Mariscal de Juárez, durante su emplazamiento en el Complejo Acatlán.
- Para dos de las muestras analizadas por el método U–Pb en zircón en los augengneises, se encontraron interceptas inferiores de ca. 413 y 416 Ma, que coinciden con las edades del primer evento metamórfico (M1) mediante mediciones Ar–Ar en hornblenda y U–Pb en monacita reportados en otros trabajos, durante el Silúrico medio y Devónico Tardío (ca. 430–410 Ma).
- La firma química que presentan los granos de apatitos de las muestras analizadas, permite afirmar que los Granitoides Esperanza pasaron por facies de alto grado metamórfico y posteriormente, por facies de medio grado metamórfico. Este último se asocia al evento de retrogresión en facies anfibolita–epidota; ya que, con el evento de

alto grado se borra la mayor parte de la firma previa existente, tanto del protolito y condiciones de cristalización, como las facies progradadas del metamorfismo.

- Las edades obtenidas por el sistema U–Pb en apatito con una $T_c = 450\text{--}550^\circ\text{C}$ y las firmas químicas de los granos, se relacionan con el evento metamórfico de retrogresión por descompresión en facies anfibolita–epidota; el cual, tuvo lugar durante el Devónico Tardío (Farmiense) y el Carbonífero (Misisípico), entre los 333 y 366 Ma.
- Los apatitos seleccionados para el análisis de trazas de fisión exhiben tres grupos de edades diferentes: Maastrichtiano (72–69 Ma), Paleoceno tardío–Eoceno temprano (57–53 Ma) y Oligoceno (ca. 29 Ma); donde cada grupo es asociado a las etapas de deformación por acortamiento, transpresión y extensión de la Sierra Madre del Sur.
- Los modelos termales $t\text{--}T$ exhiben tasas de enfriamiento aproximadas de $2.3^\circ\text{C}\cdot\text{Ma}^{-1}$ hacia la región de Piaxtla y $1.8^\circ\text{C}\cdot\text{Ma}^{-1}$ en la región de Mariscal de Juárez, las cuales son más bajas que las encontradas en la región de Tehuacán hacia el este ($\sim 9^\circ\text{C}\cdot\text{Ma}^{-1}$); lo que indica un aumento en las tasas de enfriamiento en el mismo sentido que la migración de la deformación cenozoica propuesta para la Sierra Madre del Sur.
- En total se encontraron cuatro eventos tectonotermales mediante las técnicas implementadas que corresponden a: la edad de cristalización del protolito de los GE (461 y 472 Ma), metamorfismo en facies eclogitas (410–430 Ma), segundo evento metamórfico de retrogresión en facies anfibolita–epidota (333 y 366 Ma) y la exhumación de estas rocas desde el Cretácico tardío al Cenozoico (80–53 Ma).

REFERENCIAS

- Abdullin, F., Solari, L., Ortega-Obregón, C., & Solé, J. (2018). New fission-track results from the northern Chiapas Massif area, SE Mexico: Trying to reconstruct its complex thermo-tectonic history. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 35(1), 79–92. <https://doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2018.1.523>
- Alaniz-Alvarez, S. ., Nieto-Samaniego, A. ., & Ortega-Gutiérrez, F. (1994). Structural evolution of the Sierra de Juarez Mylonitic complex, State of Oaxaca, Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 11(2), 147–156.
- Altenberger, U. (1995). Local disequilibrium of plagioclase in high-temperature shear zones of the Ivrea Zone, Italy. *Journal of Metamorphic Geology*, 13(5), 553–558.
- Ángeles-Moreno, E. (2006). *Petrografía, geología estructural y geocronología del borde noroccidental del terreno Cuicateco, Sierra Mazateca, estado de Oaxaca, México*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Barker, A. J. (1990). Introduction to Metamorphic Textures and Microstructures. En *Mineralogical Magazine*. <https://doi.org/10.1180/minmag.1999.063.4.02>
- Bea, F., & Montero, P. (1999). Behavior of accessory phases and redistribution of Zr, REE, Y, Th, and U during metamorphism and partial melting of metapelites in the lower crust: An example from the Kinzigite Formation of Ivrea-Verbano, NW Italy. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(7–8), 1133–1153. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(98\)00292-0](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(98)00292-0)
- Bedoya Mejía, A. (2018). *Análisis de procedencia y termocronología detrítica de las Formaciones Matzitzi y Tianguistengo: implicaciones tectónicas en la evolución Paleozoica-Mesozoica del sur de México*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Boskurt, E., & Park, R. . (1997). Microstructures of deformed grains in the augen gneisses of southern Menderes Massif (western Turkey) and their tectonic significance. *Geologische Rundschau*, 86, 103–119.
- Braun, J., Van Der Beek, P., & Batt, G. (2006). Quantitative Thermochronology. Numerical methods for the Interpretation of Thermochronological Data. En *Cambridge University Press* (Vol. 1).
- Campa, M. F., & Coney, P. J. (1983). Tectono-stratigraphic terranes and mineral resource distributions in Mexico. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 20(6), 1040–1051. <https://doi.org/10.1139/e83-094>
- Centeno-García, E. (2017). Mesozoic tectono-magmatic evolution of Mexico: An overview. *Ore Geology Reviews*, 81, 1035–1052. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.10.010>
- Centeno-García, E., Corona-Chávez, P., Talavera-Mendoza, O., & Iriondo, A. (2003). Geology and tectonic evolution of the western Guerrero Tarrane- A transect from Puerto Vallarta to Zihuatanejo, Mexico. *Geologic transects across Cordillera Mexico Guide Book for the field trip of the 99th Geological Society of America Cordilleran Section Annual Meeting*, 201–228.

- Centeno-García, E., Lomnitz, C., & Ramírez-Espinosa, J. (2000). Geologic evolution of the Guerrero Terrane, western Mexico. *Journal of South American Earth Science (special issue)*, *13*, 293–476.
- Centeno-García, E., Mendoza-Rosales, C. C., & Silva-Romo, G. (2009). Sedimentología de la Formación Matzitzi (Paleozoico superior) y significado de sus componentes volcánicos, región de Los Reyes Metzontla-san Luis Atolotitlán, Estado de Puebla. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, *26*(1), 18–36.
- Centeno-García, E., Ruis, J., Coney, P. J., Patchett, P. J., & Ortega-Gutierrez, F. (1993). Guerrero terrane of Mexico: its role in the southern Cordillera from new geochemical data. *Geology*, *21*(5), 419–422. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1993\)021<0419:GTOMIR>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1993)021<0419:GTOMIR>2.3.CO;2)
- Cerca, M., Ferrari, L., López-Martínez, M., Martiny, B., & Iriondo, A. (2007). Late Cretaceous shortening and early Tertiary shearing in the central Sierra Madre del Sur, southern Mexico: Insights into the evolution of the Caribbean-North American plate interaction. *Tectonics*, *26*(3). <https://doi.org/10.1029/2006TC001981>
- Chamberlain, K. R., & Bowring, S. A. (2000). Apatite – feldspar U – Pb thermochronometer : a reliable , mid-range (~450°C), diffusion-controlled system. *Chemical Geology*, *172*, 173–200.
- Chew, D. M., Petrus, J. A., & Kamber, B. S. (2014). U-Pb LA-ICPMS dating using accessory mineral standards with variable common Pb. *Chemical Geology*, *363*, 185–199. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2013.11.006>
- Chew, David M., Sylvester, P. J., & Tubrett, M. N. (2011). U-Pb and Th-Pb dating of apatite by LA-ICPMS. *Chemical Geology*, *280*(1–2), 200–216. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2010.11.010>
- Chew, David M., & Donelick, R. A. (2012). Combined apatite fission track and U–Pb dating by LA–ICP–MS and its application in apatite provenance analysis. *Mineralogical Association of Canada Short Course*, *42*(May), 219–247.
- Cochrane, R., Spikings, R. A., Chew, D., Wotzlaw, J. F., Chiaradia, M., Tyrrell, S., ... Van der Lelij, R. (2014). High temperature (>350°C) thermochronology and mechanisms of Pb loss in apatite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, *127*, 39–56. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2013.11.028>
- Deer, W. A., Howie, R. A., & Zussman, J. (2013). *Rock-Forming Minerals and other Mineralogy Publications* (third). United Kingdom, London: The Mineralogical Society.
- Delgado-Argote, L. . (1988). Geología preliminar de la secuencia volcanosedimentaria y serpentinitas asociadas del Jurásico (?) del área de Cuicatlán-Concepción Pápalo, Oaxaca. *Revista del Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México*, *7*(2), 125–127.
- Delgado-Argote, L. A., Lopez-Martinez, M., York, D., & Hall, C. M. (1992). Geologic framework and geochronology of ultramafic complexes of southern Mexico. *Canadian Journal of Earth Sciences*, *29*(7), 1590–1604. <https://doi.org/10.1139/e92-125>

- Dickinson, W. R., & Lawton, T. F. (2001). Carboniferous to Cretaceous assembly and fragmentation of Mexico. *Bulletin of the Geological Society of America*, 113(9), 1142–1160. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(2001\)113<1142:CTCAAF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(2001)113<1142:CTCAAF>2.0.CO;2)
- Dodson, M. H. (1973). Closure temperature in cooling geochronological and petrological systems. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 40(3), 259–274. <https://doi.org/10.1007/BF00373790>
- Donelick, R. A., O’Sullivan, P. B., & Ketcham, R. A. (2005). Apatite fission-track analysis. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 58, 49–94. <https://doi.org/10.2138/rmg.2005.58.3>
- Elías-Herrera, M., Ortega-Gutiérrez, F., Sánchez-Zavala, J. L., Macías-Romo, C., Ortega-Rivera, A., & Iriando, A. (2005). La falla de Caltepec: raíces expuestas de una frontera tectónica de larga vida entre dos terrenos continentales del sur de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 57(1), 83–109. <https://doi.org/10.18268/bsgm2005v57n1a5>
- Fitz-Díaz, E., Hudleston, P., Tolson, G., & Van Der Pluijm, B. (2014). Progressive, episodic deformation in the Mexican Fold-Thrust Belt (central Mexico): Evidence from isotopic dating of folds and faults. *International Geology Review*, 56(6), 734–755. <https://doi.org/10.1080/00206814.2014.896228>
- Fitz-Díaz, E., Lawton, T. F., Juárez-Arriaga, E., & Chávez-Cabello, G. (2018). The Cretaceous-Paleogene Mexican orogen: Structure, basin development, magmatism and tectonics. *Earth-Science Reviews*, 183, 56–84. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.03.002>
- Fleischer, R. L., Price, P. B., & Walker, R. M. (1975). Nuclear tracks in solids : principles and applications. *Berkeley, California, University of California Press*, 626.
- Freydier, C., Lapierre, H., Ruiz, J., Tardy, M., Martinez-R, J., & Coulon, C. (2000). The Early Cretaceous Arperos basin: An oceanic domain dividing the Guerrero arc from nuclear Mexico evidenced by the geochemistry of the lavas and sediments. *Journal of South American Earth Sciences*, 13(4–5), 325–336. [https://doi.org/10.1016/S0895-9811\(00\)00027-4](https://doi.org/10.1016/S0895-9811(00)00027-4)
- Galaz E., G., Keppie, J. D., Lee, J. K. W., & Ortega-Rivera, A. (2013). A high-pressure folded klippe at Tehuizingo on the western margin of an extrusion zone, Acatlán Complex, southern México. *Gondwana Research*, 23(2), 641–660. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2012.04.011>
- Galbraith, R. F. (1981). On statistical models for fission track counts. *Journal of the International Association for Mathematical Geology*, 13(6), 471–478. <https://doi.org/10.1007/BF01034498>
- Galbraith, R. F., & Green, P. F. (1990). Estimating the component ages in a finite mixture. *International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part, 17(3)*, 197–206. [https://doi.org/10.1016/1359-0189\(90\)90035-V](https://doi.org/10.1016/1359-0189(90)90035-V)
- Galbraith, R. F., & Laslett, G. M. (1993). Statistical models for mixed fission track ages.

International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part, 21(4), 459–470. [https://doi.org/10.1016/1359-0189\(93\)90185-C](https://doi.org/10.1016/1359-0189(93)90185-C)

- Gleadow, A. J. W., Duddy, I. R., Green, P. F., & Lovering, J. F. (1986). Confined fission track lengths in apatite: a diagnostic tool for thermal history analysis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, *94(4)*, 405–415. <https://doi.org/10.1007/BF00376334>
- Green, P. F., Duddy, I. R., Gleadow, A. J. W., Tingate, P. R., & Laslett, G. M. (1986). Thermal annealing of fission tracks in apatite 1.A Qualitative Description. *Chemical Geology: Isotope Geoscience Section*, *59*, 237–253. [https://doi.org/10.1016/0168-9622\(88\)90019-X](https://doi.org/10.1016/0168-9622(88)90019-X)
- Hanmer, S. (1981). Segregation bands in plagioclase: Non-dilational quartz veins formed by strain enhanced diffusion. *Tectonophysics*, *79(3–4)*, 53–61.
- Hasebe, N., Barbarand, J., Jarvis, K., Carter, A., & Hurford, A. J. (2004). Apatite fission-track chronometry using laser ablation ICP-MS. *Chemical Geology*, *207(3–4)*, 135–145. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2004.01.007>
- Helbig, M., Keppie, J. D., Murphy, J. B., & Solari, L. A. (2012). U-Pb geochronological constraints on the Triassic-Jurassic Ayú Complex, southern Mexico: Derivation from the western margin of Pangea-A. *Gondwana Research*, *22(3–4)*, 910–927. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2012.03.004>
- Helbig, M., Keppie, J. D., Murphy, J. B., & Solari, L. A. (2013). Exotic rifted passive margin of a back-arc basin off western Pangea: Geochemical evidence from the Early Mesozoic Ayú Complex, southern Mexico. *International Geology Review*, *55(7)*, 863–881. <https://doi.org/10.1080/00206814.2012.751171>
- Henrichs, I. A., Chew, D. M., O’Sullivan, G. J., Mark, C., McKenna, C., & Guyett, P. (2019). Trace Element (Mn-Sr-Y-Th-REE) and U-Pb Isotope Systematics of Metapelitic Apatite During Progressive Greenschist- to Amphibolite-Facies Barrovian Metamorphism. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, *20(8)*, 4103–4129. <https://doi.org/10.1029/2019GC008359>
- Henrichs, Isadora Alberti, O’Sullivan, G., Chew, D. M., Mark, C., Babechuk, M. G., McKenna, C., & Emo, R. (2018). The trace element and U-Pb systematics of metamorphic apatite. *Chemical Geology*, *483(December 2017)*, 218–238. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2017.12.031>
- Holden, N. E., & Hoffman, D. C. (2000). Spontaneous fission half-lives for ground-state nuclides (Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*, *72(8)*, 1525–1562. <https://doi.org/10.1351/pac200072081525>
- Jaffey, A. H., Flynn, K. F., Glendenin, L. E., Bentley, W. C., & Essling, A. M. (1971). Precision measurement of half-lives and specific activities of U235 and U238. *Physical Review C*, *4(5)*, 1889–1906. <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.4.1889>
- Jochum, K. P., Weis, U., Stoll, B., Kuzmin, D., Yang, Q., Raczek, I., ... Enzweiler, J. (2011). Determination of reference values for NIST SRM 610-617 glasses following ISO guidelines. *Geostandards and Geoanalytical Research*, *35(4)*, 397–429.

<https://doi.org/10.1111/j.1751-908X.2011.00120.x>

- Keppie, J. Duncan. (2004). Terranes of Mexico revisited: A 1.3 billion year Odyssey. *International Geology Review*, 46(9), 765–794. <https://doi.org/10.2747/0020-6814.46.9.765>
- Keppie, J. Duncan, Dostal, J., Cameron, K. L., Solari, L. A., Ortega-Gutiérrez, F., & Lopez, R. (2003). Geochronology and geochemistry of Grenvillian igneous suites in the northern Oaxacan Complex, southern Mexico: Tectonic implications. *Precambrian Research*, 120(3–4), 365–389. [https://doi.org/10.1016/S0301-9268\(02\)00166-3](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(02)00166-3)
- Keppie, J. Duncan, Dostal, J., Ortega-Gutiérrez, F., & Lopez, R. (2001). A Grenvillian arc on the margin of Amazonia: Evidence from the southern Oaxacan Complex, southern Mexico. *Precambrian Research*, 112(3–4), 165–181. [https://doi.org/10.1016/S0301-9268\(00\)00150-9](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(00)00150-9)
- Keppie, J. Duncan, Nance, R. D., Dostal, J., Ortega-Rivera, A., Miller, B. V., Fox, D., ... Lee, J. W. K. (2004). Mid-Jurassic tectonothermal event superposed on a Paleozoic geological record in the Acatlán Complex of southern Mexico: Hotspot activity during the breakup of Pangea. *Gondwana Research*, 7(1), 238–260. [https://doi.org/10.1016/s1342-937x\(05\)70323-3](https://doi.org/10.1016/s1342-937x(05)70323-3)
- Keppie, J. Duncan, & Ortega-Gutiérrez, F. (2010). 1.3-0.9 Ga Oaxaquia (Mexico): Remnant of an arc/backarc on the northern margin of Amazonia. *Journal of South American Earth Sciences*, 29(1), 21–27. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2009.07.001>
- Keppie, J.D, Dostal, J., & Elías-Herrera, M. (2007). Ordovician–Devonian oceanic basalts in the Cosoltepec Formation, Acatlán Complex, southern México: Vestiges of the Rheic In: Linnemann, U., Nance, R.D., Kraft, P., Zulauf, G. (Eds.), The evolution of the Rheic Ocean: From Avalonian-Cadomian active margin . *Geological Society of America Special Paper*, 423, 477–487.
- Ketcham, R. A. (2005). Forward and inverse modeling of low-temperature thermochronometry data. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 58((1)), 275–314. <https://doi.org/10.2138/rmg.2005.58.11>
- Ketcham, R. A., Donelick, R. A., & Carlson, W. D. (1999). Variability of apatite fission-track annealing kinetics: II. Crystallographic orientation effects. *American Mineralogist*, 84(9), 1235–1255. <https://doi.org/10.2138/am-1999-0902>
- Kirkland, C. L., Fougereuse, D., Reddy, S. M., Hollis, J., & Saxey, D. W. (2018). Assessing the mechanisms of common Pb incorporation into titanite. *Chemical Geology*, 483(2017), 558–566. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2018.03.026>
- Kirsch, M., Keppie, J. D., Murphy, J. 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. *Bulletin of the Geological Society of America*, 124(9–10), 1607–1628. <https://doi.org/10.1130/B30649.1>
- Ludwig, K. R. (1998). On the treatment of concordant uranium-lead ages. *Geochimica et*

- Cosmochimica Acta*, 62(4), 665–676. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(98\)00059-3](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(98)00059-3)
- Lynn, G. J. (2005). *Macrogeomorphology and erosional history of the postorogenic Pyrenean mountain belt* (University of Edinburgh). Recuperado de <https://era.ed.ac.uk/handle/1842/854>
- Malusà, M. G., & Fitzgerald, P. G. (2019). Fission-Track Thermochronology and its Application to Geology. En *Fission-Track Thermochronology and its Application to Geology, Springer Textbooks in Earth Sciences, Geography and Environment*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-89421-8>
- Mark, C., Cogné, N., & Chew, D. (2016). Tracking exhumation and drainage divide migration of the Western Alps: A test of the apatite U-Pb thermochronometer as a detrital provenance tool. *Bulletin of the Geological Society of America*, 128(9–10), 1439–1460. <https://doi.org/10.1130/B31351.1>
- Martini, M., Ferrari, L., López-Martínez, M., Cerca-Martínez, M., Valencia, V. A., & Serrano-Duran, L. (2009). Cretaceous-Eocene magmatism and Laramide deformation in southwestern Mexico: No role for terrane accretion. *Memoir of the Geological Society of America*, 204(June), 151–182. [https://doi.org/10.1130/2009.1204\(07\)](https://doi.org/10.1130/2009.1204(07))
- Martini, M., Mori, L., Solari, L., & Centeno-García, E. (2011). Sandstone provenance of the arperos basin (Sierra de Guanajuato, central Mexico): Late Jurassic-Early cretaceous back-arc spreading as the foundation of the Guerrero terrane. *Journal of Geology*, 119(6), 597–617. <https://doi.org/10.1086/661989>
- Martini, M., & Ortega-Gutiérrez, F. (2018). Tectono-stratigraphic evolution of eastern Mexico during the break-up of Pangea: A review. *Earth-Science Reviews*, 183, 38–55. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.06.013>
- 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(6), 1842–1864. <https://doi.org/10.1130/GES01366.1>
- Martini, M., Solari, L., & López-Martínez, M. (2014). Correlating the arperos basin from Guanajuato, central Mexico, to Santo Tomás, southern Mexico: Implications for the paleogeography and origin of the Guerrero terrane. *Geosphere*, 10(6), 1385–1401. <https://doi.org/10.1130/GES01055.1>
- McDonough, W. F., & Sun, S. s. (1995). The composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120(3–4), 223–253. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)00140-4](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)00140-4)
- McDowell, F. W., McIntosh, W. C., & Farley, K. A. (2005). A precise ⁴⁰Ar-³⁹Ar reference age for the Durango apatite (U-Th)/He and fission-track dating standard. *Chemical Geology*, 214(3–4), 249–263. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2004.10.002>
- Mendoza-Rosales, C. C. (2010). *Estratigrafía y facies de las cuencas cretácicas de sur de Puebla y su significado tectónico*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Mendoza-Rosales, C., Centeno-García, E., Silva-Romo, G., Campos-Madrigal, E., & Bernal,

- J. (2010). Barremian rift-related turbidites and alkaline volcanism in southern Mexico and their role in the opening of the Gulf of Mexico. *Earth and Planetary Science Letters*, 295, 419–434.
- Mezger, K., Hanson, G. N., & Bohlen, S. R. (1989). High-precision UPb ages of metamorphic rutile: application to the cooling history of high-grade terranes. *Earth and Planetary Science Letters*, 96(1–2), 106–118. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(89\)90126-X](https://doi.org/10.1016/0012-821X(89)90126-X)
- Mezger, K., & Krogstad, E. J. (1997). Interpretation of discordant U-Pb zircon ages: An evaluation. *Journal of Metamorphic Geology*, 15(1), 127–140. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.1997.00008.x>
- Milián, R. (2019). *Procedencia detrítica de la Formación Chivillas, Cretácico Temprano, sur de México: contribución de la geoquímica y termocronología en apatitos y geocronología en circones*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Miller, B. V., Dostal, J., Keppie, J. D., Nance, R. D., Ortega-Rivera, A., & Lee, J. K. W. (2007). Ordovician calc-alkaline granitoids in the Acatlán complex, southern México: Geochemical and geochronologic data and implications for the tectonics of the Gondwanan margin of the Rheic Ocean. *Special Paper of the Geological Society of America*, 423(23), 465–475. [https://doi.org/10.1130/2007.2423\(23\)](https://doi.org/10.1130/2007.2423(23))
- Moran-Zenteno, D., Caballero-Miranda, C., Silva-Romo, G., Ortega-Guerrero, B., & Golzález-Torres, E. (1993). Jurassic-Cretaceous paleogeographic evolution of the northern Mixteca terrane, southern México. *Geofísica Internacional*, 32(3), 453–473.
- Murillo-Muñeton, G. (1996). *Petrologic and geochronologic study of Grenville-age granulites and post-granulite plutons from the La Mixtequita area, state of Oaxaca in southern Mexico, and their tectonic significance*. University of Southern California.
- Nieto-Samaniego, A. ., Alaniz-Alvarez, S. ., Silva-Romo, G., Eguiza-Castro, M. ., & Mendoza-Rosales, C. C. (2006). Latest Cretaceous to Miocene deformation events in the eastern Sierra Madre del Sur, Mexico, inferred from the geometry and age of major structures. *GSA Bulletin*, 118(1), 238–252. <https://doi.org/10.1130/B2573>
- Nutman, A. P. (2007). Apatite recrystallisation during prograde metamorphism, Cooma, southeast Australia: Implications for using an apatite-graphite association as a biotracer in ancient metasedimentary rocks. *Australian Journal of Earth Sciences*, 54(8), 1023–1032. <https://doi.org/10.1080/08120090701488321>
- O’Sullivan, G., Chew, D., Kenny, G., Henrichs, I., & Mulligan, D. (2020). The trace element composition of apatite and its application to detrital provenance studies. *Earth-Science Reviews*, 201(December 2019). <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.103044>
- Ordóñez, E. (1906). Las rocas arcaicas de México. *Mem. Soc. Científica Antonio Alzate*, 22, 315–331.
- Ortega-Gutiérrez, F. (1981). La evolución tectónica Premisisipca del sur de México. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 5 (2), 140–157.
- Ortega-Gutiérrez, F., Ruiz, J., & Centeno-García, E. (1995). Oaxaquia, a Proterozoic

- microcontinent accreted to North America during the late Paleozoic. *Geology*, 23(12), 1127–1130. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1995\)023<1127:OAPMAT>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1995)023<1127:OAPMAT>2.3.CO;2)
- Ortega-Gutiérrez, Fernando. (1978). Estratigrafía del Complejo Acatlán en la Mixteca baja, estados de Puebla y Oaxaca. *Revista del Instituto de Geología*, 2(2), 112–131.
- Ortega-Gutiérrez, Fernando, Elías-Herrera, M., Morán-Zenteno, D. J., Solari, L., Weber, B., & Luna-González, L. (2018). The pre-Mesozoic metamorphic basement of Mexico, 1.5 billion years of crustal evolution. *Earth-Science Reviews*, 183(September 2017), 2–37. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.03.006>
- Ortega-Gutiérrez, Fernando, Elías-Herrera, M., Reyes-Salas, M., Macías-Romo, C., & López, R. (1999). Late Ordovician-Early Silurian continental collisional orogeny in southern Mexico and its bearing on Gondwana-Laurentia connections. *Geology*, 27(8), 719–722. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1999\)027<0719:LOESCC>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1999)027<0719:LOESCC>2.3.CO;2)
- Ortega-obregón, C., Abdullin, F., Solari, L., Schaaf, P., & Solís-pichardo, G. (2019). *Examples of Its Application*. 1–11.
- 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. <https://doi.org/10.1007/s00531-013-0933-1>
- Passchier, C. W., & Trouw, R. A. (2005). *Microtectonics* (2a ed.). <https://doi.org/10.1007/3-540-29359-0>
- Paton, C., Woodhead, J. D., Hellstrom, J. C., Hergt, J. M., Greig, A., & Maas, R. (2010). Improved laser ablation U-Pb zircon geochronology through robust downhole fractionation correction. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 11(3). <https://doi.org/10.1029/2009GC002618>
- Paul, T. A. (1993). Transmission electron microscopy investigation of unetched fission tracks in fluorapatite-physical process of annealing. *International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part, 21*(4), 507–511. [https://doi.org/10.1016/1359-0189\(93\)90190-K](https://doi.org/10.1016/1359-0189(93)90190-K)
- Petrus, J. A., & Kamber, B. S. (2012). VizualAge: A Novel Approach to Laser Ablation ICP-MS U-Pb Geochronology Data Reduction. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 36(3), 247–270. <https://doi.org/10.1111/j.1751-908X.2012.00158.x>
- Price, P. B., & Walker, R. M. (1963). Fossil Tracks of Charged Particles in Mica and the Age of Minerals. *Journal of Geophysical Research*, 68(16).
- Pryer, L., Robin, P., & Lloyd, G. (1995). An SEM electron-channeling study of flame perthite from the Killarney Granite, southwestern Grenville Front, Ontario. *The Canadian Mineralogist*, 33 (2), 333–347.
- Puchelt, H., & Emmermann, R. (1976). Bearing of rare earth patterns of apatites from igneous and metamorphic rocks. *Earth and Planetary Science Letters*, 31(2), 279–286. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(76\)90220-X](https://doi.org/10.1016/0012-821X(76)90220-X)

- Ramírez-Calderón, M. G. (2018). *Formación Tianguistengo: el registro de un ambiente fluvial del Triásico en el sur de México (Pue., Oax.)*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Ramírez-Espinoza, J. (2001). Tectono-Magmatic evolution of the Paleozoic Acatlán Complex in southern México, and its correlation with the Appalachian system.
- Ramos-Arias, M. A., Keppie, J. D., Lee, J. K. W., & Ortega-Rivera, A. (2011). A Carboniferous high-pressure klippe in the western Acatlán Complex of southern México: Implications for the tectonothermal development and palaeogeography of Pangea. *International Geology Review*, 54(7), 779–798. <https://doi.org/10.1080/00206814.2011.580634>
- Reiners, P. W., & Brandon, M. T. (2006). Using Thermochronology To Understand Orogenic Erosion. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 34(1), 419–466. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.34.031405.125202>
- Reiners, P. W., Carlson, R. W., Renne, P. R., Cooper, K. M., Granger, D. E., McLean, N. M., & Schoene, B. (2017). U–Th–Pb geochronology and thermochronology. En John Wiley & Sons (Ed.), *Geochronology and Thermochronology* (1a ed., pp. 171–230). <https://doi.org/10.1002/9781118455876.ch8>
- Reyes-Salas, M. (2003). *Mineralogía y petrología de los Granitoides Esperanza del Complejo Acatlán, sur de México*. Universidad Autónoma del estado de Morelos.
- Rodríguez-Torres, R. (1970). Geología metamórfica del área de Acatlán, Estado de Puebla: México, D.F. *Sociedad Geológica Mexicana, Libro guía*, 51–54.
- Sánchez-Zavala, J. L., Ortega-Gutiérrez, F., Keppie, J. D., Jenner, G. A., Belousova, E., & Maciás-Romo, C. (2004). Ordovician and Mesoproterozoic Zircons from the Tecamate Formation and Esperanza Granitoids, Acatlán Complex, Southern Mexico: Local Provenance in the Acatlán and Oaxacan Complexes. *International Geology Review*, 46(11), 1005–1021. <https://doi.org/10.2747/0020-6814.46.11.1005>
- Schaaf, P., Weber, B., Weis, P., Groß, A., Ortega-Gutiérrez, F., & Köhler, H. (2002). The Chiapas Massif (Mexico) revised: New geologic and isotopic data and basement characteristics. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie - Abhandlungen. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung*, 225 (1), 1–23.
- Sedlock, R. L., Ortega-gutierrez, F., Speed, R. C., & Ortega-gutierrez, F. (1993). Tectonostratigraphic terranes and tectonic evolution of Mexico. En *Special Paper of the Geological Society of America* (Vol. 278). <https://doi.org/10.1130/SPE278-p1>
- Servicio Geológico Mexicano. (1998a). *Carta Geológico-Minera Chilpancingo E14-8, Guerrero, Puebla y Oaxaca. Escala 1:250.000*.
- Servicio Geológico Mexicano. (1998b). *Carta Geológico-Minera Cuernavaca E14-5, Morelos, Puebla, Guerrero, Estado de México y Oaxaca. Escala 1:250.000*.
- Servicio Geológico Mexicano. (2000). *Carta Geológico-Minera Oaxaca E14-9, Oaxaca y Puebla. Escala 1:250.000*.




- Servicio Geológico Mexicano. (2001). *Carta Geológico-Minera Orizaba E14-6, Veracruz, Puebla y Oaxaca. Escala 1:250.000.*
- Sha, L. K., & Chappell, B. W. (1999). Apatite chemical composition, determined by electron microprobe and laser-ablation inductively coupled plasma mass spectrometry, as a probe into granite petrogenesis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(22), 3861–3881. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(99\)00210-0](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(99)00210-0)
- Sierra-Rojas, M. I., Molina-Garza, R. S., & Lawton, T. F. (2016). The lower cretaceous atzompa formation in south-central Mexico: Record of evolution from extensional backarc basin margin to carbonate platform. *Journal of Sedimentary Research*, 86(6), 712–733. <https://doi.org/10.2110/jsr.2016.45>
- Sláma, J., Košler, J., Condon, D. J., Crowley, J. L., Gerdes, A., Hanchar, J. M., ... Whitehouse, M. J. (2008). Plešovice zircon - A new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis. *Chemical Geology*, 249(1–2), 1–35. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2007.11.005>
- Solari, L. A., Keppie, J. D., Ortega-Gutiérrez, F., Cameron, K. L., Lopez, R., & Hames, W. E. (2003). 990 and 1100 Ma Grenvillian tectonothermal events in the northern Oaxacan Complex, southern Mexico: Roots of an orogen. *Tectonophysics*, 365(1–4), 257–282. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(03\)00025-8](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(03)00025-8)
- Solari, L. A., Torres de León, R., Hernández Pineda, G., Solé, J., Solís-Pichardo, G., & Hernández-Treviño, T. (2007). Tectonic significance of Cretaceous-Tertiary magmatic and structural evolution of the northern margin of the Xolapa Complex, Tierra Colorada area, southern Mexico. *Bulletin of the Geological Society of America*, 119(9–10), 1265–1279. <https://doi.org/10.1130/B26023.1>
- Solari, Luigi A., Dostal, J., Ortega-Gutiérrez, F., & Keppie, J. D. (2001). The 275 Ma arc-related La Carbonera stock in the northern Oaxacan Complex of southern Mexico: U-Pb geochronology and geochemistry. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 18(2), 149–161.
- Solari, Luigi 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(1), 5–18. <https://doi.org/10.1111/j.1751-908X.2009.00027.x>
- Spear, F. S., & Pyle, J. M. (2002). Apatite, monazite, and xenotime in metamorphic rocks (in Phosphates; geochemical, geobiological, and materials importance) Reviews in Mineralogy and Geochemistry. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 48, 293–335. <https://doi.org/10.2138/rmg.2002.48.7>
- Talavera-Mendoza, O., Ruiz, J., Gehrels, G. E., Meza-Figueroa, D. M., Vega-Granillo, R., & Campa-Uranga, M. F. (2005). U-Pb geochronology of the Acatlán Complex and implications for the Paleozoic paleogeography and tectonic evolution of southern Mexico. *Earth and Planetary Science Letters*, 235(3–4), 682–699. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.04.013>
- TalaveraMendoza, O. ., & Suastegui, M. G. (2000). Geochemistry and isotopic composition

- of the Guerrero Terrane (western Mexico): Implications for the tectono-magmatic evolution of southwestern North America during the Late Mesozoic. *Journal of South American Earth Sciences*, 13(4–5), 297–324. [https://doi.org/10.1016/S0895-9811\(00\)00026-2](https://doi.org/10.1016/S0895-9811(00)00026-2)
- Tera, F., & Wasserburg, G. J. (1972). U-Th-Pb systematics in three APOLLO 14 basalts and the problem of initial Pb in lunar rocks. *Earth and Planetary Science Letters*, 14 (3), 281–304.
- Tolson, G. (2005). La falla Chacalapa en el sur de Oaxaca. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 57(1), 111–122. <https://doi.org/10.18268/bsgm2005v57n1a6>
- Vega-Granillo, R., Calmus, T., Meza-Figueroa, D., Ruiz, J., Talavera-Mendoza, O., & López-Martínez, M. (2009). Structural and tectonic evolution of the acatlán complex, southern Mexico: Its role in the collisional history of laurentia and gondwana. *Tectonics*, 28(4). <https://doi.org/10.1029/2007TC002159>
- Vega-Granillo, R., Talavera-Mendoza, O., Meza-Figueroa, D., Ruiz, J., Gehrels, G. E., López-Martínez, M., & de la Cruz-Vargas, J. C. (2007). Pressure-temperature-time evolution of Paleozoic high-pressure rocks of the Acatlán Complex (southern Mexico): Implications for the evolution of the Iapetus and Rheic Oceans. *Bulletin of the Geological Society of America*, 119(9–10), 1249–1264. <https://doi.org/10.1130/B226031.1>
- Vermeesch, P. (2009). RadialPlotter: A Java application for fission track, luminescence and other radial plots. *Radiation Measurements*, 44(4), 409–410. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2009.05.003>
- Vermeesch, P. (2017). Statistics for LA-ICP-MS based fission track dating. *Chemical Geology*, 456, 19–27. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2017.03.002>
- Vermeesch, P. (2018). IsoplotR: A free and open toolbox for geochronology. *Geoscience Frontiers*, 9(5), 1479–1493. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.04.001>
- Wagner, G. A., & Van den Haute, P. (1992). Fission-Track Dating. En *Springer Netherlands*,. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53643-3.00039-X>
- Weber, B., & Köhler, H. (1999). Sm-Nd, Rb-Sr and U-Pb geochronology of a Grenville Terrane in Southern Mexico: Origin and geologic history of the Guichicovi Complex. *Precambrian Research*, 96(3–4), 245–262. [https://doi.org/10.1016/s0301-9268\(99\)00012-1](https://doi.org/10.1016/s0301-9268(99)00012-1)
- Weber, B, Valencia, V. ., Schaaf, P., Pompa-Mera, V., & Ruiz, J. (2008). Significance of Provenance Ages from the Chiapas Massif Complex (Southeastern Mexico): Redefining the Paleozoic Basement of the Maya Block and Its Evolution in a Peri-Gondwanan Realm. *The Journal of Geology*, 96 (2), 619–639.
- Weber, Bodo, Hecht, L., Molina-Garza, R., & Köhler, H. (2002). El descubrimiento de basamento metasedimentario en el macizo de Chiapas: la “unidad la sepultura. *Geos*, 22(1), 2–11.
- Weber, Bodo, & Schulze, C. H. (2014). Early Mesoproterozoic (>1.4 Ga) ages from granulite




basement inliers of SE Mexico and their implications on the Oaxaquia concept - Evidence from U-Pb and Lu-Hf isotopes on zircon. *Revista Mexicana de Ciencias Geologicas*, 31(3), 377–394.




- Whitney, D. L., & Evans, B. W. (2010). Abbreviations for Names of Rock-Forming Minerals. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95(January 2010), 185–187. <https://doi.org/10.2138/am.2010.3371>
- Wiedenbeck, M., Allé, P., Corfu, F., Griffin, W. L., Meier, M., Oberli, F., ... Spiegel, W. (1995). Three Natural Zircon Standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, Trace Element and Re Analyses. *Geostandards Newsletter*, 19(1), 1–23. <https://doi.org/10.1111/j.1751-908X.1995.tb00147.x>
- Yanez, P., Ruiz, J., Patchett, P. J., Ortega-Gutierrez, F., & Gehrels, G. E. (1991). Isotopic studies of the Acatlan Complex, southern Mexico: implications for Paleozoic North American tectonics. *Geological Society of America Bulletin*, 103(6), 817–828. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1991\)103<0817:ISOTAC>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1991)103<0817:ISOTAC>2.3.CO;2)




ANEXO A: Petrografía



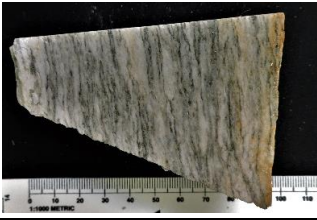
	Estudio termo-tectónico de los Granitoides Esperanza del Complejo Acatlán mediante U-Pb y trazas de fisión en apatitos, sur de México			
DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA MUESTRA Pxt - 0				
Coordenadas :	18°08'13.8" N	Elevación	1110 m.s.n.m.	
	98°16'37.7" W			
Descripción macroscópica				
Muestra de roca fresca, de colores verdosos y rosados, foliación continua, con estructura augen, neisica y milonítica. Presenta tamaños de grano fino de Qtz, Bt, Msc, Plg, Grt y porfidoblastos de Kfs, algunos con bordes de Plg.				
Descripción microscópica				
Textura:	Lepidogranoblástica con porfidoblastos de feldespatos en las bandas granoblásticas			
Minerales principales: Qtz, Kfs, Plg, Wm, Bt				
<p>*Cuarzo (40%): Individuos incoloros, heteroblásticos, xenoblásticos con extinción ondulante (manto-núcleo/lamelas de deformación), bordes irregulares y contacto suturado entre individuos (recristalización). Asociado al Kfs, Wm (Phe, Ms), Plg, Bt y Grt.</p> <p>*Plagioclasa (15%): Individuos incoloros de bajo relieve, heteroblásticos, subidioblásticos, bordes irregulares, alargados en dirección de la foliación, con macla polisintética, en algunos se presentan inclusiones de Ms. Asociado al Kfs, Qtz, Wm (Phe).</p> <p>*Feldespatos (10%): Individuos incoloros de bajo relieve, heteroblásticos, subidioblásticos a xenoblásticos, bordes irregulares, algunos con macla de tartán (microclina) e inclusiones de moscovita. Asociado al Qtz, Wm (Phe), Bt, Grt, Czo.</p> <p>*Mica blanca (10%): Individuos incoloros laminares, de bajo relieve, heteroblásticos, subidioblásticos, con colores de interferencia de segundo y tercer orden, algunos con estructura "fish", principalmente Phe, mientras que la Ms se encuentra en tamaños muy finos y como inclusion en otros minerales. La Phe se encuentra asociada con Qtz, Kfs, Plg, Grt.</p> <p>*Biotita (10%): Individuos verdes hojosos, con relieve medio a bajo, heteroblásticos, subidioblásticos a xenoblásticos, bordes irregulares, algunos concordantes con la dirección de foliación principal. Asociada con la Phe - Ms, Grt, Kfs, Qtz.</p>				
Minerales menores: Ep, Grt, Opacos, Rt, Czo				
<p>*Epidota (5%): Individuos incoloros de alto relieve, subidioblásticos, de pleocroismo moderado, con bordes curvos, algunos fracturados, de habito granular, distribuidos homogeneamente en la roca.</p> <p>*Granate (3%): Porfidoblastos incoloros de alto relieve, subidioblásticos, muy fracturados, entre las fracturas se encuentra biotita cloritizada y feldespato potásico. Asociado a la moscovita, feldespato potásico y cuarzo. Aparentes sombras de presión de microclina.</p> <p>*Minerales opacos (2%): Individuos homeoblásticos, subidioblásticos de geometrías variadas, asociados a los minerales laminares como moscovita y biotita.</p> <p>*Clinozoisita (2%): Individuos subidioblásticos, con bordes irregulares, algunas relacionadas con la alteración de Ep.</p>				
Minerales accesorios y secundarios: Apt, Zr, Ser, Chl.				
<p>*Apatito (1%): Individuos incoloros, heteroblásticos, subidioblásticos, finos, de geometría ovalada, eje "c" paralelos a la foliación.</p> <p>*Zircón (1%): Individuos incoloros de alto relieve, heteroblásticos, idioblásticos a subidioblásticos, fracturados, orientados en dirección de la foliación, asociado a la moscovita.</p> <p>La Chl y Ser son minerales secundarios producto de la alteracion de Bt y Ser.</p>				




	Estudio termo-tectónico de los Granitoides Esperanza del Complejo Acatlán mediante U-Pb y trazas de fisión en apatitos, sur de México		
	DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA MUESTRA Pxt - 6		
Coordenadas :	18°04'28.6" N 98°15'18.8" W	Elevación	960 m.s.n.m.
Descripción macroscópica			
Muestra de roca fresca de colores verdosos y rosados, foliación continua, con estructura augen, neísica y milonítica. Con tamaños de grano fino a medio, de Qtz, Bt, Msc, Plg y porfidoblastos de Kfs de 1 - 2cm.			
Descripción microscópica			
Textura:	Lepidogranoblástica, muy fracturada, procesos de recristalización de calcita.		
Minerales principales: Qtz, Kfs, Plg, Wm			
<p>*<u>Cuarzo (40%)</u>: Individuos incoloros de bajo relieve, heteroblásticos, subidioblásticos a xenoblásticos, colores de birrefringencia de primer orden, alargados en dirección de la foliación principal, extinción ondulante y contacto suturado entre individuos. Asociado a la Wm, Kfs, Bt y Grt.</p> <p>*<u>Plagioclasa (10%)</u>: Individuos incoloros de bajo relieve, heteroblásticos, subidioblásticos a xenoblásticos, con bordes irregulares, presenta inclusiones de moscovita, en algunos casos se observa reemplazamiento del feldespato potásico. Asociado al Qtz, Wm, Kfs.</p> <p>*<u>Feldespato potásico (20%)</u>: Individuos incoloros de bajo relieve, heteroblásticos, algunos porfidoblastos, subidioblásticos, bordes irregulares, presenta inclusiones de moscovita, biotita y opacos, fracturados, alterado (?), los porfidoblastos forman estructura de augen dentro de las bandas de cuarzo. Se asocia al Qtz, Plg, Wm.</p> <p>*<u>Mica Blanca (15%)</u>: Agregados incoloros hojosos con individuos laminares, heteroblásticos, subidioblásticos, con bordes rectos a irregulares, algunos orientados en dirección a la foliación. Asociada al Qtz, Kfs, Plg, Bt.</p>			
Minerales menores: Bt, Grt, Opacos, Ep, Rt			
<p>*<u>Biotita (5%)</u>: Agregados verdosos, heteroblásticos, xenoblásticos, algunos individuos de color marrón verdoso laminares, no se observa una orientación aparente debido al alto grado de alteración a Chl. Asociado al cuarzo, feldespato potásico, granate.</p> <p>*<u>Granate(2%)</u> Individuos incoloros de alto relieve, muy fracturados, subidioblásticos, asociado a la Bt, Qtz.</p> <p>*<u>Epidota (3%)</u>: Individuos incoloros de alto relieve, subidioblásticos, de pleocroismo moderado, con bordes curvos, algunos fracturados, de habito granular, distribuidos homoganeamente en la roca.</p> <p>*<u>Minerales opacos (5%)</u>: Individuos heteroblásticos, idioblásticos con geometrías cubicas variadas, otros con formas fibrosas, presente como inclusiones en feldespato potásico o entre las fracturas de los granates junto con la biotita.</p>			
Minerales accesorios y secundarios: Apt, Zr, Ser, Chl			
<p>*<u>Apatito</u>: Individuos incoloros, heteroblásticos, subidioblásticos, con colores interferencia de primer a segundo orden, algunos fracturados, ligeramente orientados en dirección a la foliación</p> <p>*<u>Zircón</u>: Individuos incoloros de alto relieve, heteroblásticos, subidioblásticos, finos, en general con geometría ovalada, bordes curvilíneos, algunos orientados en dirección de la foliación</p> <p>*<u>Sericita</u>: Asociada a la alteración de plagioclasa, se observa en bordes sombreados</p>			
Microestructuras y observaciones adicionales: Se observan microfracturas con relleno de calcita, maclas mecanicas por deformacion en algunas Plg. Se observan "quartz ribbons", texturas pertiticas.			

	Estudio termo-tectónico de los Granitoides Esperanza del Complejo Acatlán mediante U-Pb y trazas de fisión en apatitos, sur de México		
	DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA MUESTRA Pxt - 7		
Coordenadas :	18°04'43.3" N 98°16'11.8" W	Elevación	995 m.s.n.m.
Descripción macroscópica			
Muestra de roca fresca de colores verdosos y rosados, foliación discontinua, con estructura augen, neisica, presencia de fracturas. Con tamaños de grano fino de Qtz, Bt, Msc y porfidoblastos de Kfs.			
Descripción microscópica			
Textura:	Lepidogranoblástica localmente porfidoblástica.		
Minerales principales: Qtz, Kfs, Plg, Wm			
<p>*<u>Cuarzo (40%)</u>: Individuos incoloros, de bajo relieve, heteroblásticos, xenoblásticos, colores de birrefringencia de primer orden, en algunos casos alargados hacia la dirección de la foliación principal. Bordes irregulares, contactos suturados, extinción ondulante, algunos individuos fracturados, donde las microfracturas se encuentran rellenas de calcita. Se asocia a la Plg, Kfs, Wm y Bt.</p> <p>*<u>Mica blanca (30%)</u>: Agregados incoloros hojosos, compuestos de individuos incoloros heteroblásticos, subidioblásticos de habito laminar, terminaciones irregulares, formando bandas que son interrumpidas por el fracturamiento. La Msc también se encuentra como inclusión en Plg y Kfs. Se asocia con Qtz, Bt, Kfs, Plg.</p> <p>*<u>Plagioclasa (9%)</u>: Individuos incoloros de bajo relieve de forma heteroblástica, subidioblástica, con bordes rectos a irregulares, presentan macla polisintética, inclusiones de Msc, asociada al Qtz, Kfs.</p> <p>*<u>Feldespato potásico (8%)</u>: Individuos incoloros, heteroblásticos, subidioblásticos a xenoblásticos, colores de birrefringencia de primer orden, bordes irregulares, presenta inclusiones de moscovita, algunos presentan maclas mecánicas. Asociado al Qtz, Plg, Wm.</p>			
Minerales menores: Opacos, Bt, Rt, Czo.			
<p>*<u>Opacos (3%)</u>: Heteroblásticos, xenoblásticos, asociados a la moscovita, biotita y a las fracturas.</p> <p>*<u>Biotita (7%)</u>: Agregados de color verde a marrón, con pleocroísmo típico, individuos heteroblásticos, subidioblásticos, de habito laminar, algunos concordantes con la foliación, asociado a la mica blanca y al cuarzo.</p> <p>*<u>Rutilo (3%)</u>: Individuos de color rojizo, idioblásticos, muy finos, en contacto neto con Qtz, Plg y Wm.</p> <p>*<u>Clinozoisita (2%)</u>: Individuos subidioblásticos, con bordes irregulares, relieve moderado, en contacto neto con el Qtz.</p>			
Minerales accesorios y secundarios: Apt, Zr, Ser, Chl, Ttn			
<p>*<u>Apatito</u>: Individuos incoloros heteroblásticos, subidioblásticos, terminaciones redondeadas, finos a muy finos, su eje "c" orientado paralelo a la foliación.</p> <p>*<u>Zircón</u>: Individuos incoloros heteroblásticos, idioblásticos a subidioblásticos, finos a muy finos, con una leve orientación a lo largo de la foliación.</p> <p>*<u>Sericita</u>: Asociada a la alteración de plagioclasa, se observa en bordes sombreados</p> <p>*<u>Titanita</u>: Individuos de color marrón claro, alto relieve, idioblásticos, finos, en contacto con opacos.</p>			
Microestructuras y observaciones adicionales: Se observan microfracturas con relleno de calcita, las cuales interrumpen el plano de foliación principal y maclas mecánicas por deformación en algunas Plg.			

	Estudio termo-tectónico de los Granitoides Esperanza del Complejo Acatlán mediante U-Pb y trazas de fisión en apatitos, sur de México		
	DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA MUESTRA Pxt - 9		
Coordenadas :	17°51'09.8" N	Elevación	1456 m.s.n.m.
	98°11'38.9" W		
Descripción macroscópica			
Muestra de roca fresca, de color blanco a gris, con tonalidades rosadas anaranjadas, foliación continua, con estructura neísica y milonítica. Presenta tamaños de grano medio a fino de Qtz, Msc, Kfs y Plg.			
Descripción microscópica			
Textura:	Granoblástica, con algunas bandas lepidoblásticas de moscovita.		
Minerales principales: Qtz, Kfs, Plg			
<p>*<u>Cuarzo (40%)</u>: Individuos incoloros, heteroblásticos, subidioblásticos a xenoblásticos, de bajo relieve, bordes irregulares, suturados, con extinción ondulante, se asocia en contacto neto con el feldespato potásico, moscovita y plagioclasa.</p> <p>*<u>Plagioclasa (20%)</u>: Individuos incoloros de bajo relieve, homeoblásticos, subidioblásticos a xenoblásticos, maclado polisintético, bordes irregulares, asociado al cuarzo, feldespato potásico y moscovita. Algunos individuos presentan un alargamiento en dirección a la foliación, mientras que otros se encuentran orientados al azar.</p> <p>*<u>Feldespato potásico (20%)</u>: Individuos incoloros de bajo relieve, heteroblásticos, xenoblásticos, bordes irregulares, los individuos mas pequeños presentan macla de Carlsbad, los Porfidoblastos presentan inclusiones de moscovita. Los individuos se encuentran asociados a cuarzo, moscovita y plagioclasa.</p>			
Minerales menores: Wm, Grt, Tur.			
<p>*<u>Moscovita (15%)</u>: Agregados incoloros hojosos, con individuos incoloros, heteroblásticos, subidioblásticos, con colores de interferencia de tercer orden, algunos individuos muestran estructuras "fish" indicando una cinemática de tipo dextral. Se encuentra asociada al cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa hornblenda y granate.</p> <p>*<u>Granate (1%)</u>: Porfidoblastos incoloros de alto relieve, heteroblásticos, fracturados, siguiendo la dirección de foliación, asociados a la moscovita en contacto neto y cuarzo en algunos casos. Las fracturas se encuentran rellenas de moscovita.</p> <p>*<u>Turmalina (3%)</u>: Individuos de color verde, algunos más incoloros, pleocroísmo moderado, de relieve medio a alto, homeoblásticos, subidioblásticos, alargados en dirección a la foliación principal, bordes rectos a curvados, fracturados, asociada a la moscovita.</p>			
Minerales accesorios y secundarios: Apt, Zr, Ser			
<p>*<u>Apatito</u>: Individuos incoloros heteroblásticos, subidioblásticos, terminaciones redondeadas, finos a muy finos, su eje "c" orientado paralelo a la foliación.</p> <p>*<u>Zircón</u>: Individuos incoloros heteroblásticos, idioblásticos a subidioblásticos, finos a muy finos, con una leve orientación a lo largo de la foliación.</p> <p>*<u>Sericita</u>: Asociada a la alteración de plagioclasa, se observa en bordes sombreados</p>			
Microestructuras y observaciones adicionales: Se observan microfracturas con relleno de calcita, maclas mecánicas por deformación en algunas Plg.			

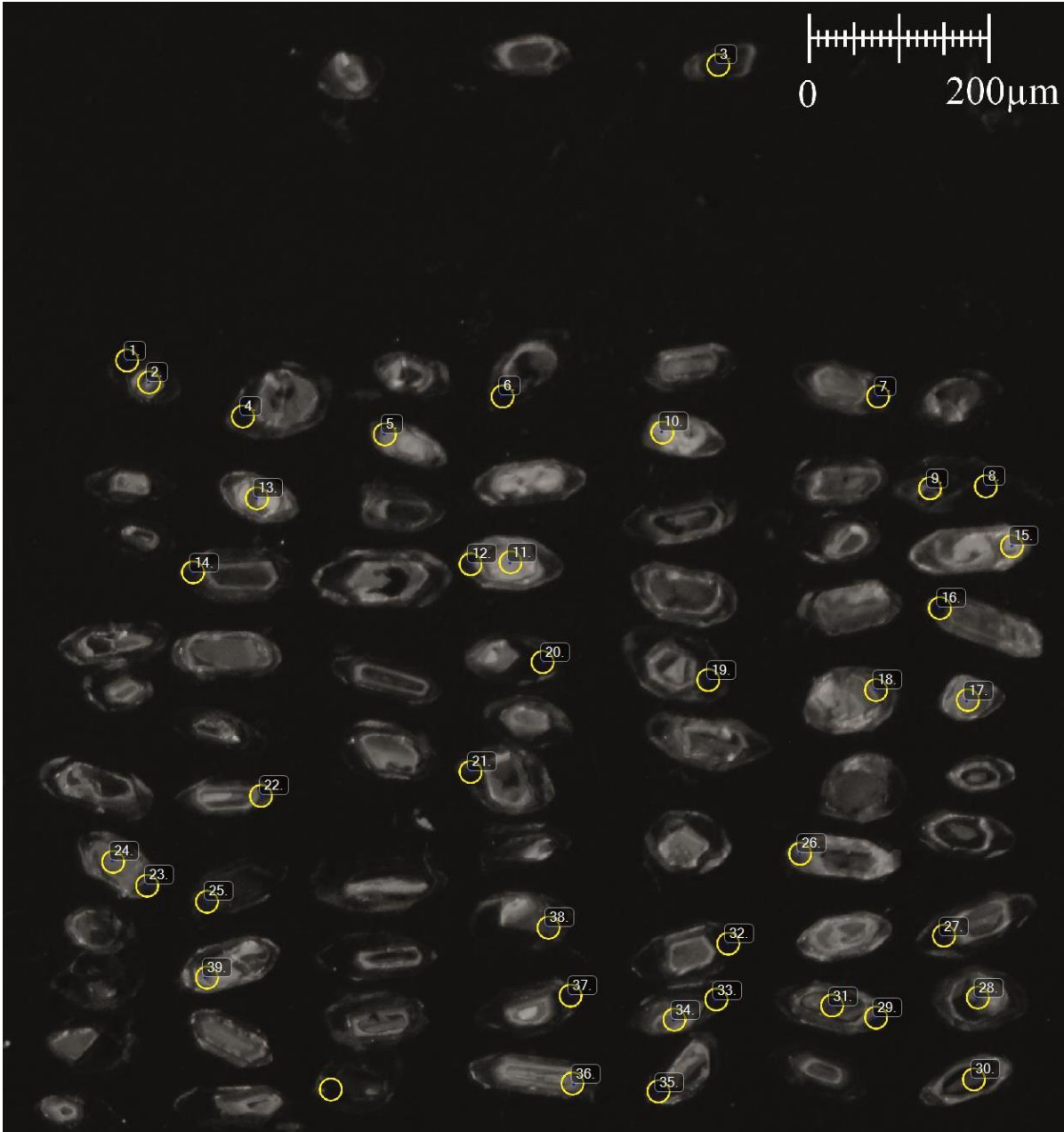
	Estudio termo-tectónico de los Granitoides Esperanza del Complejo Acatlán mediante U-Pb y trazas de fisión en apatitos, sur de México			
	DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA MUESTRA Pxt - 9b			
Coordenadas :	17°51'14.8" N	Elevación	1467 m.s.n.m.	
	98°11'36.8" W			
Descripción macroscópica				
Muestra de roca fresca de colores verdosos, amarillentos y rosados, foliación continua, con estructura augen, neísica y milonítica. Con tamaños de grano fino de Qtz, Bt, Msc, Grt y porfidoblastos de Kfs.				
Descripción microscópica				
Textura:	Lepidogranoblástica con porfidoblastos de feldespatos			
Minerales principales: Qtz, Kfs, Wm, Grt				
<p>*<u>Cuarzo (40%)</u>: Individuos incoloros, heteroblásticos, xenoblásticos con extinción ondulante (manto-núcleo/lamelas de deformación), bordes irregulares y contacto suturado entre individuos (recristalización). Asociado al Kfs, Wm (Phe, Ms), Plg, Bt y Grt.</p> <p>*<u>Feldespatos (15%)</u>: Individuos incoloros de bajo relieve, heteroblásticos, subidioblásticos a xenoblásticos, bordes irregulares, algunos con macla de tartán (microclina) e inclusiones de moscovita. Asociado al Qtz, Wm (Phe), Grt. Plg.</p> <p>*<u>Mica blanca (15%)</u>: Agregados incoloros, con individuos subidioblásticos, con bordes rectos a curvados, terminaciones irregulares, en dirección de la foliación principal. Se encuentra asociada al Qtz, Plg, Kfs, Bt y Grt.</p> <p>*<u>Granate (9%)</u>: Porfidoblastos incoloros de alto relieve, heteroblásticos, generalmente hexagonales, muy fracturados, en dirección a la foliación, asociados a Bt, Wm y Qtz. Los fragmentos se encuentran separados por biotita.</p>				
Minerales menores: Plg, Bt, Ep, Opacos.				
<p>*<u>Plagioclasa (5%)</u>: Individuos incoloros de bajo relieve, heteroblásticos, subidioblásticos a xenoblásticos, con bordes irregulares, presenta inclusiones de moscovita, en algunos casos se observa reemplazamiento del feldespato potásico. Asociado al Qtz, Wm, Kfs.</p> <p>*<u>Biotita (8%)</u>: Agregados de color marrón verdoso, con pleocroísmo a verde amarillento, de hábito hojoso, individuos heteroblásticos, subidioblásticos, laminares, en su mayoría concordantes a la dirección de foliación. Asociado a la Wm, Qtz y Grt.</p> <p>*<u>Opacos (3%)</u>: Individuos heteroblásticos, subidioblásticos de geometrías alargadas a cúbicas.</p> <p>*<u>Epidota</u>: Individuos incoloros de alto relieve, subidioblásticos, de pleocroísmo moderado, con bordes curvos, algunos fracturados, de hábito granular, distribuidos homogéneamente en la roca.</p>				
Minerales accesorios y secundarios: Apt, Zr, Ser, Chl, Ttn				
<p>*<u>Apatito</u>: Individuos incoloros heteroblásticos, subidioblásticos, terminaciones redondeadas, finos a muy finos, su eje "c" orientado paralelo a la foliación.</p> <p>*<u>Zircón</u>: Individuos incoloros heteroblásticos, idioblásticos a subidioblásticos, finos a muy finos, con una leve orientación a lo largo de la foliación.</p> <p>*<u>Sericita</u>: Asociada a la alteración de plagioclasa, se observa en bordes sombreados</p> <p>*<u>Titanita</u>: Individuos de color marrón claro, alto relieve, idioblásticos, finos, en contacto con opacos.</p>				
Microestructuras y observaciones adicionales: Se observan microfracturas con relleno de calcita, maclas mecánicas por deformación en algunas Plg. Se observan "quartz ribbons", texturas peritíticas.				

	Estudio termo-tectónico de los Granitoides Esperanza del Complejo Acatlán mediante U-Pb y trazas de fisión en apatitos, sur de México			
	DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA MUESTRA Pxt - 10			
Coordenadas :	17°51'14" N	Elevación	1474 m.s.n.m.	
	98°11'02.5" W			
Descripción macroscópica				
Muestra de roca fresca, de color blanco a gris, con tonalidades rosadas anaranjadas, foliación continua, con estructura neisica y milonítica. Presenta tamaños de grano medio a fino de Qtz, Msc, Kfs y Plg.				
Descripción microscópica				
Textura:	Granoblástica, inequigranular.			
Minerales principales: Qtz, Kfs, Plg				
<p>*<u>Cuarzo (40%)</u>: Individuos incoloros con bajo relieve, heteroblásticos, xenoblásticos a subidioblásticos, con colores de interferencia de primer orden. El contacto entre los cristales varía de recto a suturado, algunos cristales presentan extinción ondulante, en contacto neto con Wm, Plg y Kfs.</p> <p>*<u>Plagioclasa (20%)</u>: Se encuentran dos familias de plagioclasa (Pl 1 y Pl 2).</p> <p>Pl (1): Individuos incoloros de relieve bajo, heteroblásticos, subidioblásticos, gran parte fracturados, algunos porfidoblastos, alargados, bordes rectos e irregulares, maclado polisintético, asociada al Qtz, Kfs y Wm. Esta última también se presenta a modo de inclusión, visible en los individuos de mayor tamaño.</p> <p>Pl (2): Se presenta como lamelas en los individuos de Kfs, formando texturas micropertíticas.</p> <p>*<u>Feldespato potásico (30%)</u>: Individuos heteroblásticos, algunos porfidoblastos, xenoblásticos, incoloros de bajo relieve, fracturados. Se presentan dos variedades: microclina (Mc) la cual presenta macla de tartán, en contacto neto con Plg, Qtz y Wm; la ortoclasa (Or) en algunos individuos es identificable la macla de Carlsbad o maclado mecánico por deformación. En los porfidoblastos se observan inclusiones de Ms (textura poiquiloblástica); además de texturas micropertíticas.</p>				
Minerales menores: Wm, Opacos.				
<p>*<u>Mica blanca (7%)</u>: Agregados incoloros hojosos principalmente, heteroblástico, subidioblásticos de hábito laminar, en contacto neto con Qtz, Kfs y Plg. Se encuentra también como inclusión dentro de los cristales de plagioclasa y feldespato potásico. En algunos sectores se encuentra también como relleno de microfracturas o siguiendo una dirección preferencial junto con los cristales de cuarzo, plagioclasa y feldespato potásico.</p> <p>*<u>Minerales opacos (3%)</u>: Individuos homeoblásticos, idioblásticos a xenoblásticos, asociados principalmente a la moscovita, preferencialmente en las microfracturas y al cuarzo de forma homogénea en la roca.</p>				
Minerales accesorios y secundarios: Apt, Zr, Ser				
<p>*<u>Apatito (1%)</u>: Individuos incoloros heteroblásticos, subidioblásticos, terminaciones redondeadas, finos a muy finos, su eje "c" orientado paralelo a la foliación.</p> <p>*<u>Zircón (1%)</u>: Individuos incoloros heteroblásticos, idioblásticos a subidioblásticos, finos a muy finos, con una leve orientación a lo largo de la foliación.</p> <p>*<u>Sericita</u>: Asociada a la alteración de plagioclasa, se observa en bordes sombreados</p>				
Microestructuras y observaciones adicionales: Se observan microfracturas con relleno de calcita, maclas mecánicas por deformación en algunas Plg.				

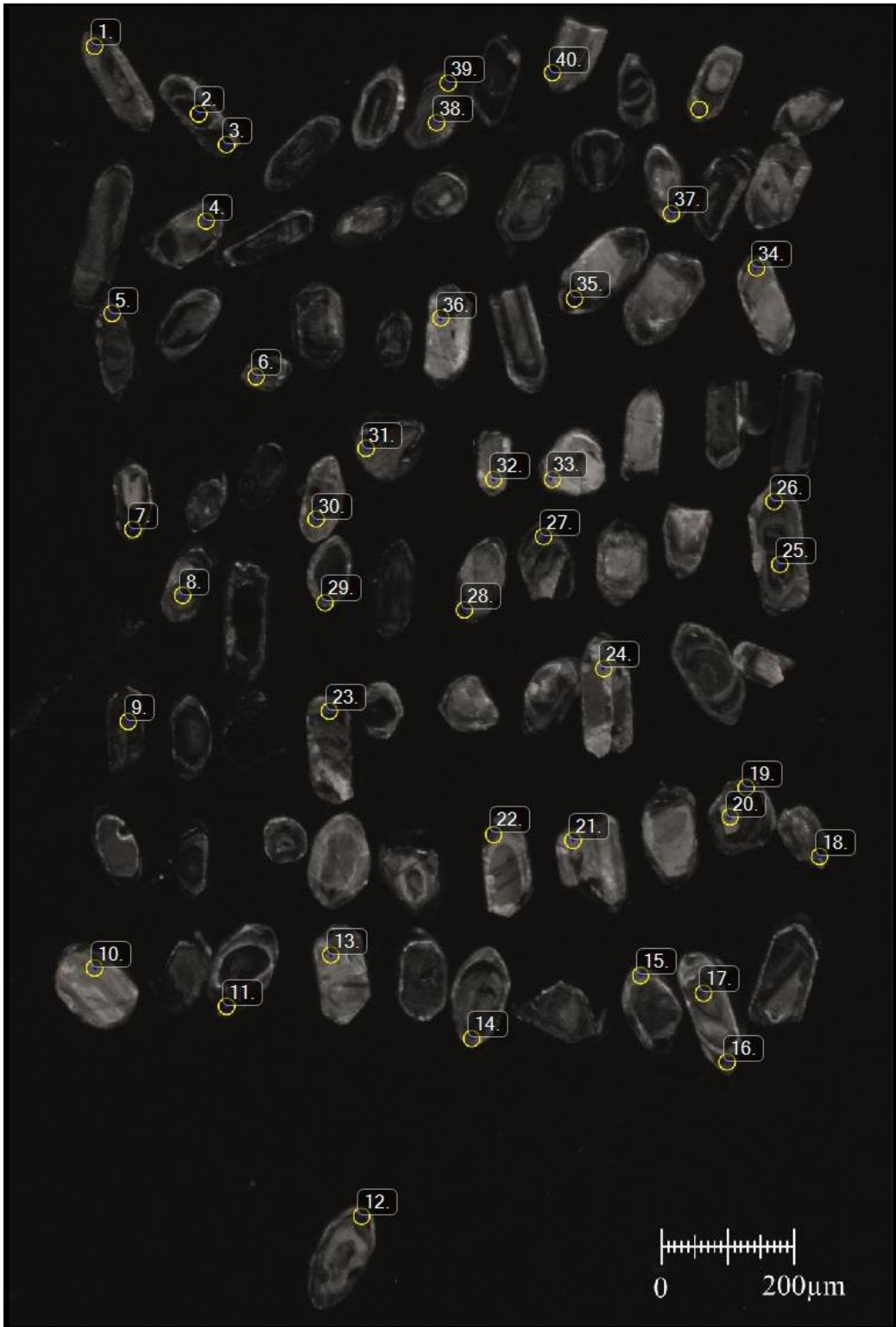
	Estudio termo-tectónico de los Granitoides Esperanza del Complejo Acatlán mediante U-Pb y trazas de fisión en apatitos, sur de México		
	DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA MUESTRA Pxt - 11		
Coordenadas :	18°28'53.1" N	Elevación	1026 m.s.n.m.
	98°17'35.9" W		
Descripción macroscópica			
Muestra de roca fresca de colores verdosos y rosados, foliación continua, con estructura augen, neísica, milonítica. Con tamaños de grano fino a muy fino de Qtz, Bt, Msc y porfidoblastos de Kfs con bordes de alteración.			
Descripción microscópica			
Textura:	Granolepidoblástica con alta recristalización de calcita		
Minerales principales: Qtz, Kfs, Wm, Grt			
<p>*<u>Cuarzo (25%)</u>: Individuos incoloros con bajo relieve, heteroblásticos, xenoblásticos, fracturados, colores de interferencia de primer orden. Bordes irregulares, ligeramente alargados en dirección de la foliación. Asociado al Kfs, Wm, Grt y Bt</p> <p>*<u>Feldespato potásico (30%)</u>: Individuos incoloros de bajo relieve, heteroblásticos, xenoblásticos, con bordes irregulares, inclusiones de moscovita, macla de Carlsbad, alargados hacia la misma dirección de la moscovita y foliación principal aparente. Asociado con Qtz, Wm y Grt.</p> <p>*<u>Mica blanca (25%)</u>: Agregados incoloros laminares, individuos heteroblásticos, subidioblásticos, con bordes rectos a curvados, algunas con estructura "fish" que indican una cinemática de tipo dextral, colores de interferencia de 3 orden, algunas con orientación preferencial, otras presentan una orientación aleatoria. Se encuentra asociada al Qtz, Kfs, Grt y Bt.</p> <p>* <u>Granate (8%)</u>: Porfidoblastos incoloros de alto relieve, heteroblásticos, muy fracturados. Asociado a la Wm, Kfs, Qtz y Bt. - Clorita relleno de las fracturas del granate.</p>			
Minerales menores: Opacos, Rt, Ep, .			
<p>*<u>Opacos (5%)</u>: Individuos heteroblásticos, subidioblásticos de geometrías alargadas a cúbicas.</p> <p>*<u>Rutilo (3%)</u>: Individuos de color rojizo, idioblásticos, muy finos, en contacto neto con Qtz, Kfs y Wm.</p> <p>*<u>Epidota (3%)</u>: Individuos incoloros de alto relieve, subidioblásticos, de pleocroismo moderado, con bordes curvos, algunos fracturados, de habito granular, distribuidos homogéneamente en la roca.</p>			
Minerales accesorios y secundarios: Apt, Zr, Ser			
<p>*<u>Apatito</u>: Individuos incoloros heteroblásticos, subidioblásticos, terminaciones redondeadas, finos a muy finos, su eje "c" orientado paralelo a la foliación.</p> <p>*<u>Zircón</u>: Individuos incoloros heteroblásticos, idioblásticos a subidioblásticos, finos a muy finos, con una leve orientación a lo largo de la foliación.</p> <p>*<u>Clorita</u>: Se encuentra asociada a la alteración de biotita, de color verde, subidioblástica a xenoblástica, también se encuentra como relleno de algunas fracturas intercristalinas.</p>			
Microestructuras y observaciones adicionales: Se observan microfracturas con relleno de calcita, Se observan "quartz ribbons", texturas manto-núcleo en el cuarzo.			

ANEXO B: Imágenes de cátodoluminiscencia de zircones

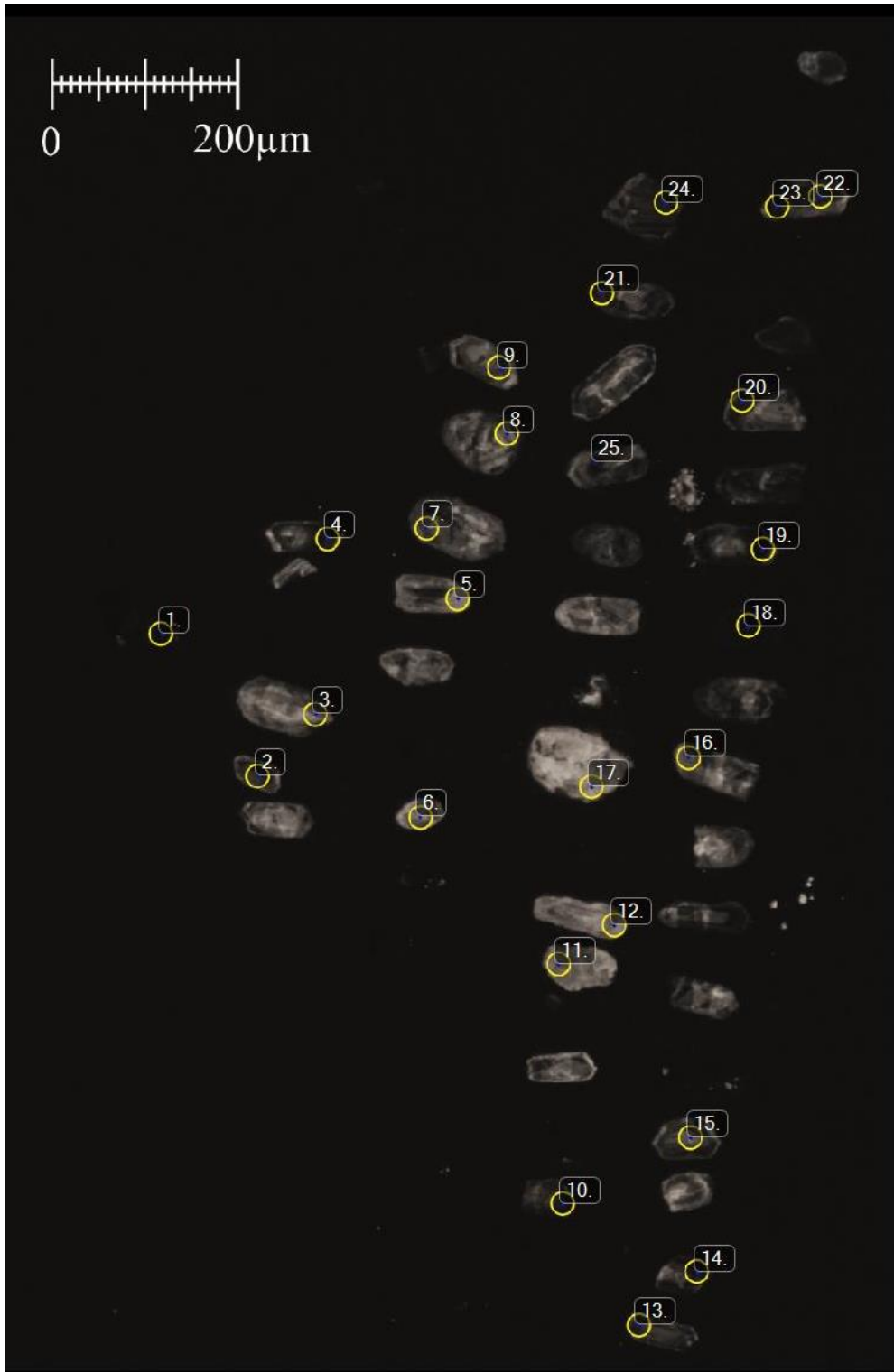
Muestra Pxt-8



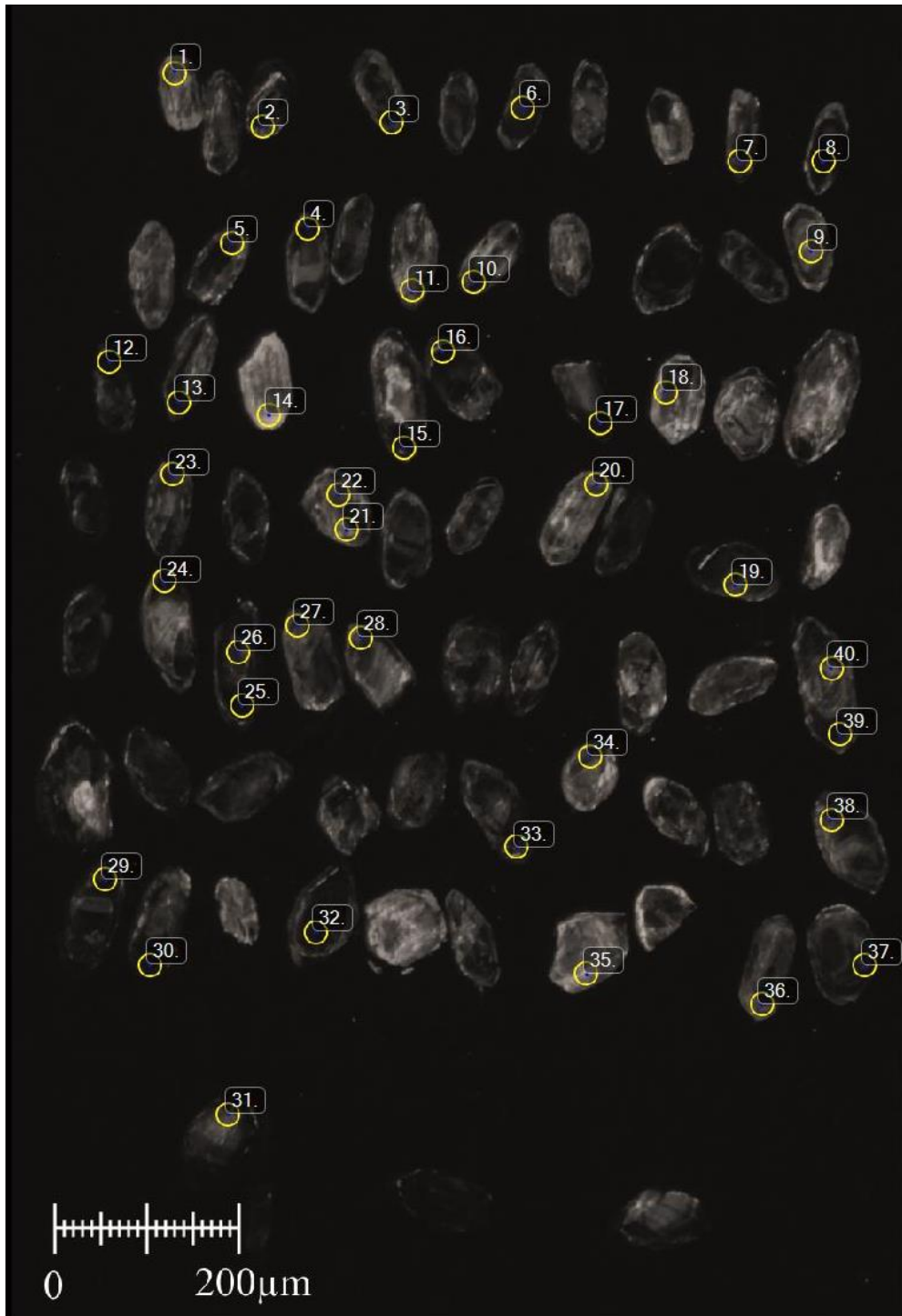
Muestra Pxt – 9b



Muestra Pxt – 10



Muestra Pxt – 11



ANEXO C: Análisis U–Pb en zircones mediante LA–ICP–MS

Sample	U (ppm) ¹	Th (ppm) ¹	Th/U	CORRECTED RATIOS ²									CORRECTED AGES (Ma)						Disc %		
				²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	±2σ abs	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	±2σ abs	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	±2σ abs	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th	±2σ abs	Rho	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	±2σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	±2σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	±2σ		Best age (Ma)	±2σ
Pxt-8																					
Zrn-01	617	59.6	0.097	0.0607	0.0039	0.585	0.032	0.0704	0.0022	0.026	0.0028	0.637	438.5	13	467.0	20	616.0	140	438.5	13	6.1
Zrn-02	41.8	13.8	0.330	0.0695	0.0057	1.48	0.11	0.1536	0.0049	0.0484	0.0051	0.176	925.0	29	925.0	44	900.0	160	925.0	29	0.0
Zrn-03	695	26.7	0.038	0.0692	0.004	1.467	0.067	0.1531	0.0041	0.05	0.0076	0.232	918.0	23	916.0	27	919.0	130	918.0	23	-0.2
Zrn-04	279.4	10.87	0.039	0.0645	0.0062	0.661	0.061	0.0745	0.0022	0.071	0.014	0.475	463.3	13	512.0	38	800.0	210	463.3	13	9.5
Zrn-05	334	88.3	0.264	0.0677	0.0043	0.735	0.039	0.079	0.002	0.038	0.0031	0.216	490.0	12	563.0	21	842.0	130	490.0	12	13.0
Zrn-06	228.6	20.2	0.088	0.065	0.0044	0.945	0.051	0.1029	0.0028	0.0559	0.0076	0.197	631.6	16	675.0	26	785.0	130	631.6	16	6.4
Zrn-07	152	35.7	0.235	0.0887	0.0047	2.833	0.12	0.233	0.0062	0.0733	0.0058	0.404	1350.0	32	1366.0	32	1389.0	100	1350.0	32	1.2
Zrn-09	848	6	0.007	0.07	0.0051	0.733	0.037	0.0772	0.0022	0.435	0.053	-0.196	479.3	13	558.0	22	910.0	140	479.3	13	14.1
Zrn-10	66.7	17.22	0.258	0.0804	0.0064	2.12	0.16	0.1916	0.0053	0.0678	0.01	0.429	1130.0	29	1151.0	53	1190.0	160	1130.0	29	1.8
Zrn-11	33.7	14.88	0.442	0.0823	0.007	2.38	0.16	0.2113	0.0066	0.0621	0.0057	-0.039	1235.0	35	1248.0	50	1300.0	150	1235.0	35	1.0
Zrn-12	317	28	0.088	0.0715	0.004	1.644	0.09	0.1658	0.0068	0.0514	0.0057	0.735	988.0	38	985.0	35	965.0	120	988.0	38	-0.3
Zrn-13	238	76.1	0.320	0.0941	0.0057	3.16	0.16	0.244	0.0064	0.0709	0.0058	0.270	1407.0	33	1447.0	38	1504.0	110	1504.0	110	2.8
Zrn-14	451	160.7	0.356	0.0737	0.0046	1.634	0.083	0.1576	0.0038	0.0462	0.0032	-0.260	943.3	21	982.0	32	1043.0	140	943.3	21	3.9
Zrn-15	42	33.3	0.793	0.0759	0.0059	1.643	0.11	0.1549	0.0051	0.0477	0.004	0.241	928.0	29	982.0	43	1110.0	160	928.0	29	5.5
Zrn-16	216	48.49	0.224	0.0818	0.0045	1.652	0.075	0.1485	0.0037	0.0539	0.0042	0.265	892.0	21	989.0	29	1232.0	110	892.0	21	9.8
Zrn-17	168	22.47	0.134	0.0711	0.0048	1.175	0.06	0.1196	0.0033	0.0659	0.0062	-0.236	728.0	19	787.0	28	937.0	130	728.0	19	7.5
Zrn-18	248	17.28	0.070	0.0641	0.0055	0.676	0.051	0.0761	0.0021	0.0373	0.0044	0.115	472.7	12	523.0	31	720.0	180	472.7	12	9.6
Zrn-19	199	42.7	0.215	0.097	0.0053	3.55	0.17	0.2703	0.0096	0.0776	0.0058	0.685	1541.0	49	1538.0	39	1567.0	98	1567.0	98	-0.2
Zrn-20	226	13.4	0.059	0.058	0.0047	0.6	0.04	0.07533	0.0019	0.0441	0.0097	-0.407	468.2	11	477.0	25	510.0	180	468.2	11	1.8
Zrn-21	128.7	29.19	0.227	0.0662	0.0047	1.066	0.061	0.117	0.003	0.0457	0.0044	-0.053	713.2	17	734.0	30	831.0	130	713.2	17	2.8
Zrn-23	237	50	0.211	0.0802	0.0042	2.214	0.091	0.2039	0.0052	0.0634	0.0046	0.429	1196.0	28	1189.0	31	1208.0	96	1196.0	28	-0.6
Zrn-24	172	75	0.436	0.0794	0.0044	2.155	0.091	0.1938	0.0049	0.0587	0.0043	0.202	1142.0	26	1165.0	29	1190.0	100	1142.0	26	2.0
Zrn-25	436	32.9	0.075	0.0674	0.0057	0.717	0.051	0.0782	0.0024	0.059	0.012	-0.104	485.0	14	548.0	30	830.0	170	485.0	14	11.5
Zrn-26	293	83.4	0.285	0.0973	0.0068	3.28	0.16	0.2379	0.0069	0.0809	0.0066	0.102	1376.0	36	1476.0	37	1560.0	130	1376.0	36	6.8
Zrn-27	306.4	49.66	0.162	0.0834	0.0053	1.181	0.068	0.1066	0.0029	0.0641	0.0056	-0.002	653.0	17	797.0	29	1268.0	120	653.0	17	18.1
Zrn-28	48.8	17.2	0.352	0.0813	0.0049	2.249	0.12	0.2	0.0067	0.0637	0.0063	0.135	1175.0	36	1201.0	41	1235.0	140	1175.0	36	2.2

Zrn-29	631.1	83.5	0.132	0.0822	0.0044	1.529	0.06	0.1361	0.0035	0.0721	0.0059	0.264	823.0	20	946.0	26	1245.0	100	823.0	20	13.0
Zrn-30	276	207	0.750	0.0902	0.0045	3.073	0.11	0.2488	0.0058	0.0727	0.0049	0.199	1434.0	31	1425.0	27	1424.0	97	1424.0	97	-0.6
Zrn-31	580.5	183.5	0.316	0.0814	0.004	2.245	0.084	0.2034	0.0047	0.0592	0.004	0.479	1193.5	25	1199.0	28	1226.0	96	1193.5	25	0.5
Zrn-32	262.7	26.2	0.100	0.0868	0.0095	0.917	0.094	0.0773	0.0022	0.0796	0.011	0.008	479.8	13	658.0	50	1330.0	210	479.8	13	27.1
Zrn-33	302	40.1	0.133	0.0683	0.0081	0.757	0.086	0.0805	0.0026	0.0415	0.0042	0.143	499.0	15	568.0	50	820.0	260	499.0	15	12.1
Zrn-34	171.5	50.47	0.294	0.0812	0.005	2.182	0.1	0.1996	0.0054	0.0655	0.0052	0.165	1173.0	29	1174.0	32	1217.0	120	1173.0	29	0.1
Zrn-35	119	36.7	0.308	0.0728	0.0046	1.726	0.083	0.1708	0.0059	0.0557	0.0044	-0.161	1016.0	33	1017.0	31	996.0	130	1016.0	33	0.1
Zrn-36	65.4	3.4	0.052	0.0802	0.0077	1.82	0.18	0.17	0.0082	0.102	0.023	0.577	1012.0	45	1054.0	70	1190.0	180	1012.0	45	4.0
Zrn-37	87.4	22.8	0.261	0.0752	0.0091	1.61	0.2	0.1555	0.0047	0.0501	0.0074	0.591	932.0	26	966.0	81	1100.0	220	932.0	26	3.5
Zrn-38	127.4	35.6	0.279	0.0742	0.006	0.884	0.062	0.0894	0.0027	0.0403	0.0037	0.247	552.0	16	645.0	35	1020.0	160	552.0	16	14.4
Zrn-39	91.3	42.8	0.469	0.0777	0.0046	2.023	0.094	0.1898	0.0048	0.0574	0.0044	0.031	1122.0	27	1123.0	31	1118.0	120	1122.0	27	0.1
Zrn-40	369	43.1	0.117	0.0909	0.0076	1.015	0.074	0.0819	0.0021	0.086	0.012	-0.025	507.6	13	709.0	37	1410.0	160	507.6	13	28.4

Sample	U (ppm) ¹	Th (ppm) ¹	Th/U	CORRECTED RATIOS ²									CORRECTED AGES (Ma)						Disc %		
				²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	$\pm 2\sigma$ abs	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	$\pm 2\sigma$ abs	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	$\pm 2\sigma$ abs	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th	$\pm 2\sigma$ abs	Rho	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	$\pm 2\sigma$	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	$\pm 2\sigma$	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	$\pm 2\sigma$		Best age (Ma)	$\pm 2\sigma$
Pxt-9b																					
Zrn-01	217	121.1	0.558	0.0572	0.004	0.605	0.034	0.077	0.0022	0.0231	0.002	0.021	478	13	479	21	510	150	478	13	0.2
Zrn-02	1184	73.4	0.062	0.0738	0.0037	1.695	0.061	0.1677	0.0039	0.0526	0.0045	0.232	999.4	22	1006	23	1034	100	999.4	22	0.7
Zrn-03	391	154	0.394	0.0553	0.0032	0.579	0.026	0.07592	0.0018	0.02357	0.0017	0.174	471.7	11	463	17	441	120	471.7	11	-1.9
Zrn-04	166.5	99.5	0.598	0.08	0.0044	2.304	0.1	0.2093	0.005	0.0604	0.0042	0.257	1225	27	1211	31	1207	110	1225	27	-1.2
Zrn-05	271	79	0.292	0.0706	0.0038	0.742	0.036	0.0787	0.0021	0.0301	0.0023	0.368	488.2	13	562	21	935	110	488.2	13	13.1
Zrn-06	153.9	40.3	0.262	0.0747	0.004	1.776	0.074	0.1729	0.0043	0.0544	0.0039	0.233	1028	24	1035	27	1076	110	1028	24	0.7
Zrn-07	556	157.8	0.284	0.0751	0.0037	1.854	0.073	0.1782	0.0042	0.056	0.0043	0.387	1057	23	1064	26	1069	100	1057	23	0.7
Zrn-08	121	47.5	0.393	0.0762	0.0063	1.89	0.13	0.1806	0.0062	0.0617	0.0058	-0.115	1070	34	1088	40	1120	150	1070	34	1.7
Zrn-09	243	80.4	0.331	0.0572	0.0043	0.576	0.037	0.073	0.0021	0.0233	0.0024	0.038	454.1	12	461	23	470	160	454.1	12	1.5
Zrn-10	83.4	26	0.312	0.0696	0.005	1.518	0.099	0.1599	0.0044	0.0509	0.0046	0.311	956	24	952	42	930	140	956	24	-0.4
Zrn-11	172.3	44.8	0.260	0.0577	0.004	0.599	0.036	0.0757	0.002	0.0251	0.0022	0.006	470.1	12	477	23	510	150	470.1	12	1.4
Zrn-12	634	110.9	0.175	0.0584	0.0034	0.568	0.027	0.073	0.0019	0.0236	0.0018	-0.039	452.4	9.5	458	17	537	120	452.4	9.5	1.2
Zrn-13	94.5	35.9	0.380	0.0678	0.0046	1.351	0.078	0.1451	0.0041	0.0429	0.0033	0.274	873	23	868	35	837	130	873	23	-0.6
Zrn-14	376.8	20.1	0.053	0.0851	0.0058	2.44	0.14	0.2123	0.0054	0.0848	0.007	0.204	1241	29	1263	44	1306	130	1241	29	1.7
Zrn-15	125.7	30	0.239	0.0654	0.005	0.857	0.061	0.0943	0.0028	0.0307	0.0033	0.259	581	16	626	33	750	170	581	16	7.2
Zrn-16	211	112.9	0.535	0.0597	0.0051	0.602	0.046	0.0728	0.0022	0.0236	0.0022	0.047	453	13	477	30	550	200	453	13	5.0

Zrn-17	182.2	100.6	0.552	0.0577	0.004	0.59	0.035	0.07397	0.0019	0.02373	0.0018	-0.029	460	11	469	22	470	160	460	11	1.9
Zrn-18	533	283	0.531	0.0579	0.0038	0.575	0.033	0.07271	0.0018	0.0225	0.0016	0.166	452.4	11	461	21	510	150	452.4	11	1.9
Zrn-19	538	108.6	0.202	0.0565	0.0035	0.582	0.031	0.0739	0.0022	0.02336	0.0018	0.321	459.5	13	465	20	469	140	459.5	13	1.2
Zrn-20	102.5	30.68	0.299	0.0785	0.0045	2.161	0.098	0.1992	0.0053	0.0599	0.0048	0.024	1171	28	1169	33	1151	120	1171	28	-0.2
Zrn-21	92.4	19.9	0.215	0.0737	0.0057	1.34	0.087	0.1322	0.0048	0.058	0.0067	0.146	800	27	875	37	1010	150	800	27	8.6
Zrn-22	137	95.1	0.694	0.0575	0.0062	0.619	0.059	0.0759	0.0025	0.0248	0.0019	0.107	472	15	485	37	490	220	472	15	2.7
Zrn-23	237.5	56.7	0.239	0.0805	0.0043	2.324	0.091	0.2068	0.005	0.066	0.0048	0.200	1212	27	1221	28	1214	100	1212	27	0.7
Zrn-24	44.6	19.5	0.437	0.0806	0.0066	2.09	0.14	0.1913	0.0059	0.0587	0.0054	-0.043	1128	32	1143	45	1160	170	1128	32	1.3
Zrn-25	503	710	1.412	0.0544	0.0034	0.538	0.028	0.07064	0.0017	0.02258	0.0015	-0.081	440	10	439	18	399	140	440	10	-0.2
Zrn-26	327.1	135.7	0.415	0.0571	0.0035	0.602	0.031	0.0762	0.0019	0.02693	0.0019	0.128	473.2	12	478	20	507	130	473.2	12	1.0
Zrn-27	271.9	64	0.235	0.0618	0.0064	0.621	0.059	0.0728	0.0021	0.0308	0.0035	0.073	452.7	13	488	38	630	220	452.7	13	7.2
Zrn-28	97	41.5	0.428	0.0587	0.0068	0.615	0.063	0.0758	0.0025	0.0256	0.0025	-0.213	471	15	481	39	450	240	471	15	2.1
Zrn-29	224.1	64.9	0.290	0.0769	0.0046	1.492	0.073	0.1391	0.0039	0.0503	0.0044	0.273	840	22	931	31	1142	120	840	22	9.8
Zrn-30	329	302	0.918	0.0788	0.0053	0.775	0.043	0.0722	0.0019	0.02794	0.002	0.352	449.4	11	581	24	1147	130	449.4	11	22.7
Zrn-31	294.4	121.6	0.413	0.0754	0.0054	1.801	0.11	0.1721	0.0046	0.0503	0.0037	0.099	1023	25	1043	41	1060	150	1023	25	1.9
Zrn-32	27.7	8.32	0.300	0.0756	0.0089	1.22	0.13	0.1193	0.0049	0.0437	0.0083	0.184	726	28	806	64	1000	240	726	28	9.9
Zrn-33	38.8	15.41	0.397	0.0733	0.0068	1.56	0.13	0.1548	0.005	0.0443	0.005	0.154	928	28	943	53	1000	200	928	28	1.6
Zrn-34	122.3	46.5	0.380	0.082	0.0044	2.32	0.096	0.2072	0.0052	0.0641	0.0048	0.144	1214	28	1216	29	1252	100	1214	28	0.2
Zrn-35	28.1	9.48	0.337	0.0739	0.009	1.46	0.16	0.1453	0.0054	0.0534	0.0076	-0.128	874	30	939	64	1020	230	874	30	6.9
Zrn-36	304	81.4	0.268	0.0821	0.0045	1.839	0.077	0.1618	0.0042	0.0451	0.0037	0.190	967	23	1058	27	1241	100	967	23	8.6
Zrn-37	294	89.2	0.303	0.0574	0.0039	0.596	0.034	0.0752	0.002	0.0259	0.0019	0.180	467.2	12	473	22	490	160	467.2	12	1.2
Zrn-38	141.4	50.6	0.358	0.0693	0.0039	1.473	0.066	0.1547	0.0041	0.0491	0.0039	-0.004	927	23	918	27	912	130	927	23	-1.0
Zrn-39	308	99.2	0.322	0.0586	0.0043	0.628	0.039	0.0769	0.002	0.0247	0.002	-0.196	477.3	12	494	24	530	160	477.3	12	3.4
Zrn-40	157.3	80.1	0.509	0.0534	0.0042	0.572	0.038	0.076	0.0021	0.0231	0.0021	-0.255	472.2	13	461	23	380	170	472.2	13	-2.4

Sample	U (ppm) ¹	Th (ppm) ¹	Th/U	CORRECTED RATIOS ²								CORRECTED AGES (Ma)						Disc %			
				²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	±2σ abs	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	±2σ abs	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	±2σ abs	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th	±2σ abs	Rho	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	±2σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	±2σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		±2σ	Best age (Ma)	±2σ
Pxt-10																					
Zrn-02	583	175.3	0.301	0.0552	0.0034	0.569	0.029	0.07316	0.0018	0.0237	0.002	0.156	455.2	11	459	18	416	130	455.2	11	0.8
Zrn-03	194.8	48.6	0.249	0.0583	0.0048	0.612	0.047	0.0751	0.0021	0.0231	0.0022	0.294	466.7	12	482	30	530	170	466.7	12	3.2
Zrn-04	465	134	0.288	0.0563	0.0031	0.588	0.024	0.07511	0.0018	0.02325	0.0018	0.041	466.9	11	469	15	484	110	466.9	11	0.4
Zrn-05	220	53.2	0.242	0.0759	0.0042	2.015	0.092	0.1915	0.0052	0.0587	0.0046	0.472	1129	28	1118	31	1080	110	1129	28	-1.0

Zrn-06	536	116	0.216	0.058	0.0046	0.603	0.029	0.0744	0.0027	0.0176	0.0021	-0.009	463	16	479	18	510	180	463	16	3.3
Zrn-07	236.2	44.6	0.189	0.0607	0.0043	0.7	0.039	0.0846	0.0028	0.0277	0.0026	0.033	523	17	543	25	610	160	523	17	3.7
Zrn-08	214.3	58.42	0.273	0.0942	0.0049	3.385	0.13	0.2624	0.0072	0.0768	0.006	0.169	1502	37	1500	30	1514	100	1514	100	-0.1
Zrn-09	213	129	0.606	0.0571	0.0048	0.573	0.042	0.0733	0.0019	0.02247	0.0016	-0.119	456.2	11	457	27	450	190	456.2	11	0.2
Zrn-10	960	120.6	0.126	0.0564	0.0032	0.603	0.027	0.07744	0.0018	0.025	0.0022	-0.028	480.8	11	483	15	481	110	480.8	11	0.5
Zrn-11	1.55	0.326	0.210	0.81	0.14	83	14	0.77	0.12	7.4	1.3	0.431	3630	440	4500	190	4960	340	4960	340	19.3
Zrn-12	772	119.4	0.155	0.058	0.0039	0.57	0.031	0.0711	0.0019	0.0244	0.0024	-0.138	442.5	11	458	20	540	160	442.5	11	3.4
Zrn-13	601	140	0.233	0.076	0.011	0.79	0.12	0.0759	0.0022	0.044	0.011	0.532	471.9	13	584	66	1020	280	471.9	13	19.2
Zrn-14	682	85.4	0.125	0.0568	0.0031	0.58	0.035	0.0745	0.0023	0.024	0.0032	0.750	463	14	464	23	479	120	463	14	0.2
Zrn-15	353	122	0.346	0.0577	0.0041	0.581	0.036	0.0734	0.002	0.02399	0.0018	0.292	456.7	12	472	26	520	170	456.7	12	3.2
Zrn-16	209.2	80	0.382	0.0567	0.0038	0.586	0.033	0.0735	0.002	0.0232	0.0019	0.336	457.4	12	466	21	460	140	457.4	12	1.8
Zrn-17	383	47.1	0.123	0.0607	0.0034	0.835	0.039	0.0992	0.0024	0.0372	0.0028	0.207	609.5	14	618	22	624	130	609.5	14	1.4
Zrn-18	625.9	21.35	0.034	0.0689	0.0035	1.457	0.055	0.1519	0.0038	0.0452	0.0049	0.420	911	21	912	23	888	110	911	21	0.1
Zrn-19	1050	104	0.099	0.0554	0.0028	0.577	0.022	0.07461	0.0018	0.02324	0.0017	0.318	463.8	11	462.1	14	427	110	463.8	11	-0.4
Zrn-20	277	118.6	0.428	0.0578	0.0045	0.582	0.04	0.07331	0.0019	0.02259	0.0018	0.241	456	11	464	26	470	170	456	11	1.7
Zrn-21	395	116.4	0.295	0.057	0.0033	0.604	0.028	0.07617	0.0018	0.02428	0.0018	0.116	473.2	11	479	18	482	130	473.2	11	1.2
Zrn-22	186	118	0.634	0.0592	0.0043	0.594	0.038	0.0738	0.002	0.02371	0.0018	0.109	458.7	12	474	24	520	160	458.7	12	3.2
Zrn-23	589	218	0.370	0.0561	0.0031	0.574	0.025	0.07356	0.0018	0.02257	0.0016	0.212	457.6	11	460	16	451	120	457.6	11	0.5
Zrn-24	164	41.2	0.251	0.0569	0.0047	0.584	0.043	0.0734	0.0019	0.0241	0.0026	-0.063	456.4	12	468	27	450	190	456.4	12	2.5
Zrn-25	172.4	40.6	0.235	0.0558	0.0046	0.597	0.043	0.0768	0.0023	0.024	0.0023	0.143	477.2	14	473	27	460	180	477.2	14	-0.9

Sample	U (ppm) ¹	Th (ppm) ¹	Th/U	CORRECTED RATIOS ²									CORRECTED AGES (Ma)						Disc %		
				²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	$\pm 2\sigma$ abs	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	$\pm 2\sigma$ abs	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	$\pm 2\sigma$ abs	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th	$\pm 2\sigma$ abs	Rho	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	$\pm 2\sigma$	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	$\pm 2\sigma$	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	$\pm 2\sigma$		Best age (Ma)	$\pm 2\sigma$
Pxt-11																					
Zrn-01	226.1	16.05	0.071	0.0636	0.0071	0.682	0.068	0.0776	0.0023	0.0432	0.0075	-0.317	481.8	14	525	42	750	210	481.8	14	8.2
Zrn-02	232	86.2	0.372	0.0678	0.0052	0.718	0.045	0.0766	0.002	0.0279	0.0023	-0.476	475.8	12	548	27	830	160	475.8	12	13.2
Zrn-03	515	166.1	0.323	0.0614	0.0036	0.623	0.031	0.07301	0.0018	0.0232	0.0019	0.335	454.3	11	494	18	658	120	454.3	11	8.0
Zrn-05	270.1	21.16	0.078	0.0764	0.0082	0.885	0.086	0.0843	0.003	0.082	0.014	0.086	522	18	639	46	1140	220	522	18	18.3
Zrn-06	212	35.41	0.167	0.0663	0.005	1.059	0.069	0.1147	0.0034	0.0492	0.0053	-0.045	700	19	731	33	790	150	700	19	4.2
Zrn-07	182.1	168.1	0.923	0.0583	0.0044	0.605	0.039	0.0746	0.0021	0.02205	0.0017	-0.072	463.5	12	483	25	550	160	463.5	12	4.0
Zrn-08	501	163	0.325	0.0823	0.0042	2.459	0.1	0.213	0.0056	0.0738	0.0059	0.399	1245	30	1260	30	1249	100	1245	30	1.2
Zrn-09	41.9	34.6	0.826	0.0749	0.0061	1.535	0.11	0.147	0.0048	0.0474	0.0043	-0.068	884	27	939	43	1020	170	884	27	5.9

Zrn-10	260	12.22	0.047	0.0688	0.0055	0.793	0.052	0.0831	0.0031	0.086	0.014	-0.182	515	18	591	29	870	160	515	18	12.9
Zrn-11	122.7	37.8	0.308	0.0818	0.0045	2.392	0.1	0.2058	0.0057	0.0638	0.0051	0.264	1206	30	1238	31	1252	120	1206	30	2.6
Zrn-12	487.8	60.8	0.125	0.056	0.0037	0.582	0.033	0.07371	0.0017	0.026	0.0025	-0.093	458.5	10	465	21	450	150	458.5	10	1.4
Zrn-13	333	21.2	0.064	0.0561	0.0033	0.586	0.027	0.07501	0.0018	0.0342	0.0036	0.250	466.2	11	468	17	445	130	466.2	11	0.4
Zrn-15	432	46.8	0.108	0.0574	0.0036	0.601	0.031	0.0764	0.0019	0.0275	0.0028	0.073	474.3	12	477	20	489	140	474.3	12	0.6
Zrn-16	629	155	0.246	0.0677	0.004	0.71	0.033	0.0765	0.002	0.0303	0.0023	0.511	475.4	12	544	20	851	120	475.4	12	12.6
Zrn-17	273.2	14.09	0.052	0.0574	0.0047	0.592	0.043	0.074	0.0023	0.045	0.008	0.041	460	14	476	26	510	180	460	14	3.4
Zrn-18	33.7	11.59	0.344	0.111	0.011	2.66	0.24	0.1707	0.0075	0.12	0.013	0.267	1015	42	1309	65	1830	160	1015	42	22.5
Zrn-19	58.8	17.59	0.299	0.0832	0.0057	2.46	0.16	0.2135	0.0059	0.0659	0.0066	0.089	1247	31	1254	47	1248	130	1247	31	0.6
Zrn-20	315	83.1	0.264	0.0594	0.0038	0.586	0.032	0.07072	0.0018	0.0274	0.0025	0.288	440.5	11	467	21	570	150	440.5	11	5.7
Zrn-21	77.7	67.48	0.868	0.0871	0.0049	2.743	0.13	0.2283	0.006	0.0676	0.0047	0.508	1325	32	1340	37	1359	100	1325	32	1.1
Zrn-22	60.2	40	0.664	0.0847	0.005	2.678	0.13	0.2262	0.0061	0.069	0.0052	0.257	1314	32	1319	35	1327	110	1314	32	0.4
Zrn-23	350	139	0.397	0.0599	0.0041	0.623	0.033	0.07546	0.0018	0.0236	0.002	-0.485	469	11	491	21	570	150	469	11	4.5
Zrn-24	632	56.4	0.089	0.0618	0.0036	0.613	0.03	0.0713	0.0019	0.0386	0.0045	0.341	444	11	485	19	658	120	444	11	8.5
Zrn-25	240	37	0.154	0.0577	0.0039	0.628	0.037	0.07829	0.002	0.0294	0.0027	0.131	485.9	12	493	23	510	160	485.9	12	1.4
Zrn-26	200	169.8	0.849	0.0618	0.0037	0.88	0.044	0.1031	0.0026	0.0316	0.0023	0.346	632.5	15	642	23	674	120	632.5	15	1.5
Zrn-27	572	60.5	0.106	0.061	0.0039	0.63	0.034	0.07484	0.0018	0.0354	0.003	0.002	465.3	11	495	21	619	140	465.3	11	6.0
Zrn-28	210.8	28.8	0.137	0.0635	0.005	0.728	0.055	0.0808	0.0024	0.0385	0.0044	-0.011	501	14	553	32	730	180	501	14	9.4
Zrn-29	341.2	36.7	0.108	0.0569	0.0036	0.617	0.033	0.0775	0.002	0.0316	0.003	0.071	481.4	12	491	19	494	130	481.4	12	2.0
Zrn-30	259	67.3	0.260	0.087	0.0045	2.813	0.11	0.2336	0.0058	0.0683	0.0049	0.299	1353	30	1357	30	1352	100	1353	30	0.3
Zrn-31	117.4	23.1	0.197	0.0699	0.0083	0.745	0.076	0.0796	0.0025	0.0381	0.0048	-0.198	494	15	581	44	900	240	494	15	15.0
Zrn-32	186	56.5	0.304	0.0711	0.0042	1.516	0.071	0.1554	0.0039	0.0476	0.0038	-0.029	931	22	938	28	939	120	931	22	0.7
Zrn-33	459	15.51	0.034	0.069	0.004	1.413	0.066	0.1479	0.0038	0.0455	0.006	0.286	889	21	893	28	905	130	889	21	0.4
Zrn-34	294	19.12	0.065	0.0633	0.0057	0.837	0.068	0.0953	0.0026	0.0597	0.0076	-0.086	586.7	15	623	34	720	180	586.7	15	5.8
Zrn-35	15.38	5.7	0.371	0.086	0.018	1.89	0.37	0.163	0.011	0.055	0.013	-0.250	971	59	1070	140	1300	440	971	59	9.3
Zrn-36	260.8	32.6	0.125	0.0565	0.0036	0.58	0.031	0.0742	0.0019	0.0238	0.0025	0.043	461.1	12	463	19	441	140	461.1	12	0.4
Zrn-37	176.7	24.73	0.140	0.0579	0.005	0.625	0.046	0.0801	0.0023	0.0293	0.0033	0.107	496.6	14	496	31	470	180	496.6	14	-0.1
Zrn-38	250.5	72.3	0.289	0.0723	0.0042	1.615	0.076	0.1602	0.0039	0.0513	0.0043	0.092	958	22	974	29	1002	110	958	22	1.6
Zrn-39	281.7	184.8	0.656	0.0575	0.0036	0.604	0.032	0.07604	0.0018	0.0233	0.0018	0.173	472.4	11	479	20	500	140	472.4	11	1.4
Zrn-40	103.8	43.4	0.418	0.094	0.0075	3.1	0.22	0.2377	0.0091	0.0565	0.0052	0.484	1374	47	1429	56	1490	150	1374	47	3.8

1: U and Th concentrations are calculated employing an external standard zircon as in Paton et al., 2010, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*.

2: 2 sigma uncertainties propagated according to Paton et al., 2010, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 207Pb/206Pb ratios, ages and errors are calculated according to Petrus and Kamber, 2012, *Geostandards Geoanalytical Research*.

Analyzed spots were __ micrometers, using an analytical protocol modified from Solari et al., 2010, *Geostandards Geoanalytical Research*. Data measured employing a Thermo iCapQc ICPMS coupled to a Resonetics, Resolution M050 excimer laser workstation.

ANEXO D: Análisis U–Pb en apatitos mediante LA–ICP–MS

Muestra	Ngr-Apatito	<i>Relaciones corregidas</i>				Rho
		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 2\sigma$ abs	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 2\sigma$ abs	
Px-1	Ap-px1-01	9.76	0.2	0.1377	0.0029	0.0083537
Px-1	Ap-px1-02	8.28	0.16	0.1218	0.0026	-0.010711
Px-1	Ap-px1-03	13.39	0.21	0.168	0.0035	0.0049446
Px-1	Ap-px1-04	5.397	0.083	0.0958	0.0022	-0.25047
Px-1	Ap-px1-05	17.27	0.23	0.2007	0.0046	-0.024618
Px-1	Ap-px1-06	17.08	0.31	0.1978	0.0042	0.12618
Px-1	Ap-px1-07	17.28	0.35	0.2007	0.0041	-0.021834
Px-1	Ap-px1-08	34.63	0.67	0.3553	0.0073	-0.0054765
Px-1	Ap-px1-09	11.13	0.14	0.1452	0.0033	-0.010431
Px-1	Ap-px1-10	12.56	0.22	0.158	0.0034	0.093693
Px-1	Ap-px1-11	10.51	0.15	0.1406	0.0032	-0.010962
Px-1	Ap-px1-12	19.97	0.32	0.2272	0.0047	-0.16474
Px-1	Ap-px1-13	20.42	0.5	0.2295	0.0074	-0.13244
Px-1	Ap-px1-14	12.09	0.22	0.1553	0.0033	-0.24807
Px-1	Ap-px1-15	10.89	0.2	0.1464	0.0033	-0.26905
Px-1	Ap-px1-16	9.15	0.15	0.1295	0.0028	-0.073496
Px-1	Ap-px1-17	5.982	0.08	0.1021	0.0022	-0.16691
Px-1	Ap-px1-18	25.54	0.46	0.2766	0.006	0.06987
Px-1	Ap-px1-19	9.23	0.15	0.1281	0.0028	-0.17497
Px-1	Ap-px1-20	27.82	0.46	0.2881	0.0059	-0.32982
Px-1	Ap-px1-21	10.24	0.2	0.1418	0.0029	-0.21182
Px-1	Ap-px1-22	15.42	0.28	0.1885	0.004	-0.0089717
Px-1	Ap-px1-23	13.03	0.27	0.1634	0.0036	-0.057531
Px-1	Ap-px1-24	6.05	0.11	0.1016	0.0025	-0.076739
Px-1	Ap-px1-25	17.14	0.29	0.2033	0.0043	0.052465
Px-1	Ap-px1-26	12.8	0.25	0.1624	0.0035	0.16777
Px-1	Ap-px1-27	10.3	0.15	0.1406	0.003	-0.032697
Px-1	Ap-px1-28	8.1	0.13	0.1205	0.003	0.0057483
Px-1	Ap-px1-29	8.41	0.15	0.124	0.0027	-0.24078
Px-1	Ap-px1-30	19.72	0.36	0.2211	0.0049	-0.088971
Px-1	Ap-px1-31	7.87	0.14	0.1192	0.0025	-0.19716
Px-1	Ap-px1-32	17.15	0.19	0.2007	0.0043	-0.20503
Px-1	Ap-px1-33	12.14	0.26	0.1566	0.0036	-0.028086
Px-1	Ap-px1-34	17.92	0.31	0.2055	0.0046	-0.12462
Px-1	Ap-px1-35	14.51	0.19	0.1781	0.0042	-0.078568
Px-1	Ap-px1-36	9.41	0.11	0.1362	0.0029	-0.10523
Px-1	Ap-px1-37	13.44	0.2	0.1678	0.0037	-0.17608

Px-1	Ap-px1-38	12.62	0.24	0.1586	0.0037	0.029052
Px-1	Ap-px1-39	34.5	1.3	0.3543	0.0097	0.4117
Px-1	Ap-px1-40	4.971	0.098	0.0941	0.0022	0.18143
Px-1	Ap-px1-41	28.62	0.46	0.3068	0.0065	0.23809
Px-1	Ap-px1-42	11.26	0.23	0.1553	0.0034	-0.10085
Px-1	Ap-px1-43	11.35	0.22	0.1481	0.0031	0.083558
Px-1	Ap-px1-44	8.131	0.086	0.1232	0.0028	-0.04619
Px-1	Ap-px1-45	13.13	0.27	0.1649	0.0036	0.093958
Px-1	Ap-px1-46	14.4	0.26	0.1758	0.0037	-0.17492
Px-1	Ap-px1-47	24.27	0.48	0.2618	0.0054	0.17842
Px-1	Ap-px1-48	10.42	0.18	0.1408	0.003	-0.0126
Px-1	Ap-px1-49	10.13	0.16	0.139	0.0036	-0.16233
Px-1	Ap-px1-50	8.98	0.16	0.1313	0.0029	-0.081262

Relaciones corregidas

Muestra	Ngr-Apatito	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 2\sigma$ abs	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 2\sigma$ abs	Rho
Pxt-07	Ap-pxt7-01	5.67	0.12	0.0987	0.0028	0.79279
Pxt-07	Ap-pxt7-02	12.38	0.53	0.1519	0.0065	0.78707
Pxt-07	Ap-pxt7-03	6.595	0.095	0.1071	0.0031	0.29232
Pxt-07	Ap-pxt7-04	8.13	0.14	0.1187	0.0034	-0.19123
Pxt-07	Ap-pxt7-05	5.6	0.14	0.0977	0.0028	0.26791
Pxt-07	Ap-pxt7-06	6.07	0.1	0.1024	0.003	0.16346
Pxt-07	Ap-pxt7-07	7.15	0.17	0.1109	0.0033	0.035453
Pxt-07	Ap-pxt7-08	5.18	0.1	0.0935	0.0027	0.27457
Pxt-07	Ap-pxt7-09	7.62	0.12	0.1154	0.0031	0.15746
Pxt-07	Ap-pxt7-10	7.08	0.12	0.1088	0.003	0.26704
Pxt-07	Ap-pxt7-11	6.68	0.11	0.109	0.0031	0.1744
Pxt-07	Ap-pxt7-12	6.32	0.11	0.1024	0.003	0.24263
Pxt-07	Ap-pxt7-13	16.48	0.26	0.1845	0.0059	-0.09917
Pxt-07	Ap-pxt7-15	6.175	0.082	0.104	0.003	0.18576
Pxt-07	Ap-pxt7-16	5.79	0.14	0.102	0.003	0.32851
Pxt-07	Ap-pxt7-17	6.04	0.1	0.1024	0.0029	0.12964
Pxt-07	Ap-pxt7-18	5.164	0.082	0.0952	0.0026	0.20043
Pxt-07	Ap-pxt7-19	5.79	0.1	0.0984	0.0029	0.24449
Pxt-07	Ap-pxt7-20	6.44	0.11	0.1068	0.003	0.21382
Pxt-07	Ap-pxt7-21	39.61	0.84	0.382	0.013	0.35383
Pxt-07	Ap-pxt7-22	4.646	0.07	0.0895	0.0024	-0.084958
Pxt-07	Ap-pxt7-24	10.75	0.19	0.1422	0.0046	0.12533
Pxt-07	Ap-pxt7-25	177.9	4.8	1.52	0.057	0.65698
Pxt-07	Ap-pxt7-26	8.2	0.16	0.1203	0.0036	0.2933
Pxt-07	Ap-pxt7-27	10.51	0.18	0.1431	0.004	0.15479

Pxt-07	Ap-pxt7-28	12.06	0.28	0.1537	0.005	0.34795
Pxt-07	Ap-pxt7-29	25.15	0.49	0.2633	0.0089	0.39525
Pxt-07	Ap-pxt7-30	5.85	0.11	0.1032	0.0028	0.18254
Pxt-07	Ap-pxt7-31	4.532	0.066	0.09027	0.0023	0.15478
Pxt-07	Ap-pxt7-32	8.8	0.16	0.1272	0.0038	0.098741
Pxt-07	Ap-pxt7-33	11.02	0.24	0.1498	0.0048	0.16151
Pxt-07	Ap-pxt7-34	20.18	0.45	0.2233	0.0074	0.56393
Pxt-07	Ap-pxt7-35	9.05	0.14	0.1294	0.0038	0.25024
Pxt-07	Ap-pxt7-36	13.99	0.26	0.1734	0.005	0.11886
Pxt-07	Ap-pxt7-37	5.82	0.11	0.1034	0.003	0.11882
Pxt-07	Ap-pxt7-38	7.95	0.16	0.1211	0.0033	0.45976
Pxt-07	Ap-pxt7-39	5.279	0.084	0.0992	0.0027	0.1675
Pxt-07	Ap-pxt7-40	6.63	0.12	0.1119	0.0032	0.22578

Relaciones corregidas

Muestra	Ngr-Apatito	²⁰⁷Pb/²³⁵U	±2σ abs	²⁰⁶Pb/²³⁸U	±2σ abs	Rho
Pxt-9b	Ap-pxt9b-01	20.57	0.46	0.2313	0.0061	0.87124
Pxt-9b	Ap-pxt9b-02	49.28	0.85	0.4902	0.011	0.67047
Pxt-9b	Ap-pxt9b-03	48.61	0.63	0.479	0.011	0.38003
Pxt-9b	Ap-pxt9b-04	40.81	0.45	0.4108	0.0099	0.35681
Pxt-9b	Ap-pxt9b-06	36.8	0.45	0.3765	0.0084	0.24396
Pxt-9b	Ap-pxt9b-07	11.37	0.15	0.152	0.0033	0.48262
Pxt-9b	Ap-pxt9b-08	11.79	0.15	0.1556	0.0035	0.38351
Pxt-9b	Ap-pxt9b-09	26.33	0.51	0.2864	0.0077	0.81501
Pxt-9b	Ap-pxt9b-10	51.8	0.83	0.5067	0.012	0.62162
Pxt-9b	Ap-pxt9b-11	12.75	0.4	0.1646	0.0045	0.8232
Pxt-9b	Ap-pxt9b-12	27.6	1.9	0.293	0.018	0.95844
Pxt-9b	Ap-pxt9b-13	59.2	3.8	0.562	0.034	0.96832
Pxt-9b	Ap-pxt9b-14	166.2	2.4	1.507	0.036	0.50037
Pxt-9b	Ap-pxt9b-15	38.65	0.45	0.3881	0.0082	0.44965
Pxt-9b	Ap-pxt9b-16	31.94	0.36	0.3306	0.0076	0.23072
Pxt-9b	Ap-pxt9b-17	28.34	0.59	0.2993	0.008	0.75303
Pxt-9b	Ap-pxt9b-18	377.1	9	3.311	0.084	0.74686
Pxt-9b	Ap-pxt9b-19	9.502	0.099	0.1339	0.0027	0.32285
Pxt-9b	Ap-pxt9b-20	155.9	5.6	1.383	0.059	0.90733
Pxt-9b	Ap-pxt9b-21	27.59	0.37	0.2856	0.007	0.55631
Pxt-9b	Ap-pxt9b-22	22.77	0.35	0.248	0.0055	0.5559
Pxt-9b	Ap-pxt9b-23	12.16	0.15	0.1558	0.0033	0.33521
Pxt-9b	Ap-pxt9b-24	54.78	0.67	0.5146	0.012	0.35347
Pxt-9b	Ap-pxt9b-25	21.85	0.87	0.2433	0.01	0.93102
Pxt-9b	Ap-pxt9b-26	59.9	1.2	0.573	0.016	0.77202

Pxt-9b	Ap-pxt9b-27	170.5	2.5	1.483	0.036	0.55762
Pxt-9b	Ap-pxt9b-28	38.41	0.8	0.3762	0.0095	0.55785
Pxt-9b	Ap-pxt9b-29	126.8	1.9	1.148	0.026	0.59727
Pxt-9b	Ap-pxt9b-31	94.9	1.7	0.853	0.022	0.50366
Pxt-9b	Ap-pxt9b-32	30.88	0.47	0.3104	0.0065	0.56823
Pxt-9b	Ap-pxt9b-33	21.61	0.52	0.2372	0.0062	0.65492
Pxt-9b	Ap-pxt9b-34	28.66	0.67	0.2922	0.0076	0.75394
Pxt-9b	Ap-pxt9b-35	18.17	0.46	0.2081	0.0059	0.7731
Pxt-9b	Ap-pxt9b-36	34.18	0.49	0.3385	0.008	0.6667
Pxt-9b	Ap-pxt9b-37	16.85	0.34	0.194	0.0049	0.62944
Pxt-9b	Ap-pxt9b-38	52.8	0.84	0.4969	0.012	0.65754
Pxt-9b	Ap-pxt9b-39	100.3	2	0.893	0.024	0.59006
Pxt-9b	Ap-pxt9b-40	30.83	0.38	0.3167	0.007	0.22774

Relaciones corregidas

Muestra	Ngr-Apatito	<i>Relaciones corregidas</i>				Rho
		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 2\sigma$ abs	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 2\sigma$ abs	
Pxt-11	Ap-pxt11-01	48.39	0.56	0.4783	0.013	0.4985
Pxt-11	Ap-pxt11-02	83.1	1.2	0.7787	0.021	0.74069
Pxt-11	Ap-pxt11-03	48.16	0.8	0.4719	0.014	0.67066
Pxt-11	Ap-pxt11-04	81.4	1.2	0.769	0.022	0.6657
Pxt-11	Ap-pxt11-05	12.96	0.27	0.1694	0.0046	0.75978
Pxt-11	Ap-pxt11-06	31.33	0.45	0.3296	0.0093	0.62186
Pxt-11	Ap-pxt11-07	64.5	1.2	0.613	0.018	0.8473
Pxt-11	Ap-pxt11-09	88.6	2.8	0.832	0.036	0.91757
Pxt-11	Ap-pxt11-11	40.08	0.46	0.4001	0.011	0.1736
Pxt-11	Ap-pxt11-12	61.76	0.92	0.589	0.018	0.76418
Pxt-11	Ap-pxt11-13	127	2.3	1.159	0.038	0.77565
Pxt-11	Ap-pxt11-14	168.3	3.1	1.513	0.046	0.82146
Pxt-11	Ap-pxt11-15	43	2.5	0.432	0.024	0.96252
Pxt-11	Ap-pxt11-17	39.75	0.54	0.3915	0.012	0.65751
Pxt-11	Ap-pxt11-18	80.6	1.2	0.751	0.021	0.63068
Pxt-11	Ap-pxt11-20	93.1	9.5	0.869	0.088	0.99266
Pxt-11	Ap-pxt11-22	37	7.8	0.364	0.077	0.98843
Pxt-11	Ap-pxt11-23	48.16	0.53	0.4666	0.013	0.33471
Pxt-11	Ap-pxt11-24	2334	88	20.17	0.93	0.94346
Pxt-11	Ap-pxt11-25	84.7	1.1	0.78	0.023	0.66798
Pxt-11	Ap-pxt11-26	33.5	1.1	0.34	0.012	0.86903
Pxt-11	Ap-pxt11-29	224.6	4.4	2.001	0.066	0.80458
Pxt-11	Ap-pxt11-32	1326	98	11.2	1.1	0.69873
Pxt-11	Ap-pxt11-34	908	24	7.87	0.28	0.90715
Pxt-11	Ap-pxt11-35	64.8	1	0.6111	0.017	0.67729

Pxt-11	Ap-pxt11-36	9.7	0.1	0.1369	0.0035	0.10479
Pxt-11	Ap-pxt11-38	95.6	2.8	0.887	0.031	0.88463
Pxt-11	Ap-pxt11-39	396	23	3.45	0.24	0.97442

ANEXO E: Análisis geoquímico de apatitos mediante LA-ICP-MS

Muestra Px-1																			
Ngr-Apatito	Cl (ppm)	Sr (ppm)	Y (ppm)	La (ppm)	Ce (ppm)	Pr (ppm)	Nd (ppm)	Sm (ppm)	Eu (ppm)	Gd (ppm)	Tb (ppm)	Dy (ppm)	Ho (ppm)	Er (ppm)	Tm (ppm)	Yb (ppm)	Lu (ppm)	Th (ppm)	U (ppm)
Ap-px1-01	1082	276	2353	188.9	711.9	124.1	689.6	351.9	38.18	418.6	85.09	550.1	92.06	239.7	34.7	228.8	28.21	7.538	75.48
Ap-px1-02	1151	694.5	1154	150.1	511.5	86.3	492.9	238.6	25.62	300.7	53.86	323	51.82	117.3	13	63.8	6.96	6.674	56.21
Ap-px1-03	538	456.2	2682	203	750.1	129.9	728.5	363.1	37.22	454.2	89.25	589.1	102.92	261.2	35.35	216.6	25.53	7.216	82.85
Ap-px1-04	374	262.8	615.8	63.76	226.6	39.39	221.6	115.7	10.95	148.1	27.43	171.4	27.75	67.5	8.87	52.32	6.21	11.83	67.84
Ap-px1-05	1339	369.3	1470	182.8	582.4	93.6	498.6	246.6	26.93	289	58.51	364.3	58.52	147	20.89	127.4	15.16	6.33	57.49
Ap-px1-06	380	236.4	2195	215.3	767	129	704.4	340.5	31.38	414.8	80.41	520.2	89.3	226.7	30.96	187.5	23.04	9.88	62.63
Ap-px1-07	465	443	2291	188	727.8	129.6	751.6	343.1	30.01	425.2	79.67	518.4	91.15	227.5	31.06	196.9	24.69	5.564	80.14
Ap-px1-08	772	269.3	1662	142.7	545.4	94.8	542	260.7	28.92	328.4	62.42	399.5	68.77	172	23.33	145.3	18.1	3.842	64.31
Ap-px1-09	840	697.1	2799	218.2	785.3	134.8	775.1	346.2	41.33	454.8	86.36	578.2	107.3	266.8	31.58	165.2	18.37	8.849	72.36
Ap-px1-10	458	766.8	2201	206.8	718.3	121.5	676.9	318.6	41.12	402.1	77.72	503.4	88.41	219	28.31	165.8	19.39	5.859	75.53
Ap-px1-11	534	803.7	1268	125.3	438.2	75.14	414.7	213.7	29	262.2	51.25	322.1	52.4	129.2	18.06	112.9	13.88	1.576	48.58
Ap-px1-12	298	113.7	2138	194.5	749.8	127.6	686.1	338.4	26.04	393.2	78.77	506.7	85.6	223.8	32.71	213	26.68	6.083	66
Ap-px1-13	409	404.9	1333	109.5	420.8	75.1	416.9	215.8	23.99	261.9	51.82	328.9	54.74	140.1	19.99	126.2	15.76	2.41	55
Ap-px1-14	732	436.9	2371	191.3	633.7	108	631.1	300.9	29.22	413.9	78.89	524.5	95.81	231.2	27.63	158.6	18.83	5.672	79.05
Ap-px1-15	1000	148.7	1735	67	331.1	66	398	236.4	21.05	293.1	61.69	403	66.86	178.1	27.31	189.2	24.03	1.813	51.84
Ap-px1-16	611	457.1	2201	183.5	683.2	120.3	690.3	331.2	30.65	408.3	79.39	519.9	90.29	224.4	28.77	170.5	20.33	6.497	99.42
Ap-px1-17	354	468.3	1361	140	501.6	84.75	471.3	236.3	23.19	287.6	56.52	351	57.58	141.6	19.5	121.1	14.89	9.264	102.31
Ap-px1-18	352	123.3	2648	240.7	871	148.7	812.5	395.1	43.04	472.8	93.82	609.1	105.11	276.2	37.99	235.8	28.87	7.68	37.06
Ap-px1-19	244	480.9	1938	219.4	814	140.4	796.2	324.1	30.82	395.4	70	448.2	79.41	190.3	23.11	132.4	16.09	4.677	69.3
Ap-px1-20	457	189.5	3002	202	786.7	141.7	810.8	353.2	47.68	484.8	91.81	625.3	118.01	290.5	33.78	178.6	20.93	5.992	46.04
Ap-px1-21	702	211.7	2372	177.5	703	124.5	706.2	340.3	29.33	421.9	82.87	542.4	94.66	241.5	33.69	217.1	27.14	5.365	100.56
Ap-px1-22	430	318.3	2341	220.2	815.7	141.9	816	378.3	40.23	449.7	85.56	546.7	92.88	235.3	33.31	209.7	25.92	8.81	83.51
Ap-px1-23	849	508.2	2313	177.5	673.2	120.9	675.1	332.7	46.26	407.4	80.02	525.4	91.86	234.4	30.79	178.9	21.28	7.867	68.96
Ap-px1-24	598	472.1	1499	151.2	596.2	109.9	671.1	278.7	25.5	356.2	61.05	382.8	66.69	164.9	21.02	124.8	15.44	13.38	77.99

Ap-px1-25	504	154.7	2464	187.7	734.2	131.8	737.8	367	32.93	451.4	88.15	572.4	97.63	249.7	35.03	227.4	28.29	9.56	67.09
Ap-px1-26	661	237.6	1727	150.7	580.6	103	563.1	298.1	25.41	338.5	68.28	431.5	70.11	177.2	26.1	170.4	20.98	4.947	64.62
Ap-px1-27	950	705.1	2115	219.3	778.7	136.1	764	355.8	40.33	429.9	81.43	513.8	86.07	211.1	27.84	167.5	20.42	11.14	93.54
Ap-px1-28	572	678.9	1957	201.3	747.2	134.3	776.3	320.5	32.54	399.6	71.34	457.7	79.69	191.4	24.03	131.8	14.91	7.51	83.14
Ap-px1-29	182	736.5	2217	213	698.1	116	662.3	304.3	38.11	399	75.44	495	88.38	219.3	26.61	138.4	15.12	9.118	84.3
Ap-px1-30	206	292	1636	153.1	560	97.5	524.1	264.4	24.38	311.7	62.06	396.7	65.75	168.9	24.43	158.1	19.41	3.543	55.14
Ap-px1-31	693	314.3	2343	167.9	679.9	123.3	695.6	352.1	35.49	431.9	84.27	552.3	93.78	236.1	31.93	189.2	22.25	6.623	87.78
Ap-px1-32	682	592	2259	192.8	707.5	124.2	704	309.2	26.41	396.6	75.78	504.3	89.43	219.5	27.25	157	18.4	4.749	61.93
Ap-px1-33	356	532	2549	216.8	767	134.5	783	345.3	31.74	459.4	85.89	563.9	102.3	247.6	29.17	165.8	20.03	4.25	60.99
Ap-px1-34	230	553.3	1700	179.3	644.8	110	601.7	280.2	29.48	339.3	63.95	408.4	69.55	171	21.88	120.9	13.74	5.098	33.8
Ap-px1-35	500	586.3	1529	167.1	551.2	93.8	502.7	252.5	35.17	303.3	59.88	380.1	62	158.5	22.66	147.3	18.41	5.589	48.55
Ap-px1-36	1135	428.4	2356	176.5	645.7	116.3	659.1	332.9	37.71	417.4	81.61	535.2	93.31	238.4	32.09	186.8	21.04	6.339	111.37
Ap-px1-37	481	701.7	2879	246.8	865.5	151.5	867	361.6	40.11	486.4	88.19	583	107.75	267.4	32.37	187	22.59	3.702	63.35
Ap-px1-38	135	394.9	1979	172.3	656.5	118.4	697.6	293.7	21.69	384.8	68.56	449.5	82.15	201.6	23.96	139.3	17.52	4.212	33.7
Ap-px1-39	897	194.3	2710	57.27	269.1	58.01	400.8	211.2	10.44	356.2	69.01	498.6	103.46	274.9	32.64	170.7	20.61	2.22	12.3
Ap-px1-40	535	351.7	574.8	89.5	288.6	47.29	270.1	119.1	13.19	157.1	27.17	164.6	27.73	63.52	6.59	30.26	3.354	7.6	51.57
Ap-px1-41	180	179.4	2678	242.9	866.2	149.2	799.7	362.1	52.12	455.8	88.37	588.2	106.28	273.7	35.72	200.9	24.06	5.901	37.35
Ap-px1-42	256	229.7	2332	194.2	728.4	126.2	683.7	346.4	36.28	417.8	84.09	543.2	90.66	236.2	34	220.2	27.14	6.779	77
Ap-px1-43	408	528.4	2337	216.4	843.1	152.2	857.8	355.8	31.46	443.9	81.14	516.8	91.26	220.7	29.11	174.3	21.23	6.627	62.62
Ap-px1-44	1355	464.2	2527	195.1	777.5	140.8	817.5	367.9	36.29	467.2	89.07	576.2	100.55	242.3	28.49	157.8	18.25	5.787	106.13
Ap-px1-45	537	576.1	2524	284.2	1028.3	181.5	1012	398.9	43.51	484.8	86.52	555.3	98.1	243.2	31.93	198.3	24.72	5.72	74.42
Ap-px1-46	486	351.9	1812	160.9	596.9	104.9	571.8	289.7	29.47	338.6	68.3	440.8	72.54	187.2	27.04	171.9	21.08	3.192	52.13
Ap-px1-47	400	245.1	2304	179.1	686.8	123.3	704.1	332	31.82	419.5	79.98	523.2	91.76	228.4	30.88	196.2	24.53	3.006	68.03
Ap-px1-48	582	396.6	2109	149.4	588.6	107.6	588.5	311	34.57	370.2	75.98	489.1	81.6	209.8	30.49	195.3	24.17	3.829	84.04
Ap-px1-49	631	476.9	1887	215	703.6	116.5	618.9	296.3	32.63	367.3	70.94	454.8	77.76	191.8	23.3	121.4	13.1	13.29	60.43
Ap-px1-50	773	392.3	2104	161.2	617.7	112	633.3	316.1	31.27	400.2	77.34	495.3	84.73	212.9	28.61	173.6	20.89	9.55	73

Muestra Pxt-5

Ngr-Apatito	Cl (ppm)	Sr (ppm)	Y (ppm)	La (ppm)	Ce (ppm)	Pr (ppm)	Nd (ppm)	Sm (ppm)	Eu (ppm)	Gd (ppm)	Tb (ppm)	Dy (ppm)	Ho (ppm)	Er (ppm)	Tm (ppm)	Yb (ppm)	Lu (ppm)	Th (ppm)	U (ppm)
Ap-pxt5-01	810	145.6	2830	144.2	655.5	128.8	791.2	369	18.4	487.6	90.09	586.1	108.93	276.7	35.01	209.1	25.82	11.722	27.28
Ap-pxt5-02	422	187.4	1827	33.08	192.4	45.88	329.6	181.8	13.17	277.1	52.17	352.3	69.43	182.8	24.16	143.8	18.82	3.862	15.28
Ap-pxt5-03	568	145.3	2330	129.9	577	111.6	678	313	15.99	411	75.1	485	89.6	223	28.1	162.7	19.9	6.9	17.7
Ap-pxt5-04	610	183.8	2293	59.7	341.4	76.23	518.8	273.2	16.29	394	72.81	486.2	90.24	229	28.5	162.4	19.94	7.635	25.46
Ap-pxt5-05	808	165.3	3841	173.1	766.6	152.7	932.2	447.8	26.43	613.3	115.34	771.2	147.1	377.6	47.59	272.6	33.24	21.1	43.13
Ap-pxt5-06	546	153.6	2570	147.3	638	123.2	741	344.8	19.29	460	83.3	545	100.3	255	31.67	181.9	22.31	10.77	25.8
Ap-pxt5-07	548	142.2	3053	204.1	847.4	160.7	917	410.1	18.71	522.5	94.25	623.1	117.3	300.8	38.47	222.6	27.79	13.89	21.59
Ap-pxt5-08	528	170.1	2889	162.5	716.4	140.8	843	377.4	20.19	494.1	90	590.2	111.1	281.6	34.29	187.4	22.51	13.27	23.93
Ap-pxt5-09	649	122.7	3340	263.7	1023.4	187.3	1078	451.3	26.12	567.3	101.56	669.9	126.7	324	39.94	220.7	27.18	9.09	24.33
Ap-pxt5-10	823	105.8	3279	243.5	964	174.8	981.3	433.8	23.57	546.3	99.38	666.7	123.3	320.1	39.86	228.8	28.2	10.02	24.76
Ap-pxt5-11	497	196.9	3851	145.2	718	148	916	447.8	22.16	586.3	109.9	749	143.9	400.6	55.48	339.7	45.6	21.92	40.02
Ap-pxt5-12	498	182.3	3148	197.5	856.9	161.3	940	426.2	21.03	545.7	99.7	662	122.2	315.4	40.59	231.5	28.47	16.71	30.8
Ap-pxt5-13	437	215.7	2818	87.7	448.3	96.5	630.2	323.8	18.25	451.9	84.65	574	109.2	282	36.24	206.2	26.11	14.71	28.79
Ap-pxt5-14	371	275.4	2650	22.76	119.2	29.49	222.9	148.2	9.57	274	57.2	438	94.1	257.3	31.61	154.3	17.62	9.93	20.05
Ap-pxt5-15	372	261.2	1061	252	854	141	786	224.2	4.7	249.9	32.5	196.5	39.48	106.3	12.85	65.6	8.48	10.19	10.79
Ap-pxt5-16	533	164.6	2666	117.3	557.1	112.5	688.6	337.3	16.23	448.1	82.52	551.5	104.2	270.9	34.9	202.2	26.46	8.39	26.6
Ap-pxt5-17	404	209.2	1575	74.6	321.2	63.4	399.3	188.2	10.38	262.3	47.61	318.4	61.01	154.4	18.44	100.8	12.69	4.32	11.76
Ap-pxt5-18	539	142.1	2892	185.5	764	142.4	836	377.9	20.15	492.8	89.69	594.5	112.1	284.3	36.85	213.3	27.06	13.22	25.43
Ap-pxt5-19	490	211.2	1305	22.34	114.9	26.26	193.7	114.3	10.54	188.1	36.31	250.5	49.5	129.5	16.56	90.2	11.53	2.57	11.81
Ap-pxt5-20	674	188	2808	57.3	298	64.6	441	238.5	10.7	363	70.86	506.6	103.3	273.4	35.2	191.7	23.98	6.44	16.42
Ap-pxt5-21	431	277.4	1373	9.2	51.2	12.94	107.6	80.2	9.94	157.8	32.87	243.9	51.13	135	16.46	83.9	10.25	4.737	13.16
Ap-pxt5-22	461	179	967	93.2	361.4	64.8	377.9	157.7	10.53	206.2	34.64	221.8	40.6	97.8	11.52	59.4	7.41	1.252	5.66
Ap-pxt5-23	470	175.8	2199	102.9	482.2	95.8	603.2	287	15.04	381.5	68.52	457.4	86.3	222.8	29.3	172.8	22.75	7.13	21.64
Ap-pxt5-24	434	232.6	1859	42.67	212.5	45.94	319.9	173.5	9.97	268.4	50.19	341.9	67.94	177	22.34	121.4	14.97	4.97	15.89
Ap-pxt5-25	722	210.9	4648	453.7	1718	282.8	1608	619.5	28.6	803	140.9	952.9	182.7	470.1	60.83	343	42.47	48.5	78.76
Ap-pxt5-26	655	178.6	2144	35.32	196.6	45.92	334.2	189.5	24.17	296.9	57.78	400.4	80.6	218.9	29.1	172.6	23.36	6.82	20.62
Ap-pxt5-27	394	234.8	1636	15.5	87.03	20.98	158.2	103.2	6.67	182.1	36.07	265.8	56.5	163.3	21.86	126.9	16.98	4.717	13.44
Ap-pxt5-28	290	255.3	1979	81.46	444.2	98.4	643.8	319.2	15.1	415.5	72.85	452.9	78.4	181	19.96	98.4	11.16	6.89	16.96
Ap-pxt5-29	617	193.2	2950	86.6	443	92.9	609	305	14.8	435	81.1	549	110	289	38.3	225	29.9	22.5	32
Ap-pxt5-30	588	206.2	4496	211.2	988	198.2	1191	562	30.62	753	139.2	931	176.2	448.4	57	322.6	40.3	29.44	50.6
Ap-pxt5-31	622	162.1	3175	162.7	725	141.5	839	395	20.22	526	97.9	655	123	315.1	39.8	222.6	27.86	14.29	33.7
Ap-pxt5-32	733	231.7	4343	162	807	170.5	1042	492.2	27.07	677	124.8	859	167.6	442.1	52.9	285.8	34.7	36.7	45.7

Ap-pxt5-33	382	200.2	3320	148.3	713	145.2	877	417	19.8	561	103.4	687	127.7	333	42.7	244	30.4	17.5	38
Ap-pxt5-34	384	228.9	2167	48.1	221	48.32	335	171.2	8.43	280	53.44	383.2	79.9	220	27.54	150.3	18.03	8.44	18.92
Ap-pxt5-35	716	250.8	3561	96	525	120.1	798	428.7	24.85	613	115.2	751	141	361.8	44.5	249.9	30.95	25.59	44.6
Ap-pxt5-36	781	179.8	3310	146.3	701.6	143.6	882	410.1	21.8	565.5	104.1	695.5	131.4	335.7	41.62	234.7	29.1	20.8	38.69
Ap-pxt5-37	567	209.1	2090	76.8	359	75	473	231.7	12.71	338	61.3	414	79.4	209.7	25.93	146.8	18.73	259	23.35
Ap-pxt5-38	508	186	1509	37.82	211.4	48.82	331.7	176.8	10.57	257.9	47.3	311.4	59.11	152.1	18.59	102.9	12.86	3.37	12.29
Ap-pxt5-39	504	187.8	3730	104.7	534	114.9	739	381	18.52	542	103.3	713	139	382	51.8	312	40.5	20.1	44.7
Ap-pxt5-40	509	172.9	3359	153.4	743	150.1	901	414.2	21.52	552.7	102.5	682	127.1	330.3	41.37	236.3	29.64	14.82	29.44

Muestra Pxt-7

Ngr-Apatito	Cl (ppm)	Sr (ppm)	Y (ppm)	La (ppm)	Ce (ppm)	Pr (ppm)	Nd (ppm)	Sm (ppm)	Eu (ppm)	Gd (ppm)	Tb (ppm)	Dy (ppm)	Ho (ppm)	Er (ppm)	Tm (ppm)	Yb (ppm)	Lu (ppm)	Th (ppm)	U (ppm)
Ap-pxt7-01	1257	306.2	4443	43.81	234.4	61.03	528.7	308.8	30.2	525.3	97.88	717.5	154.4	447	59.37	347.2	45.96	33.38	38.96
Ap-pxt7-02	626	394.5	1887	9.91	58.7	16.72	169.9	163.1	45.81	378.7	71.4	444.6	69.4	132.3	11.75	47.2	4.44	1.043	15.05
Ap-pxt7-03	1024	291	3078	60.01	248	55.18	442.4	232	31.52	395.5	69.65	498.1	107.28	298.6	37.09	197.2	26.28	26.93	32.16
Ap-pxt7-04	676	355.7	2411	120.1	402.5	71.9	485.5	210.7	47.89	331	55.55	383.3	82.01	228.5	28.37	156.7	22.27	14.81	28.14
Ap-pxt7-05	497	413.9	3868	28.94	189.4	54.21	529.7	328.2	37.15	608	105.5	719.9	143.4	352	34.58	136.1	13.86	22.63	38.05
Ap-pxt7-06	744	334.9	3662	136.7	489.7	90.6	603.7	293.8	73.01	481.2	87.78	618.3	126.1	329	37.44	183	21.9	28.98	34.25
Ap-pxt7-07	304	323.2	2054	2.48	19.82	6.67	76.5	75.06	13.34	205.6	40.8	323.3	74.73	213.1	25.36	135.4	18.43	15.75	26.56
Ap-pxt7-08	421	506.4	3294	128.2	425.6	76.54	522.4	248.3	57.53	425.6	75.27	537.9	116.38	315.7	38.25	194.5	24.55	25.11	37.21
Ap-pxt7-09	710	413.5	2245	148.3	504.7	85.42	540.6	216.8	66.47	324.2	53.98	368.5	78.32	216.1	27.26	154.6	21.9	26.51	32.07
Ap-pxt7-10	806	311.6	2541	46.14	191.2	42.28	357	197.3	29.75	340.8	60.58	427.3	91.19	251.4	30.52	160.2	20.84	22.9	27.19
Ap-pxt7-11	744	381.2	2620	249	774.5	126.5	778.8	291.4	48.15	407.5	66.6	447.2	93.2	243.7	28.26	139.2	16.56	28.56	34.14
Ap-pxt7-12	699	357.4	2717	82.5	316.8	64.76	476.9	233.3	48.11	372.6	64.33	447.2	94.81	258.3	32.06	172.3	22.76	26.73	34.42
Ap-pxt7-13	623	321.7	1148	1.414	12.48	4.68	59.3	61.5	9.35	152.9	28.09	207	45.02	118.3	13.08	58.2	6.77	5.529	10.63
Ap-pxt7-15	774	298.1	3113	30.32	158.6	38.43	343.4	210.2	34.27	386.9	68.82	498	108.97	301.9	37.52	205.5	28.42	14.35	30.08
Ap-pxt7-16	591	402.6	1039	110.4	313.1	55.49	368.2	186.4	55.51	283.3	44.59	260	43.37	84.8	6.277	21.49	2.23	29.73	32.58
Ap-pxt7-17	340	428.1	2183	106.2	374.1	71.66	508.8	266.1	64.5	423.4	69.78	436.1	79.05	177.2	15.95	59.59	6.03	24.21	33.36
Ap-pxt7-18	1052	349.8	3130	70.8	291.8	61.99	467.5	249.9	40.05	424.4	75.01	529.7	112.9	308.8	37.36	202	26.84	35.25	42.67
Ap-pxt7-19	695	348.7	2095	31.05	189.8	54.28	492.4	287.7	28.89	466.5	74.35	444.1	75.63	153.1	12.49	44.35	4.442	24.16	33.52
Ap-pxt7-20	823	508.3	3372	99.9	373.4	77.33	578.3	288.3	49.68	462.1	80.12	553.3	117.9	318.1	37.51	193	24.95	21.75	38.16
Ap-pxt7-21	436	390.1	510	0.156	1.183	0.474	8.61	13.72	3.14	49.3	9.69	80.2	20.18	60.8	7.81	41.94	5.26	1.448	4.048
Ap-pxt7-22	343	398.1	3254	42.62	208	53.34	477.9	282.1	26.73	486.3	85.51	590.3	123.2	328.5	36.47	166.9	18.78	23	46.63
Ap-pxt7-24	692	426.4	1119	62.93	252.5	53.06	378.3	182.1	34.17	279.3	41.7	246.4	44.31	98	8.65	35.31	4.34	12.16	16.6

Ap-pxt7-25	769	313.3	346.6	0.331	2.11	0.749	7.33	7.7	0.639	24.64	5.498	49.82	13.27	42.11	5.24	27.25	3.705	0.177	0.935
Ap-pxt7-26	277	398.2	2171	6.48	57.5	23.26	260.1	215.4	64.35	383.4	68.41	450.3	80.28	180.4	16.54	65.95	6.85	1.466	23.28
Ap-pxt7-27	328	469.4	824.3	84.5	320.1	64.77	459.6	207.8	34.26	295.2	40.71	215.8	31.71	55.35	3.617	11.32	1.137	13.85	19.75
Ap-pxt7-28	389	350.9	1021.1	2.75	25.7	9.02	104.8	80.5	14.79	170.9	29.32	203.8	41.14	100.2	9.69	38.96	4.277	6.405	13.97
Ap-pxt7-29	307	388.8	1789	8.96	51.33	14.3	126.9	92.4	8.55	195.5	38.08	291	64.15	184.8	22.87	117.6	14.54	0.793	7.11
Ap-pxt7-30	533	398.1	1882	12.73	72.2	19.44	179.8	124.3	39.96	250.2	44.33	316.6	67.09	184.7	19.92	90.7	10.57	22.02	32.65
Ap-pxt7-31	631	399.1	3824	176.3	618.4	123.7	812.1	355.8	73.16	537.9	92.42	641.7	132.8	359.5	40.5	185.6	20.79	35.26	54.02
Ap-pxt7-32	287	302.3	1714	18.25	94	24.52	209.5	125.2	21.13	235.6	40.78	286.7	61.94	170.2	19.98	105.2	14.64	13.2	19.95
Ap-pxt7-33	727	268.6	2698	11.19	58.84	16.31	151.9	113.2	15.38	237	47.92	385.3	91.14	291.8	41.86	250.2	32.66	12.57	15.99
Ap-pxt7-34	597	403.4	1647	72.9	286.2	62.68	472.9	225.3	23.19	324.1	51.26	323.6	58.2	134.3	12.57	50.03	5.206	7.13	10.39
Ap-pxt7-35	622	506.9	658.9	179.3	578	104.9	641.6	237.2	74.89	274.5	35.21	181	27.01	49.13	3.209	10.66	1.142	17.34	23.25
Ap-pxt7-36	387	345.7	1207	5.63	29.64	7.84	75.1	56.57	11.04	134.7	25.44	196	45.49	133.9	16.92	91.5	12.09	7.187	12.18
Ap-pxt7-37	527	453.5	1907	56.9	249.6	58.8	472.1	268.3	43.88	416.7	64.8	392.1	69.24	154.3	13.23	49.28	5.09	19.03	32.56
Ap-pxt7-38	836	335.5	2877	217.1	668.6	116.8	715	293.7	103.3	417.4	70.59	491.3	99.6	272.6	33.2	173	21.83	26.81	30.93
Ap-pxt7-39	1338	272.1	2823	57.31	260.3	58.76	463.3	231.1	33.57	394	67.18	481.2	102.7	281.9	33.68	178.2	23.99	35.8	38.95
Ap-pxt7-40	650	312.3	2314	47.66	221.2	49.58	366.5	178.8	31.57	293.8	51.3	369.5	80.46	229.2	28.47	156.9	21.12	22.07	27.39

Muestra Pxt-9b

Ngr-Apatito	Cl (ppm)	Sr (ppm)	Y (ppm)	La (ppm)	Ce (ppm)	Pr (ppm)	Nd (ppm)	Sm (ppm)	Eu (ppm)	Gd (ppm)	Tb (ppm)	Dy (ppm)	Ho (ppm)	Er (ppm)	Tm (ppm)	Yb (ppm)	Lu (ppm)	Th (ppm)	U (ppm)
Ap-pxt9b-01	640	716.5	353	164.5	468	70.9	379.1	119.4	22.78	143.9	18.56	94.1	14.8	29.4	2.67	12.12	1.398	3.69	39.76
Ap-pxt9b-02	610	567.6	165.1	81	213.5	30.91	163.1	45.12	9.42	55.86	7.08	37.72	6	12.63	1.181	5.58	0.656	5.72	13.76
Ap-pxt9b-03	763	528.1	164.1	66.7	186.9	27.63	155.2	45.41	7.58	58.48	7.23	37.98	6.38	14.13	1.531	9.08	1.32	9.94	12.12
Ap-pxt9b-04	502	445	122.6	45.41	124.1	19.02	110.4	34.46	7.23	44.7	5.71	27.81	4.023	8.52	0.986	5.8	0.791	2.175	13.97
Ap-pxt9b-06	462	516.9	205.3	67.31	190.5	29.74	170.3	57.01	10.49	75.95	9.87	50.31	7.53	14.38	1.344	6.58	0.739	2.947	17.91
Ap-pxt9b-07	591	615.2	887	284.6	874.6	138.4	753.7	263.4	44.43	320.6	45.72	248.6	40.36	83.79	7.85	33.68	3.804	14.24	68.82
Ap-pxt9b-08	572	419.6	218.2	50.81	149.7	23.71	141	45.2	8.05	60.6	8.2	45.7	7.72	19.14	2.549	16.94	2.7	2.85	36.83
Ap-pxt9b-09	780	775.3	395.1	186.4	546.8	83.5	459.1	146.7	22.33	180.9	22.37	111.6	17.36	33.97	2.828	12.4	1.393	2.963	30.98
Ap-pxt9b-10	510	644.6	209.4	138.3	370.4	55.22	294.4	84.2	16.02	98.4	11.49	56.78	8.35	15.6	1.297	5.67	0.666	7.08	14.71
Ap-pxt9b-11	717	481.9	735.1	247.8	745.1	113.2	632.4	194.7	33.11	238.3	32.09	171.5	28.19	59.71	6.02	28.47	3.394	12.51	50.3
Ap-pxt9b-12	457	495.4	326	77.2	224.4	35.5	203.2	66.9	12.03	91.9	12.9	72.6	12.47	27.7	2.78	13.27	1.678	2.26	24
Ap-pxt9b-13	703	505.8	252	83.2	239.6	36.8	207.5	64.2	12.07	81	10.85	57.4	8.69	17.37	1.679	7.61	0.87	4.55	12.32
Ap-pxt9b-14	599	565.7	185.8	73.2	207.3	31.58	178	55.09	9.24	71.6	9.27	45.92	6.959	12.9	1.104	4.8	0.525	1.458	3.965
Ap-pxt9b-15	616	646.5	330.2	127.8	365.4	55.92	304.6	95.6	15.45	120.3	15.75	81.4	13.33	27.68	2.499	10.79	1.236	1.993	20.79

Ap-pxt9b-16	618	422.9	398.1	61.7	195.8	33.09	193.3	72	14.37	98.8	14.74	84.1	13.64	28.89	3.016	15.29	1.867	10.09	20.02
Ap-pxt9b-17	652	435.3	308.2	69.8	203.5	32.33	180.5	60.1	11.61	80.3	11.34	63	10.48	24.13	2.75	15.39	2.06	6.97	20.61
Ap-pxt9b-18	553	467.6	148.6	29.51	97.2	15.86	90.3	31.52	6.79	41.08	5.91	32.37	5.055	10.1	1.008	4.62	0.499	0.521	1.924
Ap-pxt9b-19	852	589.3	1360	238	748.1	120.1	660.4	256.4	55.7	329.4	55.36	333.8	57.95	136.8	16.04	83.4	10.76	14.69	101.04
Ap-pxt9b-20	571	468	188.6	46.3	131.8	20.51	113.1	39.8	7.88	54	7.61	42.6	6.95	13.78	1.313	6.05	0.638	1.023	4.51
Ap-pxt9b-21	537	465.4	349	80.3	248	40.47	228.9	78.6	13.77	101.8	14.37	77.9	12.34	25.87	2.862	16.11	2.133	6.265	22.08
Ap-pxt9b-22	537	448.6	344	59.88	185	30.26	176.3	60.5	11.04	84.34	12.11	70.22	12.3	27.33	2.943	15.02	1.877	3.134	26.44
Ap-pxt9b-23	542	455.8	505.9	159.2	489.1	77.23	425.3	137.2	25.15	167.6	22.48	116.4	17.58	34.9	3.516	16.96	2.019	13.43	55.49
Ap-pxt9b-24	631	576.5	304.1	110	322.5	49.03	277.8	83.1	14.18	101.4	13.31	70.35	11.2	22.32	2.082	9.22	0.992	3.798	13.95
Ap-pxt9b-25	440	645.6	402	154.7	446.7	67.4	375.9	121.7	20.86	151.2	19.71	103.5	16.59	33.6	2.923	13.34	1.5	3.554	36.2
Ap-pxt9b-26	431	501.4	265.6	71.8	210.1	33.22	186	60.7	10.52	79.4	11.02	59.3	9.32	18.68	1.754	7.82	0.863	3.148	11.33
Ap-pxt9b-27	370	787.8	314.8	132.2	355.9	51.45	273.2	78.1	14.39	96.5	12.61	69.9	12.27	26.85	2.511	10.79	1.286	0.849	5.063
Ap-pxt9b-28	297	684.3	288.5	164.8	468.3	70.56	381	108.3	17.53	131.7	15.72	77.6	11.91	22.26	1.922	8.44	0.946	7.312	17.7
Ap-pxt9b-29	1284	537.8	224.4	67.46	192.6	30.51	175.1	57.62	10.95	75.72	10.36	54.87	8.6	17.31	1.603	7.27	0.856	1.232	5.717
Ap-pxt9b-31	395	329.1	150.8	3.79	12.43	2.22	15.72	7.24	1.336	13.36	2.502	19.61	5.03	18.26	3.073	21.79	3.436	1.917	4.186
Ap-pxt9b-32	477	651.2	305.7	172.1	472.6	70.4	384.1	107.3	18.44	126.4	15.11	74.86	11.59	22.28	2.046	8.91	0.966	18.21	26.25
Ap-pxt9b-33	534	605.3	322.6	121.8	346.5	55.05	298.6	91.2	14.26	119.3	15.11	80	13.12	26.99	2.406	10.94	1.304	2.126	35.12
Ap-pxt9b-34	432	633.7	287.3	121	344.3	52.3	282.4	87.3	15.52	110.3	14.44	74.2	11.75	23.25	2.08	9.22	0.978	1.406	28.36
Ap-pxt9b-35	482	440.9	414.6	50.2	169.4	29.33	180.5	67.1	14.48	93	14.16	82.3	13.8	29.89	3.002	14.38	1.68	7.84	37.6
Ap-pxt9b-36	658	529.5	274.8	93.5	270.9	41.43	227.6	67.1	12.52	84.4	11.21	60.46	9.48	18.74	1.763	8.15	0.894	3.256	20.92
Ap-pxt9b-37	524	565.9	403.8	142.3	420.8	66.8	374.1	111.6	19.5	136.6	17.83	92.2	15.38	31.49	3.073	14.5	1.756	6.62	42.95
Ap-pxt9b-38	651	420.5	201.5	45	130.6	20.76	115.7	35.77	7.35	46.67	6.18	36.38	6.92	18.35	2.667	18.52	3.077	5.43	8.58
Ap-pxt9b-39	527	450.4	162.5	32.59	97	15.96	90.6	29.97	6.22	41.27	5.911	33.52	5.291	11.33	1.135	5.79	0.651	2.559	6.341
Ap-pxt9b-40	503	621.6	269.5	107.2	298.7	45.97	249.5	76.57	13.39	96.7	12.5	66.4	11.3	23.82	2.194	10.28	1.209	1.262	23.55

Muestra Pxt-11

Ngr-Apatito	Cl (ppm)	Sr (ppm)	Y (ppm)	La (ppm)	Ce (ppm)	Pr (ppm)	Nd (ppm)	Sm (ppm)	Eu (ppm)	Gd (ppm)	Tb (ppm)	Dy (ppm)	Ho (ppm)	Er (ppm)	Tm (ppm)	Yb (ppm)	Lu (ppm)	Th (ppm)	U (ppm)
Ap-pxt11-01	74	1091	1910	256.2	852.5	137	713.8	265.2	5.88	327	58.34	381.1	72.53	185.5	21.42	112.6	13.51	6.456	19.56
Ap-pxt11-02	67	1040.6	2327	181.8	730.6	128.1	719.2	280	7.3	363.9	64.66	433	85.19	220.6	26.09	134.9	16.16	5.541	14.97
Ap-pxt11-03	150	1628	422	22.8	103.7	20.11	124	61.5	1.742	79.7	14.1	90.3	17.09	46.6	6.06	36.11	4.8	2.761	15.7
Ap-pxt11-04	466	1333	1688	158.1	607.4	101.7	537.4	229	5.02	285.2	52.86	345.1	63.5	163.4	21.01	115.3	13.91	5.611	12.62
Ap-pxt11-05	526	1391	712.6	67.2	263.4	44.35	231.4	116.5	3.055	134.8	26.95	168.4	27.92	70.7	9.97	61.93	7.54	2.857	74.7

Ap-pxt11-06	579	1171	1863	162.9	646.7	113	593.3	273.4	5	319.1	61.55	392.5	69.87	179.1	24.06	144.5	17.98	6.546	28.54
Ap-pxt11-07	733	2040	539.9	43.76	169.3	29.18	164.5	72.9	2.569	96.6	17.51	114.3	21.8	56.01	7.01	38.12	4.81	2.506	17.14
Ap-pxt11-09	1290	2155	541.9	45.4	180.9	31.92	188.8	83.2	2.436	108.2	18.98	121.5	22.62	58.9	7.11	38.91	4.83	4.277	11.17
Ap-pxt11-11	194	1595	583.8	59.4	232	40.92	229.8	105.5	2.637	131.7	23.62	144.6	25.53	62.5	7.6	41.27	5.15	3.491	20.46
Ap-pxt11-12	125	2390	1135	110.3	418	70.4	378	145.3	4.36	189.1	34.06	228.2	45.2	116.8	14.06	74.3	9.21	4.01	18.97
Ap-pxt11-13	207	2025	282	18.9	73.2	12.79	70.3	32.98	2.88	42.5	8.28	57.9	10.98	30.08	3.93	22.33	2.797	1.192	7.04
Ap-pxt11-14	461	1229	1237	209.3	653.8	102.8	536.4	180.6	7.22	240.1	40.1	255.9	49.95	121.2	13.11	61.77	7.15	1.268	5.381
Ap-pxt11-15	273	1610	1107	118.4	446	75.5	410	164.2	4.09	217.4	38.3	246.2	47.4	117.7	13.47	69.6	8.25	5.88	21
Ap-pxt11-17	319	1857	678.2	67.1	271.6	47.99	270	117.7	3.63	149.4	26.03	162.7	29.28	72.04	8.53	44.83	5.552	4.138	21.71
Ap-pxt11-18	443	1347	1629	113	442.9	78.3	467.1	182.7	8.32	262.6	46.37	309.8	63.42	161.9	18.35	93	11.37	4.035	11.87
Ap-pxt11-20	326	2791	631	59.6	198	32.1	178	67.4	3.232	99.1	17.6	120.1	24.4	63.3	7.33	39.4	5.16	2.65	12.7
Ap-pxt11-21	140	1135	103.8	1.05	3.31	0.505	3.06	1.5	0.488	3.48	0.951	9.57	2.96	12.25	2.004	12.63	1.581	0.072	0.069
Ap-pxt11-22	37700	1502	583	43.6	201.9	40	240.4	93.5	3.27	103	17.89	114.2	21.3	57	7.4	44.7	5.93	480	81
Ap-pxt11-23	217	1472	2041	190.3	711.2	118.6	641.3	249.2	6.3	315	57.06	390.5	76.62	201.5	24.83	132.7	16.36	6.77	19.17
Ap-pxt11-24	610	2351	188.6	1.55	5.96	1.109	8.15	4.64	0.894	9.87	2.546	24.28	6.38	21.47	3.074	17.7	2.243	0.201	0.455
Ap-pxt11-25	940	2090	255	21.07	80	14.21	83.9	34.95	1.298	47.3	7.9	52.5	10.45	28.67	3.563	20.55	2.759	1.156	8.65
Ap-pxt11-26	377	1565	2217	199	789.2	134.5	744.5	309.8	7.33	375.5	69.09	458.4	84.08	218.2	27.94	163	19.77	11.79	29.88
Ap-pxt11-27	85100	1609	119.9	2.86	5.24	1.33	6	2.45	0.65	5.83	1.39	11.7	3.55	11.75	1.7	12.3	1.44	0.363	0.265
Ap-pxt11-29	514	2349	345.4	25.34	98	16.85	100.3	42.93	2.434	64.1	11.13	74.77	14.33	34.97	3.92	21.12	2.684	1.819	3.551
Ap-pxt11-30	289	2564	258	1.57	6.42	1.292	9	5.41	1.281	12.87	3.094	29.35	8.23	29.72	4.53	29.17	4.186	0.0258	0.188
Ap-pxt11-32	450	893	130.8	2.66	8.8	1.51	9.66	4.37	0.76	7.99	1.779	15.73	4.06	13.29	1.926	10.94	1.659	0.083	0.172
Ap-pxt11-33	555000	311	1036	11.4	42.3	10.2	66	48	13.7	72	20.3	168	35.3	107	15.1	109	10.5	14.1	22
Ap-pxt11-34	131	1668	324.3	8.34	28.34	5.12	35.46	17.72	3.92	34.83	6.96	49.73	10.86	29.02	3.398	17.62	2.217	0.368	1.333
Ap-pxt11-35	889	2980	689.4	55.56	214	37.28	211.6	83.5	4.38	117.6	20.72	136.6	26.81	68.27	7.89	42.51	5.137	1.729	17.8
Ap-pxt11-36	447	1143	1114	92.5	400.8	72.65	409.8	200.9	4.71	238.5	44.65	271.6	44.94	110.5	14.69	88.8	10.67	4.76	88.89
Ap-pxt11-38	4710	2217	722	63.78	262.8	47.12	264.9	116	2.923	146.2	25.69	165.7	30.15	76.7	9.4	51.7	6.33	4.969	11.5
Ap-pxt11-39	281	2727	264	8.9	40.3	7.99	51.8	22.8	1.538	30.9	5.87	42.2	9.37	28.3	4.04	24.17	3.388	1.099	1.87

ANEXO F: Datos trazas de fisión de granos individuales de apatitos

Muestra Px-1 $\zeta = 382956 \pm 24441$ (1σ). *Valores para Isoplot R.*

Ngr-Apatito	Ns	Área (μm)	ρ_s (μm^2)	238 U	tot incert (ppm)	Edad TFA (Ma)	1σ (Ma)	CI (wt.%)	tot incert (wt.%)
Ap-px1-01	144	5450	2642202	74.93	3.49	67.17	6.41	0.112	0.015
Ap-px1-02	151	6650	2270677	55.8	2.6	77.45	7.26	0.119	0.016
Ap-px1-03	176	5920	2972973	82.25	3.95	68.84	6.15	0.056	0.01
Ap-px1-05	130	5640	2304965	57.07	2.67	76.87	7.64	0.139	0.018
Ap-px1-06	197	7600	2592105	62.18	2.98	79.33	6.81	0.039	0.011
Ap-px1-07	235	8140	2886978	79.56	4.01	69.11	5.7	0.048	0.009
Ap-px1-08	154	5860	2627986	63.84	3.31	78.34	7.51	0.08	0.013
Ap-px1-09	143	6460	2213622	71.84	3.41	58.73	5.65	0.087	0.014
Ap-px1-10	144	4690	3070362	74.98	3.78	77.94	7.59	0.047	0.01
Ap-px1-11	111	6880	1613372	48.23	2.36	63.74	6.81	0.055	0.01
Ap-px1-12	158	6080	2598684	65.52	3.26	75.5	7.08	0.031	0.009
Ap-px1-13	129	7230	1784232	54.6	3.98	62.27	7.12	0.042	0.01
Ap-px1-14	112	4830	2318841	78.48	3.61	56.33	5.92	0.076	0.013
Ap-px1-15	115	6460	1780186	51.46	2.41	65.9	6.88	0.104	0.014
Ap-px1-16	147	4160	3533654	98.7	4.75	68.19	6.51	0.063	0.012
Ap-px1-17	143	4150	3445783	101.57	5.01	64.63	6.28	0.037	0.011
Ap-px1-18	83	6130	1353997	36.79	1.82	70.09	8.44	0.036	0.009
Ap-px1-19	118	4420	2669683	68.8	3.33	73.88	7.68	0.025	0.008
Ap-px1-20	86	5910	1455161	45.71	2.16	60.67	7.14	0.047	0.01
Ap-px1-21	222	5670	3915344	99.83	4.87	74.66	6.19	0.073	0.012
Ap-px1-22	150	4750	3157895	82.9	4.13	72.53	6.94	0.045	0.009
Ap-px1-23	112	5090	2200393	68.46	3.12	61.25	6.43	0.088	0.015
Ap-px1-24	105	4160	2524038	77.42	3.67	62.13	6.74	0.062	0.012
Ap-px1-25	103	4100	2512195	66.6	3.07	71.83	7.81	0.052	0.011
Ap-px1-27	160	4300	3720930	92.86	4.5	76.27	7.07	0.098	0.014
Ap-px1-28	107	4210	2541568	82.54	3.84	58.69	6.3	0.059	0.013
Ap-px1-29	123	4380	2808219	83.69	4.1	63.93	6.56	0.019	0.01
Ap-px1-30	111	5260	2110266	54.74	2.59	73.4	7.78	0.021	0.009
Ap-px1-31	149	4060	3669951	87.14	4.02	80.14	7.53	0.072	0.013
Ap-px1-32	112	4330	2586605	61.48	2.93	80.06	8.47	0.071	0.012
Ap-px1-33	97	4080	2377451	60.55	3.3	74.75	8.61	0.037	0.009
Ap-px1-34	50	4000	1250000	33.55	1.6	70.95	10.59	0.024	0.01
Ap-px1-35	79	5330	1482176	48.2	2.39	58.61	7.21	0.052	0.011
Ap-px1-36	196	4780	4100418	110.56	5.14	70.63	6.02	0.118	0.017
Ap-px1-37	92	4120	2233010	62.89	3.04	67.63	7.77	0.05	0.009
Ap-px1-38	74	6290	1176471	33.46	1.59	66.98	8.41	0.014	0.007

Ap-px1-41	77	4810	1600832	37.08	1.79	82.14	10.17	0.019	0.008
Ap-px1-42	147	5250	2800000	76.44	4.26	69.76	6.94	0.027	0.009
Ap-px1-43	102	4480	2276786	62.17	2.95	69.74	7.66	0.042	0.011
Ap-px1-44	136	4450	3056180	105.36	4.9	55.3	5.39	0.14	0.018
Ap-px1-45	146	4770	3060797	73.88	3.58	78.84	7.56	0.056	0.01
Ap-px1-46	94	4510	2084257	51.75	2.4	76.66	8.67	0.05	0.011
Ap-px1-47	100	4390	2277904	67.54	3.52	64.26	7.25	0.041	0.01
Ap-px1-48	124	4640	2672414	83.43	3.97	61.04	6.2	0.06	0.011
Ap-px1-49	80	4240	1886792	59.99	2.99	59.94	7.34	0.065	0.011

Muestra Pxt-5 $\zeta = 369130 \pm 24679$ (1 σ). *Valores para Isoplot R.*

Ngr-Apatito	Ns	Área (μm)	ps (μm²)	238 U	tot incert (ppm)	Edad TFA (Ma)	1σ (Ma)	CI (wt.%)	tot incert (wt.%)
Ap-pxt5-01	47	4840	971074.4	27.08	1.26	65.85	10.08	0.085	0.012
Ap-pxt5-02	67	8920	751121.1	15.17	0.74	90.74	11.94	0.044	0.01
Ap-pxt5-03	61	6250	976000	17.57	2.1	101.72	17.82	0.06	0.01
Ap-pxt5-04	46	6120	751634	25.28	1.21	54.64	8.47	0.064	0.01
Ap-pxt5-05	92	6080	1513158	42.82	2.28	64.89	7.6	0.085	0.01
Ap-pxt5-06	61	7470	816599.7	25.61	2.12	58.58	8.93	0.057	0.008
Ap-pxt5-07	82	9270	884573.9	21.43	1.14	75.74	9.28	0.058	0.008
Ap-pxt5-08	59	7860	750636.1	23.76	1.19	58.05	8.1	0.056	0.01
Ap-pxt5-09	62	6800	911764.7	24.15	1.18	69.31	9.43	0.068	0.009
Ap-pxt5-10	46	5020	916334.7	24.58	1.2	68.44	10.63	0.087	0.013
Ap-pxt5-11	94	5450	1724771	39.73	2.14	79.63	9.27	0.052	0.009
Ap-pxt5-12	105	8470	1239669	30.58	1.87	74.39	8.57	0.052	0.008
Ap-pxt5-13	69	6310	1093502	28.58	1.44	70.23	9.17	0.046	0.01
Ap-pxt5-14	47	4720	995762.7	19.9	1.71	91.7	15.52	0.039	0.009

Muestra Pxt-7 $\zeta = 369130 \pm 24679$ (1 σ). *Valores para Isoplot R.*

Ngr-Apatito	Ns	Área (μm)	ps (μm²)	238 U	tot incert (ppm)	Edad TFA (Ma)	1σ (Ma)	CI (wt.%)	tot incert (wt.%)
Ap-pxt7-01	30	6650	451127.8	38.68	2.03	21.49	4.08	0.132	0.013
Ap-pxt7-02	14	4240	330188.7	14.94	1.14	40.66	11.3	0.066	0.01
Ap-pxt7-03	32	7330	436562.1	31.93	1.56	25.19	4.62	0.108	0.012
Ap-pxt7-04	35	6470	540958.3	27.94	1.35	35.64	6.26	0.071	0.009
Ap-pxt7-05	42	7880	532994.9	37.77	2.12	25.99	4.27	0.052	0.009
Ap-pxt7-06	15	4140	362318.8	34	1.64	19.64	5.16	0.078	0.009
Ap-pxt7-07	45	12630	356294.5	26.37	1.23	24.89	3.89	0.032	0.007
Ap-pxt7-08	64	9780	654396.7	36.94	1.84	32.61	4.39	0.044	0.009
Ap-pxt7-09	58	8710	665901.3	31.84	1.55	38.48	5.39	0.075	0.009

Ap-pxt7-10	43	9190	467899.9	26.99	1.35	31.92	5.12	0.085	0.01
Ap-pxt7-11	36	9440	381355.9	33.89	1.68	20.74	3.61	0.078	0.01
Ap-pxt7-12	53	9460	560253.7	34.17	1.64	30.19	4.39	0.073	0.01

Muestra Pxt-9b $\zeta = 370837 \pm 26662$ (1 σ). *Valores para Isoplot R.*

Ngr-Apatito	Ns	Área (μm^2)	ρ_s (μm^2)	238 U	tot incert (ppm)	Edad TFA (Ma)	1 σ (Ma)	Cl (wt.%)	tot incert (wt.%)
Ap-pxt9b-01	47	4430	1060948	39.47	2.54	49.65	7.92	0.046	0.011
Ap-pxt9b-02	23	5490	418943.5	13.66	0.8	56.62	12.26	0.045	0.011
Ap-pxt9b-03	12	4060	295566.5	12.03	0.63	45.4	13.32	0.057	0.01
Ap-pxt9b-04	31	5520	561594.2	13.87	0.81	74.64	14.1	0.038	0.009
Ap-pxt9b-06	28	4670	599571.7	17.78	0.84	62.22	12.12	0.049	0.011
Ap-pxt9b-07	133	5360	2481343	68.32	3.49	66.99	6.74	0.062	0.012
Ap-pxt9b-08	46	5180	888030.9	36.56	2.1	44.88	7.1	0.06	0.013
Ap-pxt9b-10	20	5770	346620.5	14.6	0.79	43.87	10.09	0.054	0.011
Ap-pxt9b-11	116	6430	1804044	49.94	3	66.64	7.37	0.076	0.013
Ap-pxt9b-12	28	5580	501792.1	23.83	3.25	38.93	9.07	0.048	0.01
Ap-pxt9b-13	16	4610	347071.6	12.23	1.32	52.41	14.27	0.074	0.012
Ap-pxt9b-14	7	6210	112721.4	3.94	0.21	52.83	20.17	0.063	0.011
Ap-pxt9b-15	22	4120	533980.6	20.64	1.03	47.79	10.46	0.065	0.012
Ap-pxt9b-16	61	7400	824324.3	19.87	1.08	76.47	10.64	0.065	0.011

Muestra Pxt-11 $\zeta = 369130 \pm 24679$ (1 σ). *Valores para Isoplot R.*

Ngr-Apatito	Ns	Área (μm^2)	ρ_s (μm^2)	238 U	tot incert (ppm)	Edad TFA (Ma)	1 σ (Ma)	Cl (wt.%)	tot incert (wt.%)
Ap-pxt11-01	38	6570	578386.6	19.42	0.99	54.74	9.31	0.008	0.007
Ap-pxt11-02	25	6380	391849.5	14.86	0.73	48.49	9.99	0.007	0.006
Ap-pxt11-03	37	7850	471337.6	15.59	0.78	55.56	9.55	0.016	0.006
Ap-pxt11-04	26	4530	573951.4	12.53	0.63	83.99	17.01	0.049	0.007
Ap-pxt11-05	115	5790	1986183	74.16	4.77	49.24	5.58	0.055	0.011
Ap-pxt11-06	49	6660	735735.7	28.33	1.56	47.75	7.31	0.061	0.009

Note: *Ns* is the number of spontaneous fission tracks registered within the area *A* (μm^2); *ρ_s* is the spontaneous track density (number of tracks expressed per 1 cm^2); *U-238* represents the uranium-238 concentration in ppm measured by LA-ICP-MS (normalized using ^{43}Ca as an internal standard and taking an average CaO of 55 wt.% for F-apatites and 53 wt.% for Cl-rich apatites); total uncert is the total uncertainty for U-238, including the analytical error from LA-ICP-MS measurements and an error generated by the CaO variation (55 ± 2 wt.% and 53 ± 2 wt.%); AFT age is the apatite fission-track age in Ma; 1-SE is the 1 σ -error in Ma; total uncertainty for Cl measurements includes the analytical error derived from LA-ICP-MS measurement and an error generated by the common variation of Cl in Durango F-apatite of 0.43 ± 0.03 wt.% (primary standard for Cl measurements).

ANEXO G: Mediciones de longitudes de trazas de fisión en apatitos

PX-1									
Ntr	Longitud μm	Ntr	Longitud μm	Ntr	Longitud μm	Ntr	Longitud μm	Ntr	Longitud μm
1	15.55	32	14.03	63	11.59	94	14.5	125	12.66
2	12.24	33	12.37	64	14.48	95	11.45	126	11.56
3	12.50	34	15.14	65	11.9	96	9.69	127	12.35
4	13.20	35	12.87	66	12.44	97	14.82	128	14.32
5	11.87	36	12.28	67	14.93	98	13.99	129	14.42
6	14.06	37	14.90	68	10.61	99	10.12	130	13.57
7	13.33	38	13.20	69	9.28	100	12.85	131	11.64
8	12.48	39	12.11	70	13.77	101	14.55	132	11.36
9	12.74	40	14.90	71	12.33	102	10.84	133	10.65
10	13.71	41	10.59	72	15.21	103	11.53	134	12.62
11	13.72	42	13.35	73	12.77	104	13.7	135	11.48
12	14.70	43	13.94	74	10.63	105	12.8	136	14.07
13	11.57	44	11.21	75	13.81	106	15.3	137	13.53
14	13.45	45	13.58	76	12.7	107	14.25	138	12.29
15	13.80	46	13.2	77	11.3	108	12.41	139	13.14
16	12.85	47	14.59	78	14.28	109	12.37	140	10.57
17	14.33	48	14.87	79	10.32	110	11.73	141	11.71
18	13.83	49	9.88	80	13.68	111	9.08	142	14.08
19	12.52	50	13.1	81	13.04	112	13.93	143	14
20	12.16	51	13.41	82	12.55	113	15.2	144	13.39
21	12.00	52	13.98	83	12.44	114	13.01	145	11.76
22	12.74	53	13.26	84	13.45	115	12.02	146	13.04
23	13.56	54	13.25	85	12.1	116	13.8	147	11.42
24	13.54	55	14.15	86	13.65	117	15.63	148	14.61
25	13.04	56	10.02	87	13.76	118	12	149	13.8
26	12.07	57	12.61	88	14.38	119	10.58	150	11.5
27	13.40	58	13.26	89	12.07	120	13.29	151	13.44
28	10.56	59	12.63	90	10.23	121	10.24	152	9.32
29	15.42	60	11.34	91	9.16	122	14.71	153	13.33
30	9.90	61	13.28	92	13.83	123	12.75	Prom=	12.81
31	13.86	62	10.34	93	13.5	124	14.03	Dsv Std	1.48

PX-9b									
Ntr	Longitud μm	Ntr	Longitud μm	Ntr	Longitud μm	Ntr	Longitud μm	Ntr	Longitud μm
1	12.60	13	13.13	25	11.68	37	14.73	49	13.04
2	14.75	14	13.56	26	13.69	38	13.52	50	12.76

3	12.94	15	13.23	27	13.63	39	10.84	51	10.62
4	13.73	16	12.50	28	12.88	40	12.44	52	13.79
5	11.82	17	11.82	29	13.59	41	11.85	53	13.26
6	14.49	18	11.93	30	13.44	42	15.60	54	13.47
7	11.00	19	15.51	31	14.20	43	11.94	55	13.89
8	12.80	20	14.41	32	13.08	44	12.00		
9	13.81	21	11.40	33	14.44	45	11.67		
10	10.86	22	12.04	34	16.71	46	13.75		
11	13.34	23	13.48	35	14.81	47	11.62	Prom=	13.07
12	10.59	24	14.40	36	14.50	48	11.43	Dsv Std	1.35

Note: Only TINT-type confined tracks

ANEXO G: Datos de las muestras utilizadas para el análisis geoquímico

Muestra	Litología	Th (ppm)	U (ppm)	La (ppm)	Ce (ppm)	Pr (ppm)	Sr (ppm)	Nd (ppm)	Sm (ppm)	Eu (ppm)	Gd (ppm)	Tb (ppm)	Dy (ppm)	Y (ppm)	Ho (ppm)	Er (ppm)	Tm (ppm)	Yb (ppm)	Lu (ppm)	Referencia
IH 11/13/01 1	Pelita Facies Anfibolita	0.0071	0.1501	2.17	7.73	1.446	594.4	7.36	3.06	0.84	5.03	1.19	11.6	101	3.198	11.07	1.504	7.71	0.955	
IH 11/13/01 2	Pelita Facies Anfibolita	0.086	0.349	7.23	22.46	4.56	264.7	23.79	11.1	3.15	18.63	4.4	38.39	304.2	9.67	30.06	3.753	18.95	2.377	
IH 11/13/01 3	Pelita Facies Anfibolita	0.0074	0.266	5.44	19.67	3.95	296.9	20.77	10.24	2.82	17.82	4.2	39.2	308.7	9.84	30.61	3.92	18.3	2.089	
IH 11/13/01 4	Pelita Facies Anfibolita	0.0405	0.72	3.43	12.9	2.96	254.7	17.1	8.19	2.51	17.16	3.61	35.7	291.4	9.26	26.98	3.06	13.33	1.414	
IH 11/13/01 5	Pelita Facies Anfibolita	0.04	1.195	2.372	9.54	2.07	231.6	13.07	6.46	2.02	13.19	2.769	23.67	158.7	5.45	14.74	1.647	7.43	0.8	
IH 11/13/01 6	Pelita Facies Anfibolita	0.0146	0.592	4.39	14.7	3.05	418.9	15.7	6.75	2.23	13.29	3.1	28.64	246	7.72	24.53	2.953	14.04	1.65	Henrichs et al. 2018
IH 11/13/01 7	Pelita Facies Anfibolita	0.0211	1.016	4.18	15.9	3.25	305.2	17.49	8.34	2.527	15.43	3.524	32.22	239.8	8.1	24.24	2.867	13.64	1.599	Grado metamórfico medio
IH 11/13/01 8	Pelita Facies Anfibolita	1.072	0.489	8.98	31.8	6.24	296.9	31	12.77	3.64	20.34	4.44	39.3	298	9.82	31.4	3.82	18.93	2.18	
IH 11/13/01 9	Pelita Facies Anfibolita	24	3.87	51	119.9	18	372.5	66.5	17.57	4.51	21.73	4.31	36.05	280.2	8.6	26.88	3.335	16.22	1.867	
IH 11/13/01 10	Pelita Facies Anfibolita	0.057	0.2284	3.99	13.34	2.53	409.9	12.14	5.11	1.384	8.33	1.999	18.72	161.6	5.04	16.53	2.153	10.67	1.221	
IH 11/13/01 11	Pelita Facies Anfibolita	0.0041	0.459	5.26	17.93	3.79	328.5	18.82	8.64	2.639	14.84	3.33	31.14	258.1	8.11	25.31	3.14	15.28	1.793	
IH 11/13/01 12	Pelita Facies Anfibolita	0.000001	0.15	6.18	21.9	4.4	316.3	21.8	8.6	2.29	14.4	3.19	32	309	9.11	31.2	4.37	23.3	2.75	

IH 11/13/01 13	Pelita Facies Anfibolita	0.0107	0.477	6.55	20.94	4.13	286.6	23.1	9.6	2.97	17.2	4.06	33.3	269.5	8.77	27.5	3.05	15.5	1.76
IH 11/13/01 14	Pelita Facies Anfibolita	5.63	5.43	5.39	18.7	4.5	253.9	26.1	12.87	3.46	27.6	5.9	51.1	367	11.5	32.4	3.54	15.49	1.72
IH 11/13/01 15	Pelita Facies Anfibolita	0.095	0.395	6.09	20.97	4.24	295.8	22.3	9.38	3.01	16.95	3.77	36.6	305.4	9.53	31.38	4.064	20.45	2.468
IH 11/13/01 16	Pelita Facies Anfibolita	0.0034	0.074	5.88	20.92	4.27	274.8	19.8	8.47	2.72	14.45	3.52	32.39	288.1	8.83	28.43	3.84	19.88	2.452
IH 11/13/01 17	Pelita Facies Anfibolita	0.0066	0.146	3.05	10.3	2.154	520.1	10.37	4.69	1.277	7.63	1.791	16.91	155.8	4.441	15.75	2.256	11.72	1.39
IH 11/13/01 18	Pelita Facies Anfibolita	0.0196	0.888	4.72	18.14	3.82	251.5	18.9	8.38	1.94	12.93	3.04	28.29	237.9	7.12	23.88	3.24	17.43	2.13
IH 11/13/01 19	Pelita Facies Anfibolita	0.0457	0.146	3.29	12.37	2.85	293.7	14.38	7.29	1.886	12.68	2.846	26.46	225.2	6.69	21.73	2.808	14.45	1.739
IH 11/13/01 20	Pelita Facies Anfibolita	0.0516	0.904	6.57	22.12	4.37	511.9	22.7	10.6	3.21	18.72	4.06	35.1	269	8.34	24.79	2.87	12.79	1.384
IH 11/13/01 21	Pelita Facies Anfibolita	0.0069	0.334	8.14	27.09	5.21	339.7	28	12.07	3.75	21.1	4.66	41.2	354.3	10.82	35.48	4.56	22.12	2.72
IH 11/13/01 22	Pelita Facies Anfibolita	0.051	0.669	7.3	20.98	4.17	414.9	21.8	8.53	2.82	15.49	3.53	29.41	230.7	7.18	21.13	2.36	10.01	1.112
IH 11/13/01 23	Pelita Facies Anfibolita	0.0066	0.102	7.97	26.79	5.42	328.4	28.9	13.29	3.96	23.39	5.09	43.13	323.1	10.28	29.62	3.57	17.05	1.862
IH 11/13/01 24	Pelita Facies Anfibolita	0.014	0.112	2.86	10.63	2.03	265.5	10.04	4.45	1.23	7.43	1.83	18.36	163.5	4.85	17.91	2.61	13.42	1.749
IH 11/13/01 25	Pelita Facies Anfibolita	0.0406	1.838	9.62	32.86	5.95	254.5	35.7	16.58	4.91	30.28	6.27	53.06	375.6	11.89	31.87	3.11	12.95	1.302
IH 11/13/01 26	Pelita Facies Anfibolita	0.135	0.0878	7.13	23.57	4.18	476.7	24.53	9.81	3.16	18.34	4	35.2	282.6	8.81	28.24	3.565	17.35	1.977

AGC11	Ortogneis Facies Anfibolita	0.022	0.548	4.6	9.7	2.61	527	15.2	5.98	2.07	6.35	1.24	7.2	44.2	1.87	4.44	0.711	3.64	0.85	
AGC12	Ortogneis Facies Anfibolita	0.161	4.16	2.82	6.33	1.654	579.3	10.07	4.34	2.39	7.28	1.645	13.43	115.6	3.8	12.72	2.05	14.01	2.59	
AGC13	Ortogneis Facies Anfibolita	0.0434	3.53	1.105	4.51	1.04	488.1	8.08	4.68	2.21	10.65	2.605	21.74	177.7	5.75	19.66	3.003	18.14	3.17	
AGC14	Ortogneis Facies Anfibolita	0.136	6.93	4.59	11.71	2.67	607.5	15.84	8.25	4.04	14.3	3.45	28	221	6.79	22.9	3.4	21.7	3.75	
AGC15	Ortogneis Facies Anfibolita	1.229	19.67	7.84	19.72	5.4	636	35	20.5	8.31	34	8.12	68.9	530	18.93	63.2	9.54	63.5	10.25	
AGC16	Ortogneis Facies Anfibolita	0.0306	4.24	0.8	3.23	0.701	865	6.18	4.72	2.67	11.3	3.11	27.7	228	7.19	25.7	4.02	26.3	4.1	
AGC17	Ortogneis Facies Anfibolita	0.0542	4.44	1.046	4.4	0.886	773.4	7.22	5.44	3.43	14.9	4.19	40.5	353.9	11.74	41.2	6.01	39.8	6.23	Henrichs et al. 2018
AGC18	Ortogneis Facies Anfibolita	10.7	22.7	5.82	14.74	3.87	678	25.1	13.43	6.45	24.2	6.06	52.2	411	13.76	49.3	7.76	52	8.71	Grado metamórfico medio
AGC19	Ortogneis Facies Anfibolita	1.606	15.49	4.01	12.25	2.83	522.6	18	9.9	4.24	17.7	4.41	36.6	292	9.97	33.9	5.23	35.9	6.25	
AGC110	Ortogneis Facies Anfibolita	0.148	10.86	3.43	13.51	2.76	479.1	18.74	10.24	5.56	16.27	3.3	24.72	199.6	6.17	20.5	2.786	19.89	3.54	
AGC111	Ortogneis Facies Anfibolita	0.067	4.46	2.92	5.85	1.62	823.6	9.35	3.93	2.08	6.98	1.74	16.5	166.1	5.08	18.8	3.31	23.5	4.27	
AGC112	Ortogneis Facies Anfibolita	0.084	6.6	2.85	10.8	2.26	361.5	16.9	8.54	3.7	15.85	3.36	26.22	197.1	6.75	20.27	2.6	15.24	2.73	
AGC113	Ortogneis Facies Anfibolita	0.46	6.24	4.09	9.11	2.67	498.1	15.4	6.45	2.79	9.68	2.097	16.75	135.4	4.4	14.91	2.27	15.69	2.787	
AGC114	Ortogneis Facies Anfibolita	0.0373	5.11	3.88	11.36	2.67	453.5	18.59	10.78	4.76	22.45	5.66	47.3	373	12.59	41.2	5.93	36	5.97	

AGC115	Ortogneis Facies Anfibolita	0.093	7.97	1.104	3.74	0.793	559.2	6.58	5.32	3.21	14.87	3.73	34.3	272.5	9.76	32.53	5	31.65	5.51	
AGC116	Ortogneis Facies Anfibolita	0.0472	3.44	0.859	3.18	0.674	569.7	4.5	3.03	2.19	6.82	1.553	14.1	129.3	4.122	15.02	2.436	17.1	3.23	
AGC117	Ortogneis Facies Anfibolita	0.144	10.86	2.5	10.76	2.2	350.1	16.6	10.35	5.62	20.96	4.46	35.2	254	8.8	27.5	3.77	22.8	3.95	
AGC118	Ortogneis Facies Anfibolita	0.565	12.47	5.39	12.61	3.26	633.6	21.8	11.53	5.64	24.15	5.7	48.1	374.5	12.51	42.1	6.3	41.8	6.51	
AGC119	Ortogneis Facies Anfibolita	0.614	21.19	3.65	13.93	3.26	452.4	22.8	16.44	7.56	39.2	9.15	75.5	554	19.94	66	9.57	58.5	8.93	
AGC120	Ortogneis Facies Anfibolita	0.106	5.24	5.82	11.65	3.07	610.9	20.5	7.55	2.74	12.31	2.68	23.04	202.5	6.87	24.61	3.89	28.32	4.88	
AGC121	Ortogneis Facies Anfibolita	1.44	4.03	14.32	25.86	6.59	537.4	36.1	14.57	6.55	25.53	5.55	45.1	372	11.67	38.7	5.94	38.1	6.03	
AGC122	Ortogneis Facies Anfibolita	0.0355	3.65	0.865	3.91	0.839	413.8	6.59	3.92	2.1	8.21	2.066	19.22	173.9	5.84	20.06	2.92	17.51	3.07	
AGC123	Ortogneis Facies Anfibolita	0.081	3.39	1.129	4.16	0.876	777.3	7.73	4.99	2.71	14.11	3.069	27.87	221.5	7.88	25.56	3.65	23.36	3.645	
AGC124	Ortogneis Facies Anfibolita	0.208	4.712	2.22	8.22	1.64	552.6	13.7	8.43	4.15	20.92	4.85	42.1	334.8	11.24	38.2	5.58	37.7	5.57	
C-7-1	Migmatita	3.7	79.3	126.5	514	94.4	154.6	531.7	231.8	33.7	341.1	63.3	416.1	1946.8	75.6	193	24.4	141.8	16.7	
C-7-2	Migmatita	0.5	27.7	273.7	877.2	130.7	138.2	635.2	213.9	24.1	273.1	45.4	276.6	1187.1	46.6	112.4	13.3	73.6	8.8	
C-7-4	Migmatita	8.6	134.7	157.7	647.8	119.6	138.9	672.8	297.6	38.7	425	76.7	487.9	2077.2	83.9	208.3	26.8	158	18.9	Nutman, 2007
C-7-5	Migmatita	3.6	43.5	107.7	405.6	72.3	156.1	410	178.9	35.8	274.3	49.4	310.3	1328.1	54.1	130	15.3	84.3	9.8	
C-7-6	Migmatita	0.3	18	77.7	346.1	66.3	175.3	380.8	159	25.2	222.8	38.2	236	1007.2	39.5	95.4	11.5	64.6	7.7	Alto grado metamórfico
C-7-7	Migmatita	0.4	22.8	104.5	397.2	72.1	192	405.2	169.9	29.5	242.6	42.5	265.3	1161.8	45.7	111.5	13.5	77.5	9.3	
C-7-8	Migmatita	0	10	95.1	360.7	66.4	167.2	380	153.1	28.1	206.1	34.2	205.1	828.5	34.2	79.1	9.1	48.4	5.4	
TCH0011	Paragneis Anfibolita Sup Leucosoma	0.126	13.9	109.9	440.1	78.1	142	470	198.9	17.6	272.8	47.99	310.9	1421	55.1	133.2	13.72	62.93	6.76	Henrichs et al. 2018

TCH0012	Paragneis Anfibolita Sup Leucosoma	0.506	35.97	342.8	1201	179.1	176.3	925	341.1	11.27	401.7	60.79	314	1097	40.97	70.8	5.566	20.86	1.733	Alto grado metamórfico
TCH0013	Paragneis Anfibolita Sup Leucosoma	0.175	11.97	65.2	275.4	52.4	146.7	328.3	155.2	20.41	224.6	40.74	262.7	1127	44.99	100.6	9.5	39.8	3.99	
TCH0014	Paragneis Anfibolita Sup Leucosoma	0.105	23.38	184.8	730	113.4	126.7	623	229.9	15.55	258.1	41.04	232.5	848	34.37	71.3	6.56	27.69	2.78	
TCH0015	Paragneis Anfibolita Sup Leucosoma	2.2	40.3	335.8	1184	174.9	174.2	932	361	11.75	445	69.4	389	1610	52.9	104	9.51	40.7	4.13	
TCH0016	Paragneis Anfibolita Sup Leucosoma	0.144	15.06	130	524	88.9	142	511	202.4	18.55	233.4	38.45	227.9	864	36.16	83.6	8.58	41.62	4.428	
TCH0017	Paragneis Anfibolita Sup Leucosoma	0.0316	10.41	22.55	135.3	32.91	138.1	249.5	192.2	28.34	401	91.4	704	4170	139.8	361	38.6	177.6	18.57	
TCH0018	Paragneis Anfibolita Sup Leucosoma	0.117	16.39	181.5	718	115.3	114.9	647	239.9	17.51	264.7	41.54	235.3	852	35.15	74.7	7.21	31.91	3.405	
TCH0019	Paragneis Anfibolita Sup Leucosoma	0.0751	15.89	184.9	712	113.8	137.7	630	233	18.1	253.2	39.82	227.7	883	36.11	80.7	8.2	38.11	4.024	
TCH00110	Paragneis Anfibolita Sup Leucosoma	0.095	13.83	40.85	210	44.9	137.2	294.6	157.8	19.79	218.9	39.41	245.6	1027	41.47	92.3	9.65	43.14	4.666	
TCH00111	Paragneis Anfibolita Sup Leucosoma	4.19	46.5	375.4	1313	195.7	175	1021	379.2	12.45	418.9	59.8	301.3	1204	38.64	72.7	7.44	34.59	3.385	
TCH00112	Paragneis Anfibolita Sup Leucosoma	0.289	21.33	163.8	637	104	131.2	605	254.3	15.44	357.9	66.6	454	2265	80.5	194.1	20.8	97.7	10.8	

TCH00113	Paragneis Anfibolita Sup Leucosoma	0.4	24.81	173.2	674	107.1	172.9	580	232.3	10.2	286.6	50.6	323.7	1361	53.65	123.4	13.75	68.6	7.23
TCH00114	Paragneis Anfibolita Sup Leucosoma	0.253	21.12	168.5	679	109.8	135.2	629	254.9	18.22	322	57.3	361	1510	58.3	132	13.7	64	6.88
TCH00115	Paragneis Anfibolita Sup Leucosoma	0.242	17.31	92.3	388.5	71.6	143.1	425	179.8	19.34	219.6	36.46	224.1	844	35.26	78.8	8.24	37.96	4.17
TCH00116	Paragneis Anfibolita Sup Leucosoma	0.196	15.47	99.8	387.3	69.8	134.6	408.2	177.4	18.51	239.6	42.04	266.9	1093	43.39	95.5	9.32	41.02	4.519
TCH00117	Paragneis Anfibolita Sup Leucosoma	0.022	36.6	95.1	522	103	174.6	630	289.9	11.12	368.8	60.4	329.1	1366	43.95	85.4	8.64	43.5	4.89
TCH00118	Paragneis Anfibolita Sup Leucosoma	0.079	13.6	46.62	237	50.6	132	321.3	165.5	17.45	220.8	38.26	239.3	913	37.78	86.1	8.97	41.98	4.65
TCH00119	Paragneis Anfibolita Sup Leucosoma	0.461	17.56	80	331.7	61.7	124	376.3	167.8	20.65	224.4	39.36	252.1	1000	40.1	89.6	8.26	34.67	3.644
TCH00120	Paragneis Anfibolita Sup Leucosoma	0.124	16.22	70.3	324.9	63.9	133.1	401.7	174.5	17.32	209.8	34.73	213.7	800	33.26	76.6	7.68	34.8	3.712
TCH00121	Paragneis Anfibolita Sup Leucosoma	0.0688	14.91	54.6	274.3	55.7	132.2	355.8	173.4	23.09	225.7	39.1	245.6	908	36.13	81.5	8.66	44.92	5.19
TCH00122	Paragneis Anfibolita Sup Leucosoma	0.352	20.48	80.1	366.1	70.8	134.6	437	188.6	18.21	233.4	38.62	230	804	33.24	69	6.42	28.2	2.964
TCH00123	Paragneis Anfibolita Sup Leucosoma	0.117	16.3	144.2	574	92.3	133.2	531	208.8	19.07	246.4	40.94	260.9	1018	41.62	99.1	10.11	48.01	5.267

TCH00124	Paragneis Anfibolita Sup Leucosoma	0.179	16.77	149.4	571	94.8	134.1	533	213.3	19.26	257.1	42.27	274.4	1079	43.76	107	10.8	51.18	5.64
TCH00125	Paragneis Anfibolita Sup Leucosoma	0.326	26.35	97.3	425	79	131.1	474.7	196.7	12.72	231.6	37.39	227	840	32.94	75.4	7.3	33.4	3.64
TCH00126	Paragneis Anfibolita Sup Leucosoma	0.1	21.85	213.4	799	122.6	123	667	248.5	18.13	287.3	45.9	273.2	967	37.4	78.3	6.57	27.85	2.821
TCH00127	Paragneis Anfibolita Sup Leucosoma	0.278	15.55	73.2	310.2	59.1	130.8	364.3	159.2	17.66	205	34.52	219.9	799	33.41	75.7	7.17	33.88	3.661
TCH00128	Paragneis Anfibolita Sup Leucosoma	0.281	14.79	82.9	356.8	68.2	140.8	411	175.3	18.32	222.4	38.23	250.6	978	39.39	96.4	9.89	47.7	5.4
TCH00129	Paragneis Anfibolita Sup Leucosoma	0.142	12.14	104.2	411.8	74	132	435.4	177	17.49	222.7	35.86	219.7	715	30.2	64.1	5.91	28.7	3.123
TCH00130	Paragneis Anfibolita Sup Leucosoma	0.085	15.57	129.6	516	89.4	131.8	506	194.3	14.35	211.5	34.99	213.5	718	31.24	73.7	7.52	37.23	3.861
TCH00131	Paragneis Anfibolita Sup Leucosoma	0.089	13.77	100.4	410.7	74.3	132	440.5	190	17.97	247.8	41.71	266.9	964	38.72	84.4	7.52	32.81	3.523
TCH00132	Paragneis Anfibolita Sup Leucosoma	0.0266	16.72	149	556	94.4	137.5	512	189.1	13.61	202.8	33.98	219.7	778	33.56	83.9	9.35	49.12	5.42
TCH00133	Paragneis Anfibolita Sup Leucosoma	0.162	15.94	154.2	626	102.8	130.3	578.2	213.3	16.64	234.8	36.84	224.1	753	32.82	74.1	6.79	29.31	2.997
TCH00134	Paragneis Anfibolita Sup Leucosoma	0.0648	12.06	32.27	183.8	41.14	131.8	281.3	159.2	15.49	234.2	43.75	296.8	1189	47.16	113.1	10.31	45.24	5.01

TCH0031	Paragneis Anfibolita Superior	1.4	36.3	369.3	1261	194.3	170.4	1013	382.1	10.79	447.1	66.95	349.7	1243	42.97	62.5	5.74	24.35	1.899	
TCH0032	Paragneis Anfibolita Superior	0.079	16.59	274.8	951	143.3	170.7	741	282	9.66	324.4	53.09	334.5	1367	56.32	117.1	14.77	80.5	7.46	
TCH0033	Paragneis Anfibolita Superior	0.0541	9.67	124.1	506.8	91.5	144.4	535.4	228.6	16.29	274	43.52	253.7	928	38.25	67.98	7.02	32.25	2.742	
TCH0034	Paragneis Anfibolita Superior	0.0628	7.459	77.3	343.4	67.8	139.1	418.7	197.4	16.56	263.2	44.47	282.5	1209	48.65	98.6	10.92	50	4.506	
TCH0035	Paragneis Anfibolita Superior	3.083	29.17	347.3	1196	179.2	168.6	923	361.9	11.65	435	66	344.6	1298	43.7	71.8	7.69	39.76	3.389	
TCH0036	Paragneis Anfibolita Superior	0.019	12.66	167.9	680	119.9	147.7	672	278.5	10.76	339.5	54.8	300.3	991	40.56	63.7	5.55	20.9	1.497	
TCH0037	Paragneis Anfibolita Superior	0.0096	14.99	171.2	680.1	119.1	132.5	692.3	264.4	15.35	294.8	48.51	262.6	863	37.74	72.3	6.59	27.35	2.715	Henrichs et al. 2018
TCH0038	Paragneis Anfibolita Superior	0.876	39.07	376.2	1294	192.4	174.2	1007	360.6	10.15	393	59.83	301.2	1009	38.55	66.75	5.6	23.18	2.265	Alto grado metamórfico
TCH0039	Paragneis Anfibolita Superior	0.212	12.98	78.4	338.8	65.24	141	418.1	193.6	17.66	258.5	46.77	281.3	1033	44.82	97.4	8.8	36.42	3.863	
TCH00310	Paragneis Anfibolita Superior	0.135	17.3	180.4	687	118.2	146.2	683	269	18.89	328.8	55.82	311.9	1051	45.24	89.2	7.59	30.62	3.319	
TCH00311	Paragneis Anfibolita Superior	0.026	12.21	146.4	582.8	104.3	132.4	623.4	245.4	14.39	304.4	52.01	310.6	1101	47.65	95.8	7.65	27.24	2.833	
TCH00312	Paragneis Anfibolita Superior	0.134	12.07	41.61	185.3	37.83	140.2	255	133.7	19.26	197.1	37.03	232.1	933	37.23	82.6	7.6	32.39	3.871	
TCH00313	Paragneis Anfibolita Superior	0.128	7.85	46.31	252.8	54.5	138.1	380.2	201.9	14.23	260.3	47.61	268.2	897	38.44	78.6	6.607	26.15	2.75	
TCH00314	Paragneis Anfibolita Superior	0.355	20.8	149	574.7	102.6	140.3	635	289.7	19.51	437	89.5	607	2790	103.9	245	22.6	104.2	12.7	

TCH00315	Paragneis Anfibolita Superior	0.078	11.3	34.95	181.5	40.56	145.3	290.3	164	18.55	240.6	46.57	290.9	1066	45.03	101.6	9.06	38.25	4.36
TCH00316	Paragneis Anfibolita Superior	3.37	54.4	299.6	1078	171.4	177.7	992	387.9	13.12	468	75.4	364.4	1144	39.11	63	4.7	18.71	1.849
TCH00317	Paragneis Anfibolita Superior	1.993	46.87	125.4	541	103.8	179.3	644	295.9	9.35	385.6	65.22	338.2	1128	40.76	74.6	6.03	23.97	2.303
TCH00318	Paragneis Anfibolita Superior	1.831	56.93	207.4	718	117.8	179.3	639.9	243	12.46	290.2	53.27	342.6	1307	53.1	131	13.28	62.86	6.81
TCH00319	Paragneis Anfibolita Superior	2.976	50.68	200.3	753	125.5	176.3	742.1	319.4	10.03	456.4	89.5	579.3	2441	87.2	194.3	17.44	73.9	7.99
TCH00320	Paragneis Anfibolita Superior	0.438	61.37	352.1	1191	181.6	176.5	993	346	10.98	404.3	69.93	410	1439	56.21	113.9	9.2	35.93	3.496
TCH00321	Paragneis Anfibolita Superior	0.579	35.56	284.1	972	146.4	171.9	792	273.6	10.36	297.5	53.03	325.6	1145	49.1	116.2	11.3	50.31	5.34
TCH00322	Paragneis Anfibolita Superior	0.0349	17.58	90.2	388.4	76.9	126	503.5	244.3	12.96	380.1	80.6	576.6	2641	99.8	253.8	24.83	111.8	13
TCH00323	Paragneis Anfibolita Superior	0.206	20.68	245.5	875	141.7	137.4	804	283.2	18.46	295.3	50.1	299.2	988	44.28	107.3	10.06	43.03	4.695
TCH00324	Paragneis Anfibolita Superior	0.209	27.44	301.5	1038	160.1	173.2	883	318.4	10	376.5	67.63	432.3	1593	66.66	158.7	15.82	71.91	7.38
TCH00325	Paragneis Anfibolita Superior	0.092	10.9	81.4	337.3	67.19	133.8	425.7	184.4	17.83	226.3	39.81	235.3	746	32.77	72.87	6.36	25.68	2.547
TCH00326	Paragneis Anfibolita Superior	0.782	38.54	327.8	1108	168.7	177.9	930	323	9.35	359.2	61.14	356.1	1171	47.82	103.5	9.33	38.77	3.833
TCH0071	Paragneis Anfibolita Superior	0.166	11.97	55.6	259.6	58.5	280	415.8	204.1	48.4	275.7	48.48	274.6	1001	42.93	74.8	7.19	32.2	3.444
TCH0072	Paragneis Anfibolita Superior	0.288	94.3	87	339.5	65.8	320.8	424.1	185.8	50.15	269.6	51.71	354	1748	72.4	164.7	19.88	104	12.89

TCH0073	Paragneis Anfibolita Superior	17.7	127	185.4	709	138.3	282.9	979	646	98.5	1566	389	3232	19970	716	1598	184.3	858	103.8
TCH0074	Paragneis Anfibolita Superior	0.101	10.23	206.3	754	129.7	266.7	757	279	44.08	328.7	54.96	319.4	1186	51.88	93.7	8.61	33.02	3.58
TCH0075	Paragneis Anfibolita Superior	0.116	5.49	59.14	248.4	50.7	289.7	344.7	127.9	53.01	111.8	22.85	171.3	873	38.81	108.8	16.61	98	12.47
TCH0076	Paragneis Anfibolita Superior	0.298	7.83	53.6	210.2	41.35	294.4	289.7	141.9	56.6	199.6	38.63	239.1	966	39.89	89.2	10.46	54.7	6.63
TCH0077	Paragneis Anfibolita Superior	0.264	10.47	51.7	211.3	42.42	314.8	304.7	154.7	55.97	223.4	42.45	254.4	958	39.17	79.5	8.15	39.01	4.281
TCH0078	Paragneis Anfibolita Superior	0.184	13.18	51.27	209.5	42.35	286.6	307.3	155.8	50.67	219.3	40.96	238.7	899	36.57	74.1	7.48	34.14	3.846
TCH0079	Paragneis Anfibolita Superior	0.26	46.6	56.6	219.7	42.75	305.7	282.2	131.6	58	188	36.84	228.3	1024	38.97	89	10.27	54.39	6.53
TCH00710	Paragneis Anfibolita Superior	0.123	25.49	94.4	378.1	74.5	299.9	511.3	206	50.06	268	50.09	310.8	1339	53.35	121.9	13.07	60.8	7.3
TCH00711	Paragneis Anfibolita Superior	0.0367	19.58	195.9	686	118.1	297.7	751	259	47.13	276.1	44.64	233.8	780	31.63	60.7	5.6	23.21	2.311
TCH00712	Paragneis Anfibolita Superior	0.39	25.46	241.5	805	128.8	236.8	745	267.2	15.35	320.6	57.6	321.8	1324	46.34	92.9	9.56	42.4	4.12
TCH00713	Paragneis Anfibolita Superior	0.096	10.86	52.1	224.7	47.3	310.1	343.9	171.2	55.5	228.6	42.4	250.2	970	38.17	79.1	8.14	37.67	4.24
TCH00714	Paragneis Anfibolita Superior	0.077	10.96	55.3	232.6	48.9	290.5	364.7	174.2	56.8	227.7	41.77	241.6	927	36.82	77.3	8.1	37.51	4.209
TCH00715	Paragneis Anfibolita Superior	0.084	7.79	62.9	258	52.2	308.2	374.8	177.4	57.6	252.9	47.47	286.2	1157	44.71	90	8.32	36.22	3.892
TCH00716	Paragneis Anfibolita Superior	0.242	7.83	51.78	216.3	45.3	297.6	340.1	160.4	47.19	218.4	39.58	231.4	856	35.58	74.3	7.44	32.33	3.597

TCH00717	Paragneis Anfibolita Superior	0.118	7.08	57.5	252.2	52.6	250	397.3	199.2	41.97	293.4	57.27	330.6	1230	48.36	85.1	7.21	29.88	3.314	
TCH00718	Paragneis Anfibolita Superior	0.0284	4.037	85.4	408.2	84.8	301.6	566	206.4	41.5	205.7	36.46	225.5	978	39.75	107.7	15.46	96.2	13.09	
TCH00719	Paragneis Anfibolita Superior	0.639	26.44	223.1	749	119.6	253.8	692	259.4	18.04	314.5	58.8	350.7	1553	55.08	126.2	15.49	85.8	10.12	
TCH00720	Paragneis Anfibolita Superior	0.292	7.81	53.3	205.6	40.41	278.2	275.2	133.5	50.9	183	36.33	227.4	939	39.39	91.6	10.83	58.03	6.88	
TCH00721	Paragneis Anfibolita Superior	0.286	7.581	53.2	199.8	38.9	276.3	262.4	131.3	49.38	181.9	35.61	228.1	927	39.3	91.8	10.73	56.41	6.83	
TCH00722	Paragneis Anfibolita Superior	0.453	15.54	54.5	212.8	41.61	303.4	282.7	145.3	57.06	198.5	38.71	240.9	964	40.2	92.5	10.57	54.93	6.72	
TCH00723	Paragneis Anfibolita Superior	0.19	8.7	56.3	226	46	319.3	317.1	164.6	56.2	232.8	44.24	270.1	1072	43.81	89.8	8.27	35.82	3.97	
TCH00724	Paragneis Anfibolita Superior	0.121	7.52	57.4	246.3	51.8	322.2	368.7	184	58	246.4	45.52	266.5	988	40.42	77.9	7.29	33.46	3.71	
RM131	Paragneis Anfibolita Superior	1.48	16.6	170.3	634	111.8	120.3	664	271.4	14.05	343.5	58.8	390.8	1996	73.2	193.8	25.3	142.2	17.47	
RM132	Paragneis Anfibolita Superior	2.581	24.13	143.2	561.5	109.4	115.2	700	324.3	20.86	421.8	73.9	480	2342	85.8	223.3	28.67	163.1	19.52	
RM133	Paragneis Anfibolita Superior	0.176	7.74	114.9	462.8	90.3	117.5	571.6	252.4	14.81	323.3	54.59	356.4	1766	64.1	164.8	20.63	115.2	13.92	Henrichs et al. 2018
RM134	Paragneis Anfibolita Superior	15.74	78.5	237.2	993	169.2	121.1	1010	430.1	22.68	549	97.8	657	3394	123.3	336.9	44.2	257.4	32.15	Alto grado metamórfico
RM135	Paragneis Anfibolita Superior	1.114	24	155.8	650.9	127.2	114.6	790.7	360.9	21.05	453.5	77.92	514	2569	91.4	241.9	31.29	180.4	21.64	
RM136	Paragneis Anfibolita Superior	0.979	21.27	166.4	692	131.8	116.7	816	344.8	19.46	429.2	73.03	474.4	2402	85.3	224.4	28.5	161.9	19.36	

RM137	Paragneis Anfibolita Superior	0.52	13.12	137.8	514.5	92.1	118.5	558	245.1	14.36	321.2	55.24	366.1	1934	68.23	181.3	23.81	135.3	16.72
RM138	Paragneis Anfibolita Superior	6.24	49.9	200.1	797	142	118.3	851	374	21.34	472.6	82	551.5	2863	99.3	263.7	34.66	198.4	24.37
RM139	Paragneis Anfibolita Superior	1.046	15.02	126.1	525.7	102.6	117.1	638	284.5	16.71	360.2	61.7	394.8	2051	70.4	182.9	23.27	133	15.86
RM1310	Paragneis Anfibolita Superior	14.2	98.4	273.6	1127	192	122.5	1131	479.9	25.5	604.5	107.9	720.3	3873	135	370.7	49.79	292.2	36.1
RM1311	Paragneis Anfibolita Superior	0.343	11.78	140.1	557.2	102.1	120.6	618.5	263.9	15.05	331.9	56.52	363.5	1911	66.19	171.9	22.01	125.2	15.25
RM1312	Paragneis Anfibolita Superior	2.345	26.36	158.2	652.6	123.4	119	761	343.5	20.16	447.9	79.3	514.9	2691	93.3	249.4	32.47	183.2	22.31
RM1313	Paragneis Anfibolita Superior	1.143	21.29	166.1	699	130.1	119.8	792	342.7	19.44	430.3	74.2	478.2	2478	86.26	225.6	28.93	164	20.04
RM1314	Paragneis Anfibolita Superior	9.49	67.3	233.3	981	161.4	118.8	928	402	21.38	512	90.2	601	3168	112.5	302.6	40	228.5	27.85
RM1315	Paragneis Anfibolita Superior	11.12	83.4	222.5	950	161.5	119.7	983	443.8	24.48	568.9	100.8	667	3572	126.1	337.8	44.94	262.6	32.1
RM1316	Paragneis Anfibolita Superior	4.12	36	222.9	896	146.3	120.9	814	337.8	15.49	438.2	79.7	540	3102	105.9	297.4	39.68	233.6	29.37
RM1317	Paragneis Anfibolita Superior	11.1	29.15	151.5	585	106.7	117.7	635	288.9	16.48	371.1	65.1	421	2158	77.2	202.3	26.38	149.3	18.45
RM1318	Paragneis Anfibolita Superior	6.41	49.43	203.7	816	141.4	117.8	851	365.3	20.04	461.8	79.7	532	2744	98.7	260.2	34.13	196.9	24.47
RM1319	Paragneis Anfibolita Superior	0.57	12.47	151.1	554.2	98.6	120.2	579.8	251.2	14.75	320.3	55.55	355.6	1829	65.26	168.4	22.2	126.4	15.52
RM1320	Paragneis Anfibolita Superior	3.742	33.81	199.6	745	134.2	120.5	784	331.1	18.24	421.3	73.9	478.7	2172	89.9	235.6	31.19	182.4	22.54

RM1321	Paragneis Anfibolita Superior	0.364	20.53	150.8	680	132.9	115.3	816	369.3	21.63	462.6	81.2	516.2	2265	94.6	242.2	30.94	177.2	21.06
RM1322	Paragneis Anfibolita Superior	1.893	27.98	164.7	642	118.5	120.7	716	324	18.31	435.6	77.1	500.3	2314	96.3	253.2	33.11	187.8	22.96
RM1323	Paragneis Anfibolita Superior	2.319	26.69	148.7	564.2	103.8	118.3	628	284.2	17.46	378.5	67.86	441.7	2002	82.7	217.1	28.48	163.5	20.09
RM1324	Paragneis Anfibolita Superior	1.141	19.55	133.8	516.9	96.4	116.6	585	265.5	15.91	343	60.2	381.5	1750	71.8	186.7	24.32	139.6	17.03
RM1325	Paragneis Anfibolita Superior	2.269	32.72	179.2	728	131.9	121.9	767	332.5	18.37	424.1	74.2	474.9	2115	89.1	232.9	29.66	168.3	20.2
RM1326	Paragneis Anfibolita Superior	5.01	43.89	189.5	766	136.5	120.1	812	358.3	19.41	450	79.5	506	2299	95.6	250.4	33.08	189	23.56
RM151	Paragneis Anfibolita Superior	170.5	1421	534.8	2259	381.9	85.3	2147	1130	64.2	1383	260.6	1740	7890	339.9	994	156.2	1094	146.6
RM152	Paragneis Anfibolita Superior	7.06	110.3	189.2	718	126.8	87.6	728	375.3	20.1	448.5	82.3	538.3	2552	107.4	306.3	45.48	297.9	39.75
RM153	Paragneis Anfibolita Superior	2.563	142.9	128.1	576.8	108.1	87.6	647.8	368.1	16.87	598.3	114.3	726.4	3356	125	273.2	28.62	135.2	14.38
RM154	Paragneis Anfibolita Superior	10.17	126.9	202.4	809	140.3	86.6	815	422.2	21.31	510.4	91.2	579.6	2612	110	294.2	41.46	256.6	32.68
RM155	Paragneis Anfibolita Superior	0.887	29.49	120.5	465.4	81.4	85.4	474	242.7	14.51	301	53.63	323.6	1408	58.03	151.9	21.46	144.2	19.32
RM156	Paragneis Anfibolita Superior	1.472	38.23	132.7	496.5	84.8	87.4	488	252.8	15.39	330.6	58.75	363.6	1584	64.76	163.2	21.28	127.9	16.35
RM157	Paragneis Anfibolita Superior	2.149	41.31	154.3	562.6	94.5	88	533.8	269.1	17.11	352.5	63.55	387.1	1718	70.32	191.3	28.73	199	27.17
RM158	Paragneis Anfibolita Superior	4.906	96.2	159.5	638	117.3	81.6	689	371.5	23.97	437.6	79.1	488.7	2117	89	237.4	33.85	212.7	27.73

RM159	Paragneis Anfibolita Superior	1.93	38	142	545.8	93.5	87.7	537.3	274.8	15.19	344.2	62.2	391.5	1837	73.4	192.1	26.15	161.7	21.08
RM1510	Paragneis Anfibolita Superior	4.277	85.5	173.9	722.1	129.7	85.2	753	375.8	19.13	447.9	80.4	512	2405	96.2	252.6	34.42	207.8	25.85
RM1511	Paragneis Anfibolita Superior	9.36	123	200.1	887	150.8	89.7	856	421	20.19	500.9	91.1	578.5	2752	108.8	288.3	38.96	231.3	28.26
RM1512	Paragneis Anfibolita Superior	2.68	45	116.4	460.4	82.8	80.5	501	266	18.1	321.7	55.9	339.7	1535	61.8	167.5	24.58	168	22.15
RM1513	Paragneis Anfibolita Superior	11.25	131.9	213.9	828	137.9	88.2	783	384.6	23.67	461.4	82.5	540.6	2684	108.4	310.8	47.32	315.9	41.32
RM1514	Paragneis Anfibolita Superior	3.45	67.43	156	667.3	118.3	90.6	696.7	342.9	17.77	420.4	75.95	486.1	2388	93.6	241.6	31.83	184.6	21.71
RM1515	Paragneis Anfibolita Superior	1.414	34.1	120.9	458.5	79	82.3	465.3	244.7	15.88	292.1	51.34	315.9	1481	56.85	146.1	20.2	126.4	16.14
RM1516	Paragneis Anfibolita Superior	4.01	49.9	114.9	461	82.3	79.5	498	261.5	17.29	306	52.8	318	1460	57.3	151	20.96	135.9	17.26
RM1517	Paragneis Anfibolita Superior	14.36	162.7	194.5	730	130.7	81.4	768	400.1	26.63	502.2	89.2	570	2740	104	278	40.05	259.8	33.65
RM1518	Paragneis Anfibolita Superior	2.345	43.71	153.1	548.1	97.6	87	560.5	274.8	15.48	320.8	55.44	365.1	1880	70.44	206.5	31.74	222.2	29.9
RM1519	Paragneis Anfibolita Superior	8.49	108.6	193.6	717	130.8	86.6	767	381.8	20.88	485.1	84.9	554.3	2707	103.1	272.2	37.97	247.1	32.35
RM1520	Paragneis Anfibolita Superior	16.71	230.9	230.9	977	175.2	83.3	1054	544.1	30.85	654.4	114.7	739.2	3571	136.2	366	52.17	335.1	42.62
RM1521	Paragneis Anfibolita Superior	6.07	84	180.3	638	114.1	86.3	644	319.9	19.31	381.2	66	438	2257	84.4	244.6	38.6	268.4	36.3
RM1522	Paragneis Anfibolita Superior	4.7	80.8	159.4	601.3	116	83.1	684	361.3	22.9	425.7	73.9	472.8	2335	86.6	237.7	34.74	230	29.97

RM1523	Paragneis Anfibolita Superior	6.3	86.2	175.3	640.5	117.5	86.2	680.4	340	18.55	413	72.1	467.9	2343	86.5	230.6	33.03	206.5	26.76	
RM1524	Paragneis Anfibolita Superior	1.716	39.21	145.3	544.8	101.9	88.6	588.6	284.3	14.68	345.7	58.95	381.8	1987	70.84	186.9	25.31	154.2	19.2	
RM1525	Paragneis Anfibolita Superior	21.3	222	215	811	145	86.2	810	414	25.8	514	93.1	623	3130	118	344	52.9	366	49.3	
RM1526	Paragneis Anfibolita Superior	1.269	47.9	120.3	515	102.3	87.3	612.6	305.3	16.29	366.8	64.3	411.4	2131	76.4	194.7	25.31	139.2	16.51	
RM1527	Paragneis Anfibolita Superior	33.13	316.8	312.3	1229	208	88.6	1198	596.5	32.35	756.2	134.4	896.6	4521	167.7	469.2	71.03	479.1	64.3	
RM1528	Paragneis Anfibolita Superior	10.11	112.9	190.5	684	123.6	87.6	709	359	20.14	439	77.6	507	2562	93.2	253	36.2	232	30	
VB221AP9	Granito tipo S	1	48	242	861	149	145	735	277	7	370	68	472	2750	104	291	42	258	35	Sha & Chappell 1999