

**Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra**



Geoquímica y Tectónica de la Secuencia Terrígena Mesozoica de la Región de
Tlalpujahua, Michoacán

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
MAESTRO EN GEOCIENCIAS Y PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO**

PRESENTA:

Omar Lerma Rodríguez

ASESOR DE TESIS

Dr. Pedro Corona Chávez

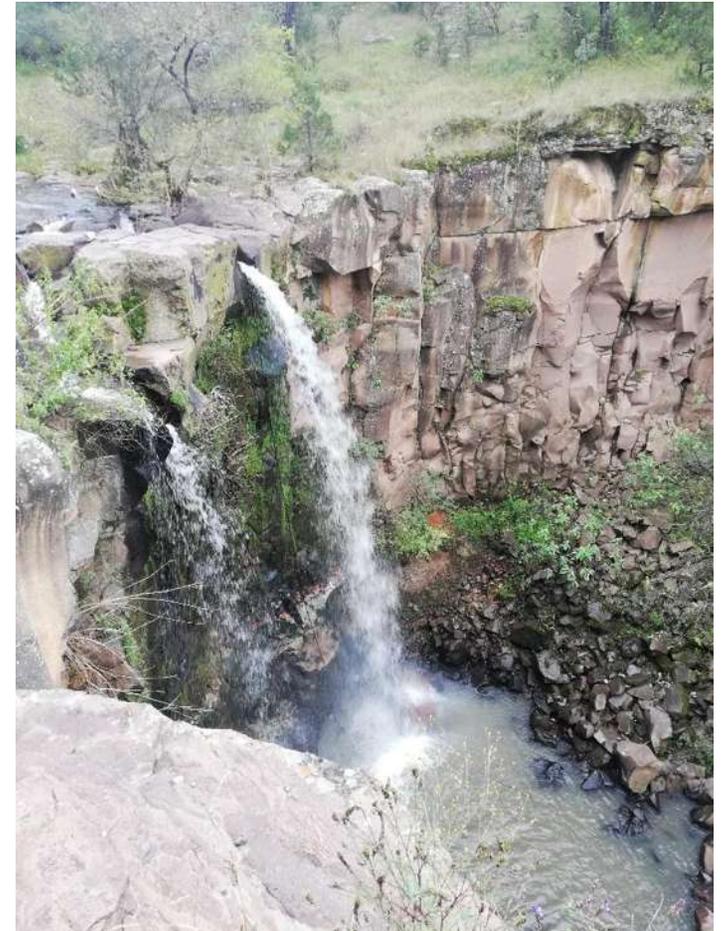


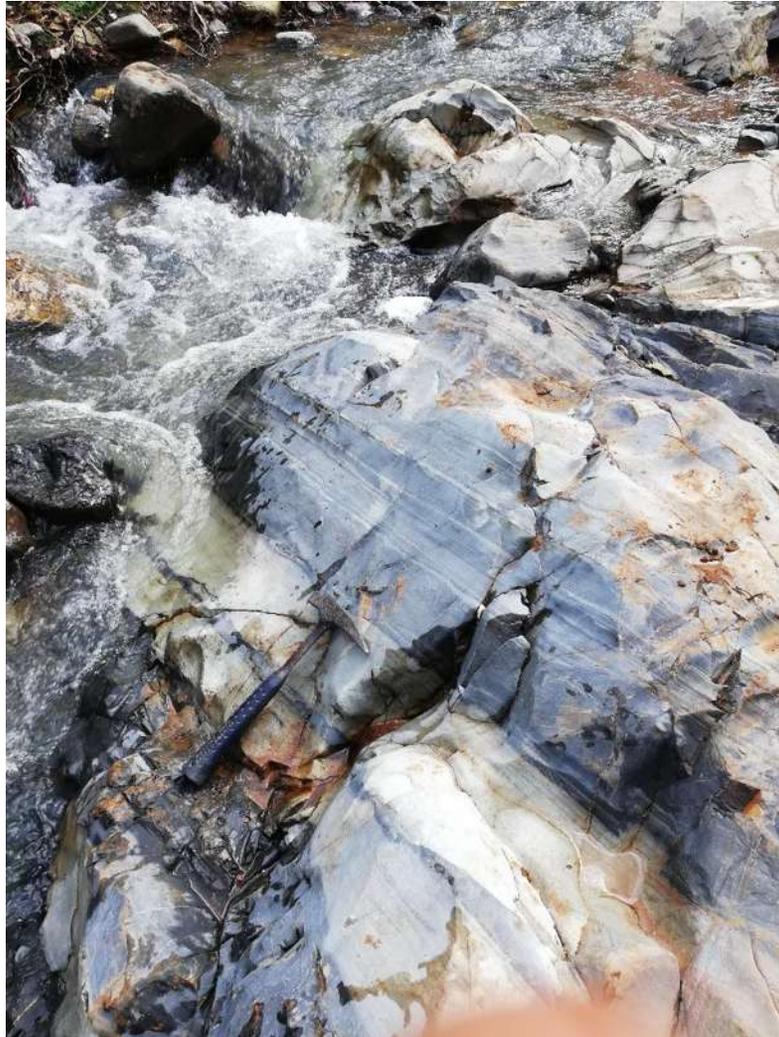
Morelia, Michoacán

agosto de 2020



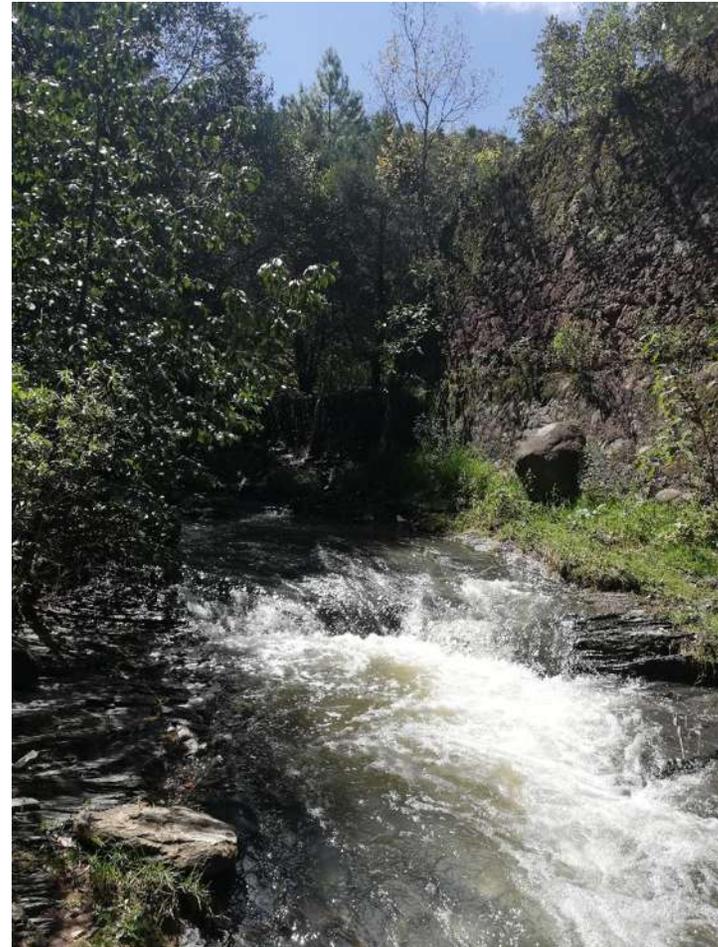
Mientras más difícil se haga mi camino Dios multiplicará mis fuerzas y mientras más fuertes se hagan mis pruebas más grandes serán mis victorias.





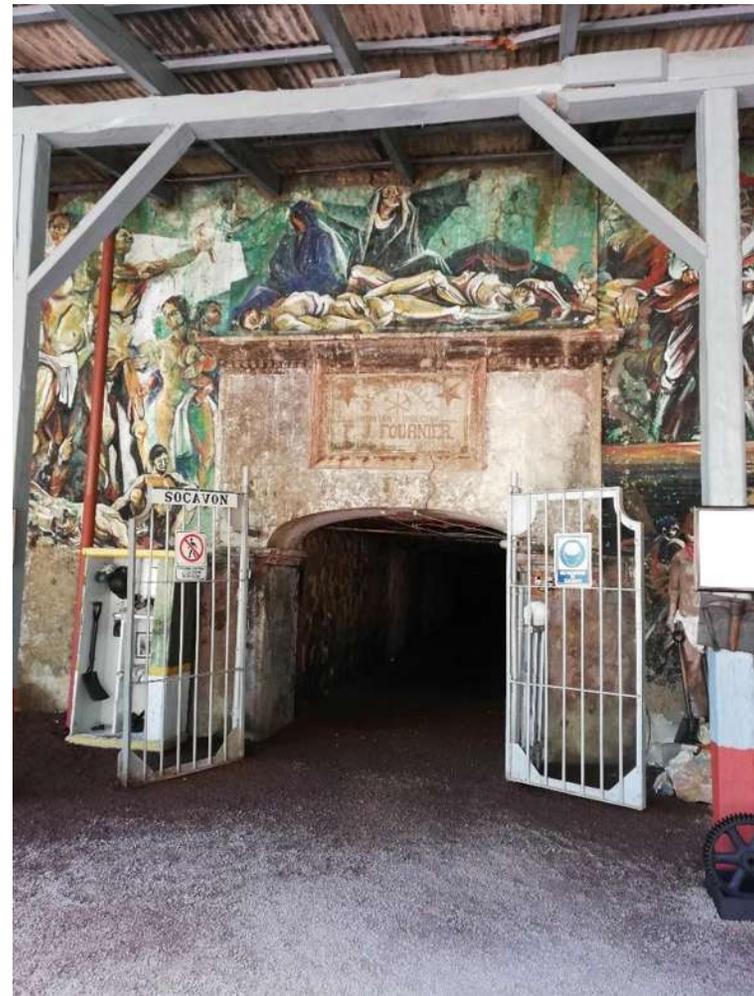
El éxito en la vida no se mide por lo que logras, sino por los obstáculos que superas.

Nuestra mayor gloria no está en no caer nunca, sino en levantarse cada vez que caemos.





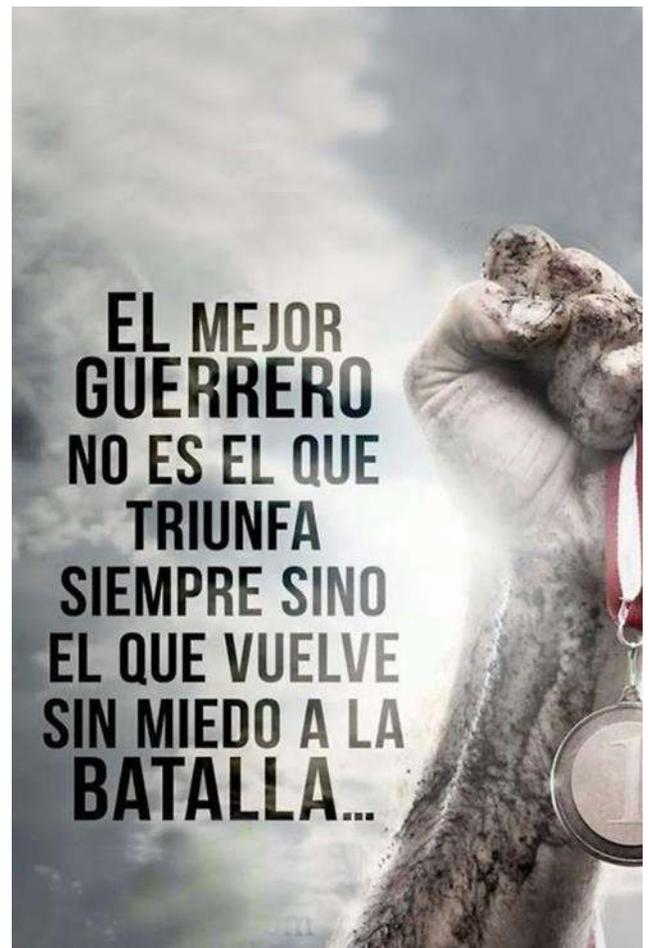
Nunca dejas de aprender porque la vida nunca deja de enseñarte.



Dedicatoria

Este trabajo se lo dedico a todas las personas que me han apoyado durante este tiempo de la maestría, principalmente a mis seres queridos que son mis padres Elio Omar Lerma Lozoya y María Guadalupe Rodríguez Leal, a mis hermanos Osvaldo Lerma Rodríguez, Esmeralda Lerma Rodríguez y Francisco Lerma Rodríguez, con quienes estoy muy agradecido con todo su apoyo, consejos, motivaciones para que siguiera adelante conforme iba avanzando y pasando el tiempo y por cada obstáculo que se me atravesaba.

Incluso a todos mis tíos y primos tanto por parte de mi padre y mi madre, que nos los menciono porque son demasiados, así como también mis amigos que aprecio mucho tanto de Linares y Morelia, que cuando tuvimos oportunidad de vernos, también me dieron todo su apoyo, motivaciones y los ánimos para que no me diera por vencido por cada dificultad que se me atravesara, agradecido con el de arriba (Dios) por ponerme a las mejores personas en mi vida y en esta etapa culminada.



Agradecimientos

Quiero agradecer primero que nada a mi asesor el Dr. Pedro Corona Chávez, por haberme aceptado como su tesista e incluso apoyado todo este tiempo, haberme orientado, comprendido en mis errores personales, haciéndomelos notar para mejorarlos día con día, pero sobre todo haberme tenido toda la paciencia del mundo en desarrollar este trabajo, ya que, sin él, mi sueño no se hubiera cumplido, gracias por todo y su amistad.

Agradezco también a mi amigo y M.C. Francisco Javier Gómez Rivera por su apoyo, ayuda y tiempo dedicado en la separación de zircones para su respectivo fechamiento que se llevó en el Laboratorio de la ENES-Morelia.

También al M.C. Felipe García Tenorio, por prestarme su laboratorio en el Instituto de Geofísica UNAM-Campus Morelia, para la elaboración de las restantes láminas delgadas de la segunda salida a campo realizada.

Al Dr. Carlos Ortega, quien nos apoyó y supervisó en los análisis y fechamiento por el método U-Pb de los zircones separados de las dos muestras de areniscas de este presente trabajo, los cuales se llevaron a cabo en el Laboratorio de Estudios Isotópicos (LEI) del Centro de Geociencias UNAM, Campus Juriquilla Querétaro.

Al Quím. Rufino Lozano, quien nos recibió las muestras pulverizadas para los análisis geoquímicos que fueron analizadas en el Laboratorio de Fluorescencia de Rayos X, en el Instituto de Geología- UNAM.

Al museo “Dos Estrellas” por prestarnos sus instalaciones para las salidas de campo realizadas en todo este tiempo.

También quiero agradecer al Dr. Juan Alonso Ramírez Fernández, Dr. Gabriel Chávez Cabello y al M.C. Federico Viera Decida de la Facultad de Ciencias de la Tierra-UANL, quienes me recomendaron para aspirar al posgrado de la Maestría en Geociencias y Planificación del Territorio, sobre todo muchas gracias por haberme aceptado y ser parte de él, que junto a los investigadores que forman parte de este posgrado, me aportaron todos sus conocimientos en esta etapa de mi vida profesional.

Por último, a los revisores de mi trabajo de tesis: Dr. Pedro Corona Chávez, Dra. Martha Gabriela Gómez Vasconcelos, Dra. María del Sol Hernández Bernal, Dr. Jesús Arturo Muñiz Jauregui, Dra. Isabel Israde Alcántara y Dr. Víctor Manuel Hernández Madrigal, quienes con sus observaciones y correcciones me ayudaron a mejorar la versión final de mi trabajo de tesis.

Finalmente agradecer a CONACTY por su beca otorgada en este tiempo que me permitió realizar mis estudios de la maestría.

Índice

Resumen

Capítulo 1. Introducción	1
Capítulo 2. Área de estudio	3
2.1 Localización, vías de comunicación y acceso.....	3
2.2 Fisiografía y clima.....	5
2.3 Hidrografía.....	7
Capítulo 3. Antecedentes	10
3.1 Marco tectónico (Terreno Guerrero).....	10
3.1.1 <i>El subterreno Zihuatanejo</i>	11
3.1.2 <i>El subterreno Arcelia</i>	12
3.1.3 <i>El subterreno Teloloapan</i>	13
3.2 Marco geológico de la Región de Tlaxpukahua.....	14
3.3 Dominios Morfoestructurales Regionales.....	20
3.3.1 <i>Dominios Lomeríos Arroyo El Carmen</i>	20
3.3.2 <i>Dominio de Colinas Sandia</i>	22
3.3.3 <i>Dominio Semi-Escudo San Miguel</i>	22
3.3.4 <i>Dominio de Laderas Pomoca</i>	22
3.3.5 <i>Dominio Mesas Ignimbritas América</i>	23
3.3.6 <i>Dominio Domos Tapaxco</i>	23
3.3.7 <i>Dominio Lenticular El Oro</i>	24
3.3.8 <i>Dominio Conos Tecomate</i>	24
3.3.9 <i>Sistemas morfo-estructurales</i>	24

Capítulo 4. Justificación y objetivos	26
4.1 Justificación.....	26
4.2 Objetivo general.....	26
4.3 Objetivos particulares.....	27
Capítulo 5. Metodología	28
5.1 Trabajo de gabinete.....	28
5.1.1 <i>Revisión de bibliografía y compilación de artículos</i>	28
5.1.2 <i>Compilación de material cartográfico y análisis espacial</i>	28
5.2 Trabajo de campo.....	29
5.2.1 <i>Verificación de contactos y elaboración del mapa geológico</i>	29
5.2.2 <i>Revisión de muestras de trabajos previos y colecta de muestras</i>	29
5.2.3 <i>Construcción de secciones transversales</i>	30
5.3 Trabajo de laboratorio e integración de datos.....	30
5.3.1 <i>Preparación de las láminas delgadas</i>	30
5.3.2 <i>Petrografía</i>	32
5.3.3 <i>Procesado de muestras para geoquímica (trituration y pulverización)</i>	32
5.3.4 <i>Separación, montaje y pulido de zircones</i>	33
5.3.5 <i>Isotopía U-Pb en zircones</i>	36
5.3.6 <i>Fluorescencia de rayos x</i>	39
5.3.7 <i>Integración e interpretación de resultados</i>	40
Capítulo 6. Resultados	41
6.1 Unidades geológicas del basamento de la Región de Tlalpujahua.....	41
6.1.1 <i>Sección Tlalpujahua-Santa María (A-A')</i>	42

6.1.2 Sección Arroyo San Pedro (B-B').....	42
6.1.3 Unidades geológicas de la Región de Tlalpujahua.....	45
6.1.3.1 <i>Secuencia Psammitas-Turbiditas (Arcosas) San Pedro (TJ-PTASP)</i>	48
6.1.3.2 <i>Secuencia Pelítica-Siliciclástica (Piroclástica) Tlalpujahuilla (J-PST)</i>	50
6.1.3.3 <i>Secuencia Volcánica-Andesítica El Carmen (JK-VAEC)</i>	52
6.1.3.4 <i>Secuencia Calcárea-Pelítica Dos Estrellas (K-CPDE)</i>	55
6.1.3.5 <i>Secuencia Calizas masivas Remedios (K-CR)</i>	57
6.2 Petrografía y Geoquímica de la Secuencia Psammitas-Turbiditas (Arcosas) San Pedro (TJ-PTASP) y Areniscas Coloradillas.....	59
6.2.1 Introducción.....	59
6.2.2 Secuencias psammiticas de la RT.....	59
6.2.3 Geoquímica.....	68
6.3 Geocronología e isotopía de U-Pb en circones detríticos.....	76
6.3.1 Introducción.....	76
6.3.2 Caracterización y diversidad de zircones.....	76
6.3.3 Edad de sedimentación de las areniscas.....	78
Capítulo 7. Discusión	86
7.1 Variaciones estratigráficas de la secuencia Psammitas-Turbiditas (Arcosas) San Pedro (TJ-PTASP) y volcánica-sedimentaria de la RT.....	86
7.2 Procedencia sedimentaria y tectónica de la secuencia Psammitas-Turbiditas (Arcosas) San Pedro (TJ-PTASP) y Areniscas Coloradillas.....	88
7.3 Relación de la secuencia Psammitas-Turbiditas (Arcosas) San Pedro (TJ-PTASP) y las Areniscas Coloradillas con el Terreno Guerrero.....	94
Capítulo 8. Conclusiones	99

Referencias.....101

Anexos

Anexo 1: Marco conceptual 1: Rocas sedimentarias

Anexo 2: Marco conceptual 2: Medios o ambientes sedimentarios

Anexo 3: Marco conceptual 3: Estructuras sedimentarias

Anexo 4: Marco conceptual 4: Rocas sedimentarias terrígenas

Anexo 5: Marco conceptual 5: Procedencia de sedimentos de areniscas

Anexo 6: Marco conceptual 6: Método Uranio- Plomo

Anexo 7: Descripción de muestras de mano (briquetas)

Anexo 8: Descripción petrográfica de areniscas

Anexo 9: Tabla petrográfica

Anexo 10: Descripciones de campo

Anexo 10.1: Sección Tlalpujahua- Santa María

Anexo 10.2: Sección Arroyo San Pedro

Anexo 10.3: Senguio

Anexo 10.4: Reconocimiento Coloradillas-Tlalpujahua

Anexo 11. Mapa geológico regional del Distrito Minero Tlalpujahua y El Oro

Listado de Figuras

- Figura 1.** a) Mapa de localización, vías de comunicación y acceso del área de estudio y b) Mapa de la República Mexicana donde se muestra que los estados en color rojo (Michoacán y Estado de México) nos indican donde se encuentra el área de estudio. Pág. 4
- Figura 2.** Provincias Fisiográficas de México en la cual se observa que la Región de Tlalpujahua (RT) pertenece a la provincia del Eje Volcánico o Cinturón Volcánico Mexicano (modificado de Bustamante-García, 2007). Pág. 6
- Figura 3.** a) Mapa hidrográfico del área de estudio con los principales ríos y arroyos, b) Mapa de las regiones hidrológicas del Estado de Michoacán donde RH 12: Lerma-Santiago (ubicación del área de estudio), RH 18: Centro o del Balsas, RH 17: Costa de Michoacán y RH 16: Armeria-Coahuayana (modificado de Bustamante-García, 2007). Pág. 8
- Figura 4.** Mapa de orden de drenaje (Corona-Chávez y Uribe-Salas, 2009). Pág. 9
- Figura 5.** Mapa de los terrenos tectonoestratigráficos de México donde se indica el área de estudio (RT: Región de Tlalpujahua) (modificado de Centeno-García *et al.*, 2008) Pág. 11
- Figura 6.** Mapa geológico regional tomado del informe *Carta geológico-minera El Oro de Hidalgo E14-A16 escala 1: 50 000 estados de Guerrero México y Michoacán.* Pág. 16
- Figura 7.** Mapa Geológico de la Región de Tlalpujahua tomado del Atlas Cartográfico del Distrito Minero de El Oro-Tlalpujahua (Corona-Chávez y Uribe-Salas, 2009). Pág. 17
- Figura 8.** Columna estratigráfica compuesta de la Región de Tlalpujahua (Rivera-Ruiz, 2016). Pág. 19
- Figura 9.** Mapa Morfoestructural de la Región de Tlalpujahua (Tomado de Rivera-Ruiz, 2016). Pág. 21
- Figura 10.** Cortadoras con sus respectivos modelos: a) AbrassiMet 250 de la marca Buehler, b) 10" Buehler Trim Saw + PF 10-10003-160, c) Thin Sectioning System Buehler y d) uso de vidrios con sus respectivos abrasivos (200, 400, 600 y 1000) para pulir la muestra. Pág. 31
- Figura 11.** a) Quiebra de las muestras, b) Trituradora de quijadas. Pág. 33
- Figura 12.** a) Preparación de materiales, b) Separación de los materiales y c) Bateo para separar los materiales pesados de los finos. Pág. 35

- Figura 13.** a) Cajas de Petri marcadas con nombre de la muestra, b) y c) Separación de zircones con una pipeta milimétrica. Pág. 35
- Figura 14.** a) Colocación de anillos sobre los zircones montados, b) y c) Preparación de la resina y catalizador para rellenar sobre los anillos para luego ser cortados y pulidos. Pág. 36
- Figura 15.** a) Microscopio Binocular SZX 12, b) Espectrómetro de masas (equipo de ablación láser). Pág. 37
- Figura 16.** Fotografías de zircones montados y pulidos de las muestras OL6 y OL14 tomadas con el Microscopio Binocular SZX 12, a) Zircones vistos con luz paralela, b) zircones con catodoluminiscencia. Pág. 38
- Figura 17.** Mapas de la localización de los puntos de análisis de las muestras OL6 y OL14. Pág. 39
- Figura 18.** Mapa geológico del Distrito Minero Tlalpujahua y el Oro donde las flechas nos indican las secciones geológicas. Pág. 43
- Figura 19.** Sección Tlalpujahua-Santa María (A-A') (Modificada de Rivera-Ruiz, 2016), en el cual se incluye el trazo de la sección. Pág. 44
- Figura 20.** Sección Arroyo San Pedro (B-B') (Modificada de Rivera-Ruiz, 2016), en el cual se le incluye el trazo de localización. Pág. 46
- Figura 21.** Columna estratigráfica compuesta de la Región de Tlalpujahua (Modificada de Rivera-Ruiz, 2016). Donde TJ-PTASP: Triásico-Jurásico – Secuencia Psammitas-Turbiditas (Arcosas) San Pedro; (J-PST): Jurásico – Secuencia Pelítica Siliciclástica Tlalpujahuilla; (JK-VAEC): Jurásico Cretácico – Secuencia Volcánico Andesíticos El Carmen; (K-CPDE): Cretácico – Secuencia Calcárea-Pelítica Dos Estrellas; (K-CR): Cretácico- Secuencia Calizas Remedios; CPO: Conglomerados post-orogénicos; IFA: Ignimbritas “Formación Las Américas” y CBA: Basaltos-andesitas del Cuaternario. Pág. 47
- Figura 22.** Secuencia Psammitas-Turbiditas (Arcosas) San Pedro (TJ-PTASP): a) Arroyo San Pedro, b) Arroyo Santa María y c) Arroyo San Lorenzo. Pág. 48
- Figura 23.** Estructuras primarias de la secuencia (TJ-PTASP) a) Secuencia sedimentaria rítmica, b) proceso de licuefacción y c) estructura tipo flasser que significa que se va adelgazando la secuencia. Pág. 49
- Figura 24.** Secuencia pelítica-siliciclástica (piroclástica) Tlalpujahuilla (J-PST): a) Camino a Santa María y b) Carretera Tlalpujahua-Tlalpujahuilla. Pág. 51

- Figura 25.** Secuencia Volcánico-andesítica El Carmen (JK-VAEC): a) Pág. 53
Andesitas (Arroyo San Pedro), b) Piroclastos (Arroyo San Pedro), c) Pillowlavas (Arroyo Santa María) y d) Metatobas (Arroyo San Lorenzo).
- Figura 26.** Secuencia Calcárea-Pelítica Dos Estrellas (K-CPDE): a) Pág. 56
Intercalación de lutitas, calizas y limolitas distribuida en el arroyo Dos Estrellas, b) Caliza oscura distribuida en el arroyo San Pedro y c) Lutitas distribuidas en el poblado de Santa María.
- Figura 27.** Secuencia Calizas masivas Remedios (K-CR) distribuida en el Pág. 57
arroyo San Pedro.
- Figura 28.** Fotomicrografías de la secuencia “TJ-PTASP”: a) Muestra de San Pág. 61
Pedro en el cual se presenta una textura submadura y b) Muestra de Coloradillas en el cual se presenta una textura inmadura.
- Figura 29.** Fotomicrografías de la secuencia TJ-PTASP: a) y b) se observa gran Pág. 62
abundancia de cuarzo y feldespato, c) y d), se observan fragmentos líticos metamórficos y fragmentos líticos graníticos, e) y f) se observan fragmentos líticos volcánicos.
- Figura 30.** Diagramas binarios para la Secuencia TJ-PTASP (cuadros y Pág. 64
círculos) y Areniscas Coloradillas (triángulos): a) Diagrama tamaño de grano (textura) vs. Cuarzo, b) Diagrama binario de tamaño de grano (textura) vs. Fragmentos rocosos totales, c) Diagrama binario de tamaño de grano (textura) vs. Fragmentos líticos volcánicos y d) Diagrama binario de tamaño de grano (textura) vs. Fragmentos líticos cristalinos (metamórficos-graníticos). Donde los números 1, 2, 3 y 4 representan los tipos de textura (ver cada tipo en la Tabla 1) y flecha indica hacia dónde crece el tamaño de grano.
- Figura 31.** Diagramas ternarios para la Secuencia TJ-PTASP (cuadros y Pág. 66
círculos) y Areniscas Coloradillas (triángulos) basados en Bathia, 1981: a) Q-F-L y b) Q-Lv-Lm+Lgr.
- Figura 32.** Diagrama ternario de clasificación de areniscas para la Secuencia TJ- Pág. 67
PTASP (cuadros y círculos) y Areniscas Coloradillas (triángulos) (modificado de Pettijohn *et al.*, 1987).
- Figura 33.** Diagramas de variación tipo Harker de los elementos mayores para Pág. 70
las muestras de areniscas de la Secuencia TJ-PTASP (cuadros y círculos) y Areniscas Coloradillas (triángulos): a) SiO₂ vs Al₂O₃, b) SiO₂ vs CaO, c) SiO₂ vs Fe₂O₃, d) SiO₂ vs MgO₂, e) SiO₂ vs Ti₂O, f) SiO₂ vs Na₂O y g) SiO₂ vs K₂O.
- Figura 34.** Diagramas binarios de las muestras de areniscas de la Secuencia TJ- Pág. 71
PTASP (cuadros y círculos) y Areniscas Coloradillas (triángulos): a) Frt vs SiO₂, b) Q vs SiO₂ y c) Textura vs SiO₂.

- Figura 35.** Diagrama ternario CaO-NaO-K₂O (Bathia, 1983) de las muestras de areniscas de la Secuencia TJ-PTASP (cuadros y círculos) y Areniscas Coloradillas (triángulos). Donde se encuentran los campos de andesita (A), dacita (D), granodiorita (Gr) y granito (G). Pág. 72
- Figura 36.** Diagrama binario Th-Zr (Bathia y Crook, 1986) de las muestras de areniscas de la Secuencia TJ-PTASP (cuadros y círculos) y Areniscas Coloradillas (triángulos). Pág. 73
- Figura 37.** Diagrama tipo *Spider* normalizado con manto primordial de las muestras de areniscas de la Secuencia TJ-PTASP (cuadros y círculos) y Areniscas Coloradillas (triángulos) (basado en Bathia y Crook, 1986; Mc Lennan y Taylor 1991). Pág. 74
- Figura 38.** Imágenes de catodoluminiscencia en donde se observa la morfología de los zircones analizados de las muestras OL6-SL y OL14-SP. Pág. 77
- Figura 39.** Clasificación tipológica de zircones de las muestras OL6-SL y OL14-SP (Pupin 1980). Pág. 78
- Figura 40.** Distribución de frecuencias (KDE) de edades obtenidas de las muestras OL6-SL Y OL14-SP. Pág. 84
- Figura 41.** Diagramas de concordia mostrando las edades U/Pb esencialmente concordantes de las muestras OL6-SL y OL14-SP con los pares isotópicos $x = {}^{207}\text{Pb}/{}^{235}\text{U}$; $y = {}^{206}\text{Pb}/{}^{238}\text{U}$ Pág. 85
- Figura 42.** Diagrama binario de la relación de Q-F vs FRt de la Secuencia TJ-PTASP (cuadros y círculos) y Areniscas Coloradillas (triángulos). Pág. 88
- Figura 43.** Diagrama ternario de discriminación de ambientes de procedencia de la Secuencia TJ-PTASP (cuadros y círculos) y Areniscas Coloradillas (triángulos) (Dickinson, 1985). Pág. 89
- Figura 44.** Diagrama de discriminación de ambientes tectónicos de las muestras de areniscas de la Secuencia TJ-PTASP (cuadros y círculos) y Areniscas Coloradillas (triángulos) propuesto por Bathia (1983). Donde AIO: Arcos de islas oceánicas, AIC: Arcos de islas continental, MCA: Margen continental activa y MCP: Margen continental pasiva. Pág. 91
- Figura 45.** Diagrama de discriminación de ambientes tectónicos de las muestras de areniscas de la Secuencia TJ-PTASP (cuadros y círculos) y Areniscas Coloradillas (triángulos) propuesto por Bathia (1983). Donde AIO: Arcos de islas oceánicas, AIC: Arcos de islas continental, MCA: Margen continental activa y MCP: Margen continental pasiva. Pág. 91

Figura 46. Diagrama de discriminación de ambientes tectónicos de las muestras de areniscas de la Secuencia TJ-PTASP (cuadros y círculos) y Areniscas Coloradillas (triángulos) propuesto por Bathia y Crook (1986). Donde AIO: Arcos de islas oceánicas, AIC: Arcos de islas continental, MCA: Margen continental activo y MCP: Margen continental pasivo. Pág. 92

Figura 47. Modelo tectónico de arco tipo insular de la Región de Tlalpujahua desarrollado durante el Jurásico superior-Cretácico temprano (modificado de Rivera-Ruiz, 2016). Pág. 98

Listado de Tablas

Tabla 1. Síntesis petrográfica de la Secuencia Psammitas-Turbiditas (Arcosas) “San Pedro” (JT-PTASP) y de las Areniscas Coloradillas. Donde las abreviaturas como Q-F: relación cuarzo-feldespato, Q: cuarzo, F: feldespatos, Plg: plagioclasas, FRt: Fragmentos de roca totales o líticos totales, Lv: líticos volcánicos, Lm: líticos metamórficos y Lgr: líticos graníticos. En la textura los números 1: grano fino a medio (0.06-0.4 mm), 2: grano medio a grueso (0.4 a 0.6 mm) y 3: grano fino a grueso (> 0.6 mm). Pág. 60

Tabla 2. Concentración de elementos mayores (wt%) de la Secuencia TJ-PTASP y Areniscas Coloradillas, de un dique y una pillow lava. Pág. 68

Tabla 3. Concentración de elementos traza de la Secuencia TJ-PTASP y Areniscas Coloradillas, de un dique RCT12) y una pillow lava (OL20). Pág. 68

Tabla 4. Resultados de los 116 zircones analizados de la muestra OL6-SL. Pág. 79

Tabla 5. Resultados de los 90 zircones analizados de la muestra OL14-SP. Pág. 82

Resumen

La Región de Tlalpujahua (RT) se localiza al NE del estado Michoacán y al NW del estado de México. En la RT aflora el subterreno Zihuatanejo que es parte del Terreno Guerrero, el cual representa uno de los terrenos tectonoestratigráficos más grandes de México. Dentro de las sucesiones estratigráficas de la RT se han reportado diferentes secuencias de areniscas que representan una oportunidad para determinar las relaciones de procedencia y correlación tectónica de la RT.

Se realizó un estudio de procedencia sedimentaria de la Secuencia Psammitas-Turbiditas (Arcosas) San Pedro (TJ-PTASP), donde esta unidad representaría a la secuencia sedimentaria más antigua y por lo tanto representa al basamento relativo de la secuencia volcánica-sedimentaria Cretácica de la RT. Para este estudio se realizaron secciones geológicas a detalle de las localidades reportadas para la Secuencia Psammitas-Turbiditas (Arcosas) San Pedro (TJ-PTASP), así como dos localidades más en el Arroyo San Lorenzo y Santa María. La secuencia TJ-PTASP está constituida por una serie de intercalaciones de areniscas siliciclásticas de grano fino a medio, presentando variaciones en sus estructuras primarias, como turbididez, de carga, que nos revelan un ambiente de depósito de cuenca profunda.

Con base en los análisis petrográficos se observa una predominante abundancia de cuarzo-feldespato y la presencia importante de fragmentos líticos de tipo metamórfico y granítico. En conjunto con los análisis geoquímicos, se han clasificado como arcosas y litoarenitas cuarzosas. También, que la secuencia TJ-PTASP proviene de un margen continental pasivo y su composición es contrastante con las areniscas Coloradillas, las cuales son grauvacas y litarenitas con influencia volcánica.

Con base en análisis de U-Pb en concentrados de zircones, se obtuvo que las edades de estos minerales detríticos corresponden al Precámbrico, Paleozoico y Triásico, siendo estas últimas las edades máximas de sedimentación. Se interpreta que la secuencia TJ-PTASP se depositó en un ambiente marino profundo de tipo de abanicos submarinos desarrollados en el Triásico inferior, el cual recibió aportes de un basamento continental erosionado. Con la integración de todos los resultados obtenidos se propuso un modelo tectónico de tipo arco insular, indicando que esta Secuencia Psammitas-Turbiditas (Arcosas) “San Pedro” (TJ-PTASP) es

correlacionable con otras secuencias siliciclásticas de Tzitzio y Complejo Arteaga del Terreno Guerrero.

Palabras clave: Región de Tlalpujahuá, Secuencia Psammitas-Turbiditas (Arcosas) “San Pedro” (TJ-PTASP), Terreno Guerrero, procedencia sedimentaria, estructuras de turbidez.

Abstract

The Tlalpujahua Region (TR) is located NE of Michoacan state and NW of Mexico state. In the TR outcrops the Zihuatanejo subterrane that is part of the Guerrero Terrane, which represents one of the largest tectonostratigraphic terrane of Mexico. Within the stratigraphic successions of the TR have been reported different sandstone sequences that represent an opportunity to determine the relationships of provenance and tectonic correlation of the TR. A sedimentary provenance study of the Psammites-Turbidites (Arkoses) San Pedro Sequence (TJ-PTASP) was performed, where this unit would represent the oldest sedimentary sequence and therefore represents the relative basement of the Cretaceous volcanic sedimentary sequence of the TR. For this study detailed geological sections of the locations reported for the Psammites-Turbidites (Arkoses) San Pedro Sequence (TJ-PTASP) were performed, as well as two more locations in San Lorenzo and Santa María Stream. The TJ-PTASP sequence is made up of a series of intercalations of fine to medium-grained siliciclastic sandstones, presenting variations in their primary structures, such as turbidity, of load, which reveal a deep basin deposit environment.

Based on the petrographic analysis is observed a predominant abundance of quartz-feldspar and the important presence of metamorphic and granitic type lithic fragments. In conjunction with geochemical analysis, they have been classified as arkoses and quartz litharenites. Also, that the TJ-PTASP sequence comes from a passive continental margin and its composition is in contrast with the Coloradillas sandstones, which are greywackes and litharenites with volcanic influence.

Based on the analysis of U-Pb in zircon concentrates, it was obtained that the ages of these detrital minerals correspond to the Precambrian, Paleozoic and Triassic, the last being the maximum sedimentation ages. It is interpreted that the TJ-PTASP sequence was deposited in a deep marine environment of the submarine fan type developed in the Lower Triassic, which received contributions from an eroded continental basement. With the integration of all the results obtained, an insular arc-type tectonic model was proposed, indicating that this Psammites-Turbidites (Arkoses) San Pedro Sequence (TJ-PTASP) is correlatable with other siliciclastic sequences of Tzitzio and Arteaga Complex of Guerrero Terrane.

Keywords: Tlalpujahuá Region, Psammites-Turbidites (Arkoses) San Pedro Sequence (TJ-PTASP), Guerrero Terrane, sedimentary provenance, turbidity structures.

Capítulo 1

Introducción

Las rocas sedimentarias terrígenas, o rocas clásticas, están formadas por fragmentos líticos preexistentes de origen diverso, así como por minerales como el cuarzo, feldespatos (potásicos y plagioclasas), micas, arcillas y minerales pesados como apatito, rutilo, turmalina, zircón. Este de gran utilidad para el desarrollo de estudios de procedencia sedimentaria (Pothero y Schwab, 2004; Arribas-Mocoroa, 2010).

Dentro del grupo de las rocas terrígenas, las areniscas son rocas sedimentarias que aportan datos útiles para los estudios de procedencia sedimentaria, además, son rocas con cierto valor económico, como reservorio de agua subterránea y petróleo, material de construcción, etc., (Pothero y Schwab, 2004).

La descripción de la textura de las areniscas incluye el tamaño de grano, variación de tamaño, redondez, forma, características de superficie y fábrica en general (arreglo de los clastos en espacio). Además, para el análisis de la madurez textural se utilizan tres criterios: proporción de arcilla, clasificación o selección de los granos y redondez de los granos de arena (Pothero y Schwab, 2004). Por su parte, los estudios de procedencia de sedimentos se refieren a determinar la fuente de origen de los sedimentos, la reconstrucción de ambientes paleogeográficos, origen de los terrenos tectonoestratigráficos, ambientes tectónicos, evolución de la corteza, reciclamiento de granos y análisis de sistemas de depósito, teniendo aplicaciones en geología regional (Hautton *et al.*, 1991; Sánchez Zavala y Centeno García, 2005).

En México se han llevado a cabo importantes trabajos en el Terreno Guerrero (TG; Centeno-García *et al.*, 2011). El TG está compuesto por una secuencia volcánica-sedimentaria del Jurásico-Cretácico. Es dividido en los subterrenos Arcelia, Guanajuato, Teloloapan, Tahue y Zihuatanejo (Centeno-García *et al.*, 2008), y hasta la fecha solo se reconoce un basamento relativo constituido por una secuencia de areniscas siliciclásticas conocido como el complejo Arteaga, relacionado con un proceso de acreción al paleocontinente mexicano durante el Jurásico medio.

En la Región de Tlaxpukahua (RT) afloran porciones del basamento que ha sido considerado como parte del TG y también se encuentran zonas expuestas del sub-terreno Zihuatanejo (De la Teja *et al.*, 2000; Rivera-Ruiz, 2016; Corona-Chávez *et al.*, 2017). Aunque la secuencia de rocas más abundantes se refiere a la secuencia volcánica-sedimentaria del Jurásico-Cretácico (De la Teja *et al.*, 2000), recientemente se ha reportado una sucesión de areniscas siliciclásticas, conocidas como Secuencia Psammitas-Turbiditas (Arcosas) San Pedro, que podrían reflejar el basamento relativo de la RT (Rivera-Ruiz, 2016), por lo que resulta relevante realizar un estudio en las rocas sedimentarias psammíticas de la región. El presente trabajo de investigación se basa y parte principalmente con base a este antecedente geológico, ya que este autor fue el primero en reportarla y describirla, el cual la hace una secuencia distinta al resto de las demás, siendo además el principal objetivo de estudio para este trabajo, cuyos objetivos se basan en las siguientes preguntas: ¿Cuál es su tipo de procedencia?, ¿Edad? y ¿Es correlacionable con otras secuencias siliciclásticas pertenecientes al Terreno Guerrero?

En este trabajo se propone realizar una investigación de cartografía, petrografía, geoquímica y procedencia de sedimentos para la Secuencia Psammitas-Turbiditas (Arcosas) San Pedro, con la finalidad de determinar su temporalidad y correlación con las areniscas de la RT y del TG.

Capítulo 2

Área de estudio

2.1 Localización, vías de comunicación y de acceso

La región de Tlalpujahua (RT) se localiza en la parte centro-occidente de México y se encuentra en el noreste del estado Michoacán y al noroeste del estado de México (Figura 1). Esta región se encuentra localizada entre las coordenadas geográficas 19°53'12.34, 100°21' (NO), 19°43'57.6, 100°21' (SO), 19°53'12.34, 100°05'32'' (NE) y 19°43'57.6, 100°05'32'' (SE) a una altitud aproximada de 2,600 metros sobre el nivel del mar.

Para poder llegar al área de estudio se tienen las siguientes rutas: la primera es la principal vía de comunicación que es la autopista México-Morelia-Guadalajara con un recorrido de 2 horas y media aproximadamente desde la ciudad de Morelia (Fig. 1). La segunda es la carretera federal No. 126 o la antigua carretera que comunica a Morelia-Maravatío-El Oro-Atzacomulco. Cuenta además con las carreteras estatales que comunican la cabecera municipal al norte con Venta de Bravo, y al suroeste con Santa María de los Ángeles y Angangueo.

En la región de Tlalpujahua existen diversos caminos pavimentados y brechas que comunican la cabecera municipal con distintos poblados, siendo transitables la mayoría de estos caminos en todas las épocas del año, como por ejemplo los que conducen a Tlacotepec, a Tlalpujahuilla, la presa Brockman y San Juan de Dios, y la que va de Cuatro Pilares a San Pedro Tarímbaro (Bustamante-García, 2007).

En la figura 1 se observa un mapa del área de estudio mostrando las vías de comunicación y acceso, con algunos poblados que se encuentran alrededor del municipio de Tlalpujahua, tales como: San Pedro Tarímbaro, Remedios, Coloradillas, Santa María, Zapateros, San Lorenzo, Dos Estrellas, Trigueros, Campo de Gallo y Tlalcoatepec.

2.2 Fisiografía y clima

La región de Tlalpujahua se encuentra en la provincia del Cinturón Volcánico Mexicano (CVM) (Figura 2) y en la subprovincia de Mil Cumbres (Bustamante-García, 2007). El CVM abarca la mayor parte del estado de Michoacán y se extiende regionalmente desde Veracruz hasta Nayarit. Esta provincia geológica es una de las más jóvenes de México, teniendo una actividad volcánica del Mioceno hasta el Reciente, conformada por estructuras de fosas y pilares, como las del Valle de México, el Lago de Chapala (Jalisco) y la Laguna de Cuitzeo (Michoacán). La subprovincia de Mil Cumbres abarca los municipios de Angangueo, Ocampo, Aporo, Tlalpujahua (área de estudio) y Epitacio Huerta (Bustamante-García, 2007).

La región de Tlalpujahua está compuesta por dos regiones morfológicas: una región volcánica que constituye la sierra y otra de lomeríos y lagos hacia el este. En la primera se presentan elevaciones volcánicas, con alturas de 2800 a 3200 m s.n.m., como los cerros Santiago, El Manzano y Colorado (Fig.1) conformando un alto estructural con una orientación E-W en la región sur, norte y occidental. La segunda está constituida por lomeríos y mesetas con orientación E-O, con alturas de 2500 a 2700 m s. n. m conformando un bajo estructural que abarca principalmente la región oriental (Bustamante-García, 2007).

De acuerdo con el Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos (INEGI) (2009; <https://es.weatherspark.com/>), el clima que presenta la región de Tlalpujahua es templado subhúmedo con lluvias en verano, de mayor humedad con un porcentaje de 94.82 % y humedad media con un porcentaje de 3.26 % y semifrío subhúmedo con lluvias en verano, de mayor humedad con porcentaje de 1.92 %, con un rango de precipitación promedio de 800-1100 mm. El rango de temperatura total es entre los 10 y 18 ° C. La temperatura máxima promedio es mayor a 22°C en los meses templados, en el mes caluroso cuenta con una temperatura máxima y mínima promedio de 23 °C y 8° C, en los meses frescos cuenta con una temperatura máxima promedio que es menor a 19° C. La temperatura mínima y máxima del mes frío oscila entre 1°C y 18° C.



Figura 2. Provincias Fisiográficas de México en la cual se observa que la Región de Tlalpujahua (RT) pertenece a la provincia del Eje Volcánico o Cinturón Volcánico Mexicano (modificado de Bustamante-García, 2007).

2.3 Hidrografía

Las tres regiones hidrológicas principales en las que se encuentra el estado de Michoacán son: la RH17, que es la del sur o costa de Michoacán, abarcando los ríos Coahuayana, Ostula y Chuta; RH18 que es la del centro o Balsas, abarcando los ríos Tepalcatepec y el Balsas y la RH12 que es la región norte o Lerma-Santiago, abarcando el río principal que es el Lerma comprendiendo los lagos de Cuitzeo y Tepuxtepec.

La región de Tlalpujahua se encuentra localizada en la región hidrológica RH12 (perteneciente a la cuenca Lerma-Santiago) al noreste del estado de Michoacán (Figura 3). Cuenta con corrientes y cuerpos de agua continuas e intermitentes conformadas por arroyos, como por ejemplos, el arroyo San José, Puerto Santa Marta, San Pedro y El Carmen, entre otros, alimentando los arroyos La Venta y Las Minas hacia el norte y hacia el oeste desembocan en el río Lerma. La descarga de los acuíferos se efectúa por medio de los ríos y arroyos de la región de Tlalpujahua (Bustamante-García, 2007). Los arroyos principales de la región de Tlalpujahua son Santa María, San Lorenzo, Dos Estrellas y América.

El mapa de drenaje realizado por Corona-Chávez y Uribe- Salas, (2009) (Figura 4) muestran los drenajes de primer al sexto orden, siendo los más marcados o abundantes los de tercer, cuarto y quinto orden, ya que el resto están menos marcados o son menos densos.

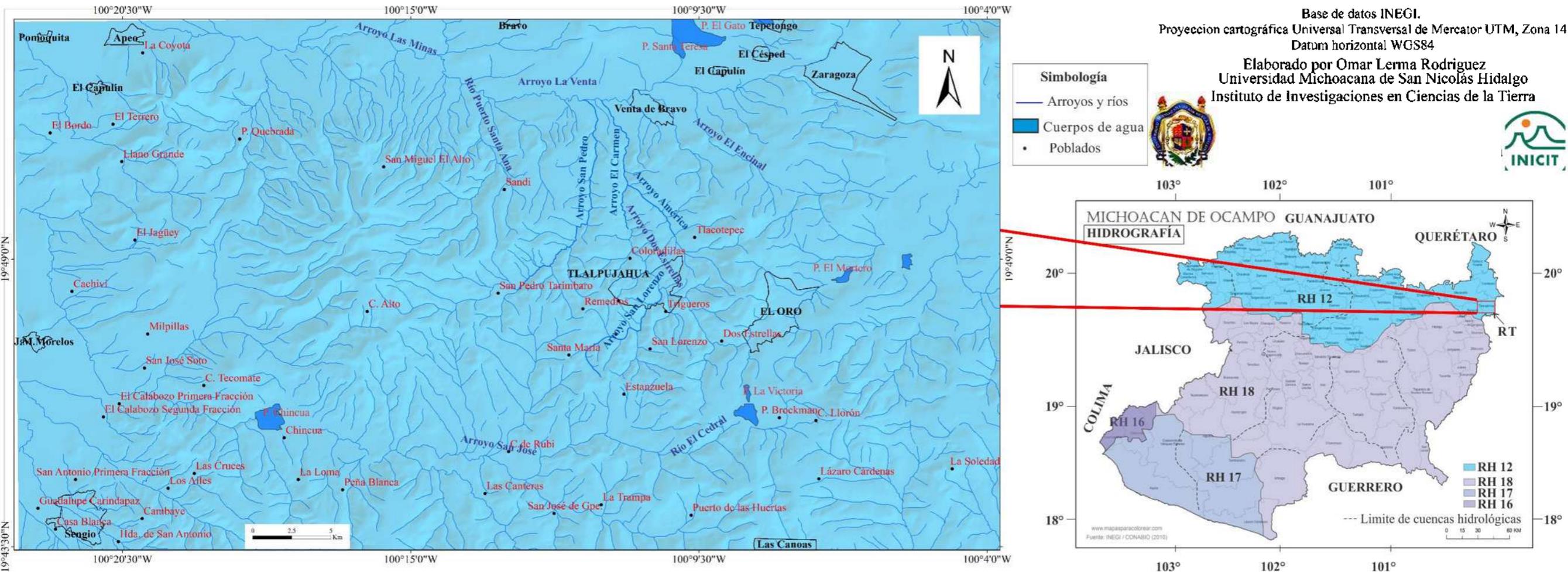


Figura 3. a) Mapa hidrográfico del área de estudio con los principales ríos y arroyos, b) Mapa de las regiones hidrológicas del Estado de Michoacán donde RH 12: Lerma-Santiago (ubicación del área de estudio), RH 18: Centro o del Balsas, RH 17: Costa de Michoacán y RH 16: Armeria-Coahuayana (modificado de Bustamante-García, 2007).

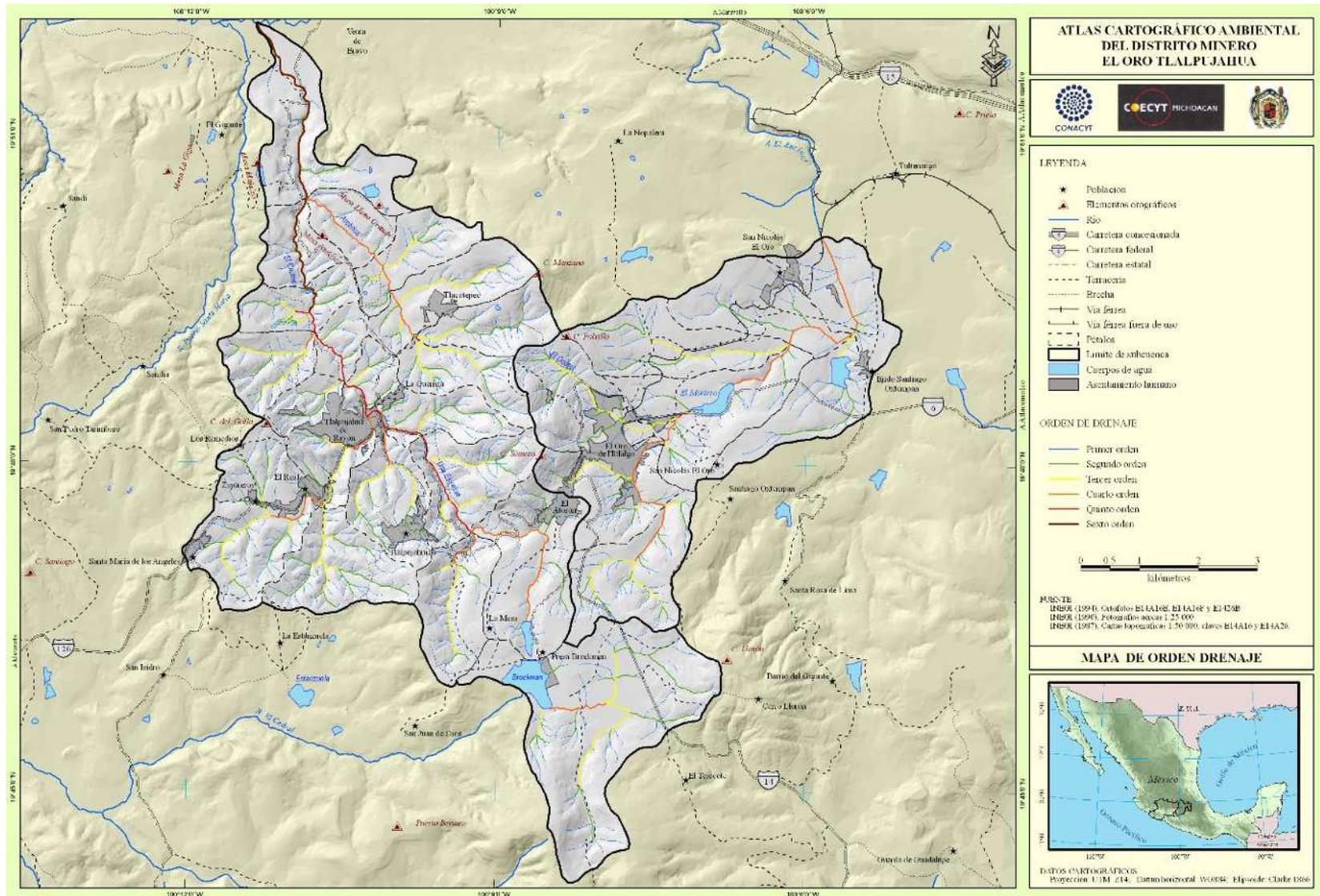


Figura 4. Mapa de orden de drenaje (Corona-Chávez y Uribe-Salas, 2009).

Capítulo 3

Antecedentes

3.1. Marco tectónico (Terreno Guerrero)

El Terreno Guerrero (TG), también llamado el Terreno Náhuatl (Sedlock *et al.*, 1993), es uno de los terrenos tectonoestratigráficos más grandes y jóvenes de la República Mexicana, constituyendo la tercera parte del territorio mexicano (Centeno-García *et al.*, 2008), que cubre prácticamente todo el occidente y suroccidente de México (Campa y Coney, 1983; *En*: Mendoza y Suástegui, 2000). El TG está compuesto por una secuencia volcánica sedimentaria con una edad del Jurásico-Cretácico medio-tardío y hasta la fecha solo se reconoce un basamento relativo constituido por una secuencia siliciclástica acrecionada al paleo-continente mexicano durante el Jurásico medio (Centeno-García *et al.*, 2008).

El Terreno Guerrero fue propuesto principalmente por Campa y Coney (1983) y ha tenido algunos cambios de nomenclatura y concepción en sus subdivisiones. Por ejemplo, 10 años después fue dividido por Sedlock *et al.*, (1993) en los terrenos Tahue, Náhuatl y Tepehuano (Centeno-García *et al.*, 2008). Por su parte, Keppie (2004) lo considera como el Terreno Guerrero Compuesto, al cual divide en cuatro sub-terrenos: Zihuatanejo, Las Ollas, Arcelia y Teloloapan. Centeno-García *et al.*, (2008) también lo consideran como el Terreno Guerrero Compuesto, pero a diferencia de Keppie (2004) lo dividen en cinco sub-terrenos: Arcelia, Guanajuato, Teloloapan, Tahue y Zihuatanejo, (en este último aflora la región de Tlalpujahua).

La figura 5 es un mapa modificado con base en Centeno-García *et al.*, (2008) e indica dónde se localiza el área de estudio (Región de Tlalpujahua) y hace una breve descripción de los sub-terrenos que podrían tener correlación con las secuencias que afloran en la Región de Tlalpujahua.



Figura 5. Mapa de los terrenos tectonoestratigráficos de México donde se indica el área de estudio (RT: Región de Tlaxcala) (modificado de Centeno-García *et al.*, 2008)

3.1.1 Sub-terreno Zihuatanejo

El sub-terreno Zihuatanejo, uno de los sub-terrenos más grandes del Terreno Guerrero (Campa y Coney, 1983) o Terreno Guerrero Compuesto (Centeno-García *et al.*, 2008) se distribuye a lo largo de la costa de Michoacán hasta Colima (Campa y Coney, 1983). Consiste en una sucesión de más de 2000 m de secuencias de arcos volcánicos (Campa y Ramírez, 1979; *En*: Mendoza y Suástegui, 2000). Su basamento relativo se compone principalmente de turbiditas ricas en cuarzo (areniscas y lutitas) con edades del Triásico-Jurásico, tectónicamente imbricadas (Centeno-García *et al.*, 1993) e intercaladas con pillow lavas, gabros bandeados, pedernales y calizas (Centeno-García *et al.*, 2008). Estas rocas han recibido los nombres de Complejo Arteaga, Formación Zacatecas y Complejo Las Ollas en diferentes afloramientos (Centeno-García *et al.*, 2008). Estas rocas suelen tener deformaciones como estratos severamente plegados y estructuras altamente cizalladas. El

tipo de metamorfismo que las afecta varía de facies de esquistos verdes y en algunas zonas de alto grado a anfibolitas o incluso podría no presentar un metamorfismo evidente (Centeno-García *et al.*, 2003). La litología del Complejo Arteaga ha sido interpretada como un complejo de acreción, el cual se encuentra relacionado a la subducción del Triásico superior - Jurásico inferior (Centeno-García *et al.*, 2008).

Existen rocas del Jurásico medio a Jurásico superior pertenecientes a un arco volcánico que se encuentran dispersas a lo largo de la costa del Pacífico, las cuales están compuestas por lavas riolíticas y rocas volcanoclásticas y granitoides que fueron emplazadas en el complejo de acreción (Bissig *et al.*, 2003; Centeno-García *et al.*, 2003; *En:* Centeno-García *et al.*, 2008). Estas rocas a su vez fueron deformadas y exhumadas previo al depósito de estratos que sobreyacen al arco volcánico del Jurásico-Cretácico (Centeno-García *et al.*, 2003; *En:* Centeno-García *et al.*, 2008).

Las secuencias del arco volcánico que sobreyacen en forma discordante al Complejo Arteaga tienen una edad de Barremiano - Cenomaniano e incluye rocas andesíticas, basálticas y algunas riolíticas, además de volcanoclásticas intercaladas con calizas, evaporitas y algunos lechos rojos (Grajales y López, 1984 *En:* Centeno-García *et al.*, 2008). Estas rocas fueron deformadas antes de la intrusión de grandes intrusivos graníticos del Cretácico tardío al Paleógeno (Schaaf *et al.*, 2000; *En:* Centeno-García *et al.*, 2008).

3.1.2 Subterreno Arcelia

El sub-terreno Arcelia está compuesto principalmente de pillow lavas basálticas y cuerpos ultramáficos, lutitas negras, chert y turbiditas volcánicas; todas estas rocas se encuentran intensamente deformadas y parcialmente metamorfizadas (Ramírez- Espinosa *et al.*, 1991; Talavera-Mendoza *et al.*, 1995; *En:* Centeno-García *et al.*, 2008). Este subterreno cual forma parte de un cinturón con una tendencia N-S de 15 km de ancho y 250 km de largo aflorando al oeste del sub-terreno Teloloapan y a su vez se encuentra cabalgando hacia el este a una secuencia de aproximadamente 200 m de espesor de unidades volcánicas que incluyen pillow lavas, brechas pillow y hialoclastitas que son intrusionadas por numerosos diques doleríticos (Talavera-Mendoza *et al.*, 2007).

Representa un arco insular primitivo del Cretácico temprano asociado con un magmatismo menos evolucionado de una cuenca de post-arco que ha sido interpretada como la Cuenca Arperos (Talavera-Mendoza *et al.*, 1995; Mendoza y Suástegui, 2000; *En: Centeno-García et al.*, 2008). Este sub-terreno carece aparentemente de un basamento antiguo (Talavera-Mendoza *et al.*, 1995; Mendoza y Suástegui, 2000; *En: Centeno-García et al.*, 2008).

3.1.3 Subterreno Teloloapan

El sub-terreno Teloloapan se encuentra dividido por la región oriental y occidental. La región oriental consiste en depósitos volcánicos y sedimentarios marinos-someros y la región occidental consiste en depósitos volcánicos y sedimentarios profundos (Centeno-García *et al.*, 2008), ambas secuencias muestran asociaciones estratigráficas marinas, estas se encuentran asociadas con rocas volcánicas como de basaltos a andesitas y con escasa presencia de dacitas y riolitas, (Talavera- Mendoza *et al.*, 1995; *En: Centeno-García et al.*, 2008). El subterreno Teloloapan muestra un complejo sistema de fallas de cabalgaduras, las cuales tienen una dirección al este. Sus rocas pertenecientes al Cretácico están severamente deformadas y metamorfozadas en facies de esquistos verdes de bajo grado (Centeno-García *et al.*, 2008). Su basamento es desconocido (Centeno-García *et al.*, 2008), aunque las rocas metamórficas que se encuentran expuestas cerca de la frontera noroccidental de este sub-terreno con el sub-terreno Arcelia se han interpretado como su posible basamento (Elías-Herrera y Sánchez-Zavala, 1990; Sánchez-Zavala, 1993; *En: Centeno-García et al.*, 2008); sin embargo, las edades y origen de las rocas en esta área son desconocidas (Centeno-García *et al.*, 2008).

En relación con la interpretación tectónica del TG han existido muchas preguntas o sobre todo mucha controversia; sin embargo, se han propuesto varios modelos tectónicos. Algunos autores han sugerido que es un arco oceánico acrecionado a México durante el Cretácico tardío a través de una zona de subducción en dirección oeste, el cual cerró una cuenca oceánica (Lapierre *et al.*, 1992; Tardy *et al.*, 1994; Dickinson y Lawton, 2001, etc.; *En: Centeno García et., al 2008*). Otros autores sugieren que representa uno o más sistemas complejos de arcos que se desarrollaron cerca del continente (Campa y Ramírez, 1979;

Ramírez-Espinosa *et al.*, 1991; Mendoza y Suastegui, 2000; Centeno García *et al.*, 2003; Centeno-García, 2005; *En*: Centeno García *et al.*, 2008). Sin embargo, Centeno García *et al.*, (2008) sugieren una evolución más compleja que implica una serie de acreciones al continente por procesos de rifting y colisión, describiendo e interpretando seis etapas con base en diversos estudios estratigráficos, geoquímicos, geocronológicos y tectónicos.

3.2 Marco geológico de la Región de Tlalpujahua (RT)

Los antecedentes de estudios geológicos de la Región de Tlalpujahua (RT) se refieren a su historia minera. A continuación, se muestran algunos trabajos realizados en la región de Tlalpujahua.

Flores (1920), en su trabajo "*Estudio geológico minero de El Oro-Tlalpujahua*", reporta rocas sedimentarias (pizarras arcillosas, margas, calizas, areniscas, conglomerado rojo y depósitos recientes), considerando a las pizarras arcillosas como las rocas sedimentarias más antiguas y parte del basamento con una edad Cretácica, así como rocas ígneas (andesitas, riolitas y basaltos) con edades del Terciario (formadas entre el Mioceno y Plioceno). Menciona que las rocas ígneas fueron emplazadas con las pizarras arcillosas en las cuales ambas sufren un metamorfismo. Además, también hace un estudio de vetas y fallas con edades "recientes" que estarían dislocando a las unidades aflorantes. Estas fallas afectan a casi todas las unidades descritas a excepción de los basaltos. A través de datos estructurales y las unidades hace una interpretación o historia geológica del área.

Fries y colaboradores en 1965 (1977) en su trabajo "*Mezcla de vidrios en los derrames cineríticos Las Américas de la Región de El Oro-Tlalpujahua, estados de México y Michoacán, parte centro-meridional de México*" presentan un trabajo donde el principal objetivo ha sido el estudio de los depósitos piroclásticos o ignimbritas de la Formación Las Américas, explicando sus características, dónde afloran y de qué se compone cada uno. Sugieren que las ignimbritas se formaron por 4 derrames distintos.

Silva y Salgado en 1988 en su trabajo de tesis "*Estudio estratigráfico-estructural en la región de Tlalpujahua-El Oro, Edos. de Michoacán y México*" realizan un trabajo cartográfico de las unidades metamórficas, rocas sedimentarias, rocas volcánicas e intrusivas,

depósitos lacustres y una ignimbrita. Documentan sus antecedentes, y realizan una interpretación estratigráfica de las unidades geológicas aflorantes en el área de estudio, las cuales pertenecen al Mesozoico (Jurásico superior-Cretácico inferior), Terciario (Eoceno-Plioceno) y Cuaternario (Pleistoceno-Holoceno). Además, a través de secciones geológicas y un análisis microestructural, determinan cuatro fases de deformación: dos fases compresivas con direcciones NW-SE y NE-SW conformadas por fallas inversas y pliegues, así como dos sistemas de tipo distensivos con fallas normales con direcciones NO-SE y E-O.

Pantoja (1994) en su trabajo *"Formación Las Américas, Tlalpujahuá, Michoacán, México- Una reinterpretación de los datos petrográficos, petroquímicos, tectónicos y de los mecanismos de erupción"*, menciona a diversos autores que han realizado estudios sobre la Formación Las Américas. Con base en estudios tectónicos, petrográficos y químicos hace una reinterpretación con los resultados obtenidos en su trabajo comparándola con los autores citados en su trabajo.

El mapa de la figura 6 representa la geología regional tomada del informe *Carta geológico-minera El Oro de Hidalgo E14-A16 escala 1: 50 000 estados de Guerrero México y Michoacán* elaborado por De la Teja-Segura *et al.*, (2000) en el cual explican a gran detalle las unidades geológicas y las formaciones desde las rocas más antiguas hasta las más jóvenes pertenecientes al Terreno Guerrero (Formación Villa de Ayala, Formación Acapetlahuaya, Formación Amatepec, Metadiorita el Cuervo, Formación Balsas y Pórfido Sienítico) y al Cinturón Volcánico Mexicano (Andesitas Anganguero, Andesitas, Riolita Caldérica, Depósitos Lacustres, Formación Las Américas, Riolitas post-caldéricas, Andesitas, Tobas andesíticas, Basaltos, Pumicitas, Depósitos lacustres y recientes). En dicho mapa se describe su composición mineralógica macroscópica y microscópica, respectivamente, dónde afloran, hasta dónde se extienden y mencionan algunas correlaciones. En el apartado de geología estructural, interpretan por medio de un modelo de elevación digital, dos bloques: bloque norte (pequeños curvilineamientos y fallas con dirección E-W y N-S) y bloque sur (fallas y fracturas con orientaciones NW-SE, NE-SW, N-S y E-W y pequeños curvilineamientos que probablemente se relacionan a estructuras volcánicas); en la descripción de estructuras:

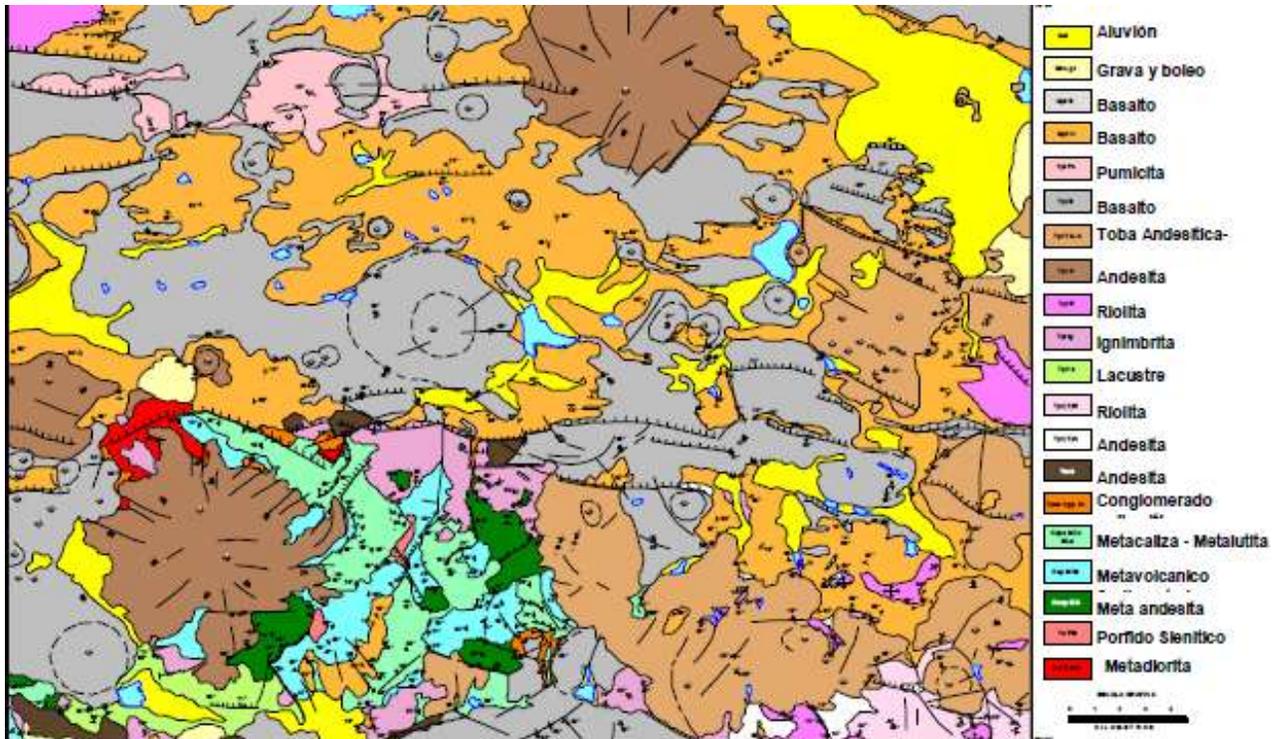


Figura 6. Mapa geológico regional tomado del informe *Carta geológico-minera El Oro de Hidalgo E14-A16 escala 1: 50 000 estados de Guerrero México y Michoacán.*

deformación dúctil (se manifiesta en la porción sur donde afloran las rocas volcanosedimentarias muy deformadas correspondientes al subterreno Teloloapan, en el cual existen dos fases: esquistosidad de plano axial y de crenulación) y frágil (se manifiesta en la porción norte del área y se caracteriza por un sistema de fallas y fracturas con dirección Este-Oeste y Norte-Sur afectando a las rocas volcánicas, sedimentarias y pliocuaternarias también, sobresaliendo: la fosa tectónica de Acambay (Falla de Acambay y Falla Venta de Bravo) y Falla El Calvario). Respecto a la geoquímica solo reportan algunas unidades fechadas por el método K-Ar, entre ellas, la Andesita Angangueo (Mioceno medio) y la Formación Las Américas (Plioceno). Por último, mencionan los yacimientos minerales estudiados de los Distritos Mineros Tlalpujahuá y El Oro, zona mineralizada (Cerro Santiago) y de 3 áreas mineralizadas (Pomoca, Estanzuela y Tapaxco).

Bustamante-García (2007) en su trabajo *“Inventario Físico de los recursos minerales del municipio Tlalpujahuá, estado de Michoacán”* compiló toda la información geológica existente, con la finalidad de sintetizar los recursos minerales y pétreos con que cuenta la RT.

Presenta tablas y mapas con la localización georreferenciada de cada yacimiento mineral, metálico y no-metálico, así como una breve descripción económica.

Corona-Chávez y Uribe-Salas (2009) elaboraron un mapa geológico de la región de Tlalpujahua (Figura 7) para su trabajo de “*Atlas Cartográfico del Distrito Minero de El Oro-Tlalpujahua*” basándose en fuentes como el trabajo de Flores (1920), INEGI (1987, 1990 y 1994) y de las cartas geológicas El Oro E14A16 y Angangueo E14A26 (2000).

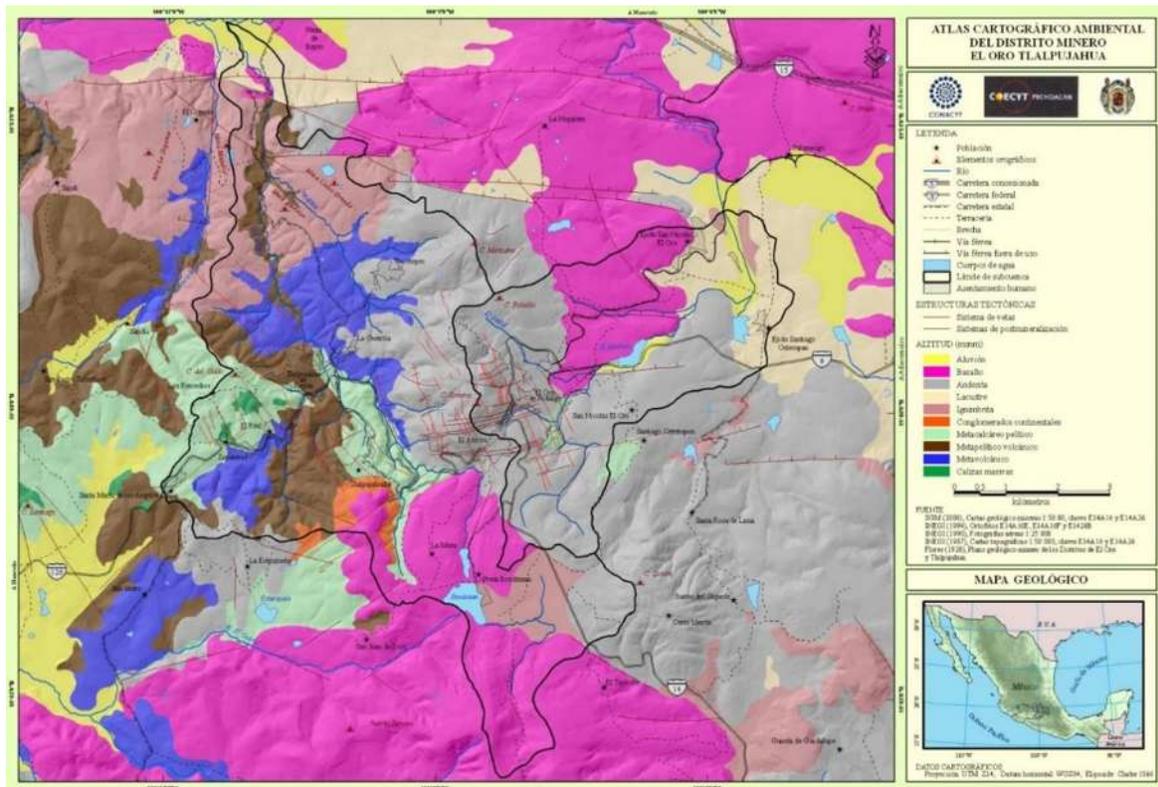


Figura 7. Mapa Geológico de la Región de Tlalpujahua tomado del Atlas Cartográfico del Distrito Minero de El Oro-Tlalpujahua (Corona-Chávez y Uribe-Salas, 2009).

Rivera-Ruiz (2016) en su trabajo de tesis "*Estudio Petrográfico de la Secuencia Volcánico-Sedimentaria Mesozoica de la Región de Tlalpujahua, Michoacán*", reconoce ocho dominios morfoestructurales: Lomerios Arroyos El Carmen, Colinas Sandia, Semi-escudo San Miguel, Laderas Pomoca, Mesas Ignimbritas América, Domas Tapaxco, Lenticular El Oro, Conos Tecomate. De estos dominios dos son interpretados como una parte del basamento, estos son: El Carmen, constituido por un conjunto de lomeríos, Sandia, constituido por

colinas, mientras que los demás dominios, son asociados a una renovación de la morfología del relieve, es decir, relacionados a eventos tectónicos posteriores.

Describe la secuencia volcano-sedimentaria de la base a la cima en la región de Tlalpujahua, dividiéndola en cinco unidades (Figura 8): dos calcáreas (calcárea-pelítica), una terrígena siliciclástica-pelítica, una volcánica con derrames (pillow) y piroclástica y una terrígena psammítica siliciclástica. Además del análisis petrográfico de estas unidades le aporta información para definir con mayor precisión características y diferencias de cada una de las unidades.

Construye cuatro secciones geológicas (El Carmen, Tlalpujahua-Tlalpujahuilla, Arroyo San Pedro y Santa María) con el fin de representar las estructuras mayores que afectan a las unidades geológicas y reporta cinco fases de deformación: dos que pertenecen al sistema dúctil-frágil y tres al sistema frágil, donde se reconocen planos de crenulación (S_2), planos de cizalla (S_3) y un sistema de pliegues y cabalgaduras asociados a los eventos de acreción del arco hacia el continente. La vergencia general del sistema de pliegues y cabalgaduras de la RT tiende hacia el NE.

Con la integración de los resultados obtenidos en la descripción de las unidades geológicas, petrografía y estructural, propuso un modelo tectónico de un arco de tipo insular para la RT, el cual se desarrolló del Títoniano al Aptiano, y posteriormente, fue acrecionado al paleocontinente del sur de México, probablemente durante el Cretácico tardío-Paleoceno. El modelo tectónico se dividió en seis etapas y sugirió que, con la finalidad de describir mejor las características estructurales, petrológicas y tectónicas, es necesario la obtención de análisis geoquímicos, así como el fechamiento de zircones en las arcosas San Pedro.

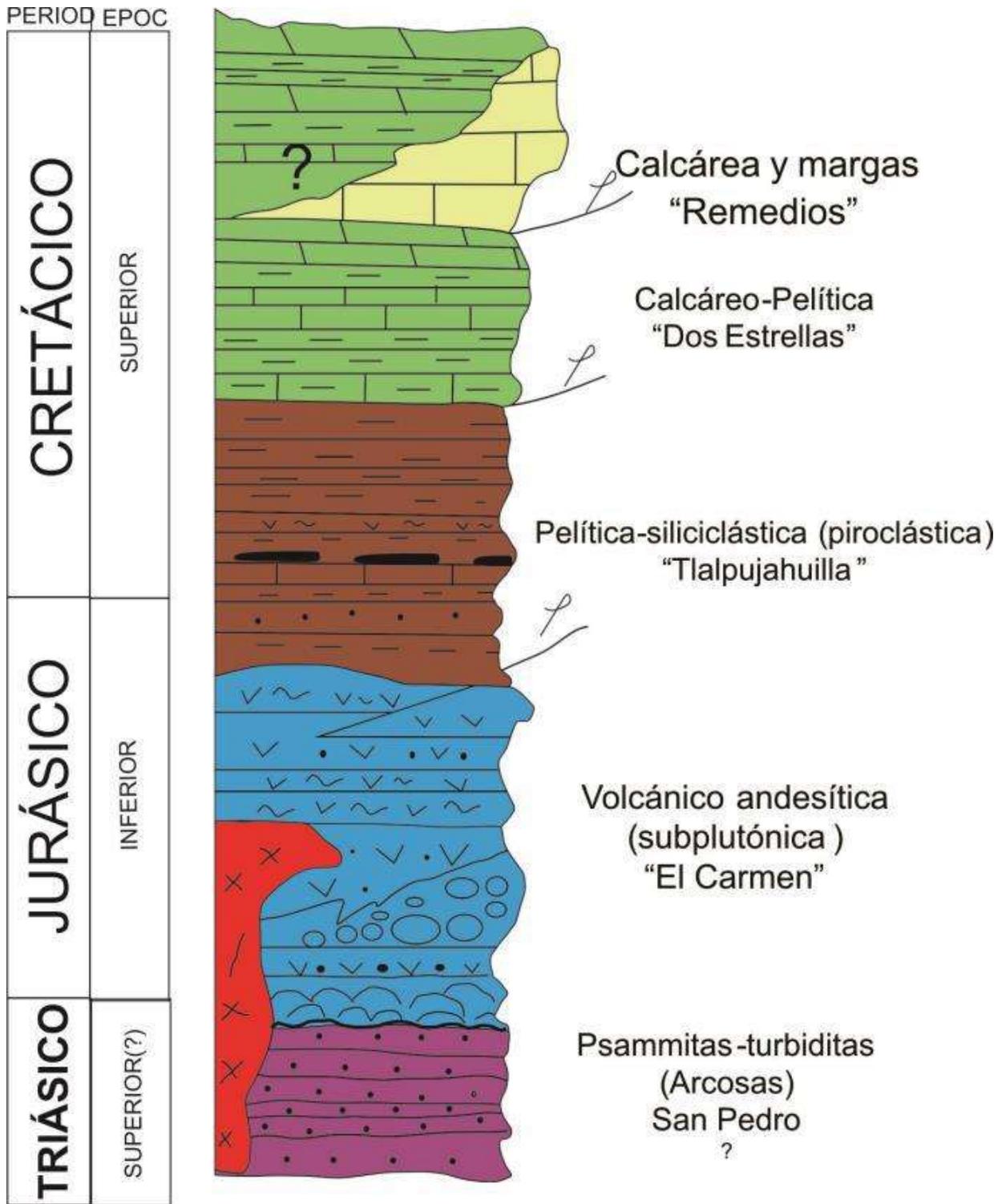


Figura 8. Columna estratigráfica compuesta de la Región de Tlalpujahuá (Rivera-Ruiz, 2016).

Por último, uno de los trabajos más recientes que existe sobre la región de Tlalpujahua corresponde a Corona-Chávez y colaboradores (2017) “*Geoquímica y mineralogía de los jales del distrito minero Tlalpujahua- El Oro, México, y sus implicaciones de impacto ambiental*” en el cual realizaron un estudio de muestras de jales. Con base en la cartografía que realizaron de estos jales determinaron la composición mineralógica, así como la concentración y correlación geoquímica de elementos mayores y traza de 48 muestras colectadas en 12 perfiles estratigráficos. Todo ello con el fin de determinar los elementos potencialmente tóxicos y el balance de acidez y neutralización de los jales del DIMITO (Distrito Minero El Oro- Tlalpujahua) para determinar la movilidad de dichos elementos potencialmente tóxicos y discutir el potencial de riesgo.

3.3 Dominios Morfoestructurales Regionales

En este apartado se describen ocho dominios morfoestructurales de la Región de Tlalpujahua basados en la información del trabajo de Rivera-Ruiz (2016) (Figura 9). A continuación, se presenta una síntesis y mencionan sus características más importantes.

3.3.1 Dominios Lomeríos Arroyo El Carmen

Este dominio se encuentra constituido por un conjunto de lomeríos que están agrupados en zonas medias de la sierra, se encuentra distribuido en la parte centro del área de estudio y se extiende al NW. Se encuentra caracterizado principalmente por sus formas cóncavas que generan un relieve maduro, teniendo elevaciones que varían desde los 130 hasta los 180 metros de altura. Las pendientes en la cima son suaves de 8° a 10° aproximadamente, mientras que en sus contactos con los arroyos están más marcadas, y aumentan de 35° a 50° aproximadamente. El sistema de drenaje varía de dendrítico a paralelo; este último asociado a fallas, pero predomina el dendrítico. Este dominio está asociado a las rocas del basamento de la Región de Tlalpujahua.

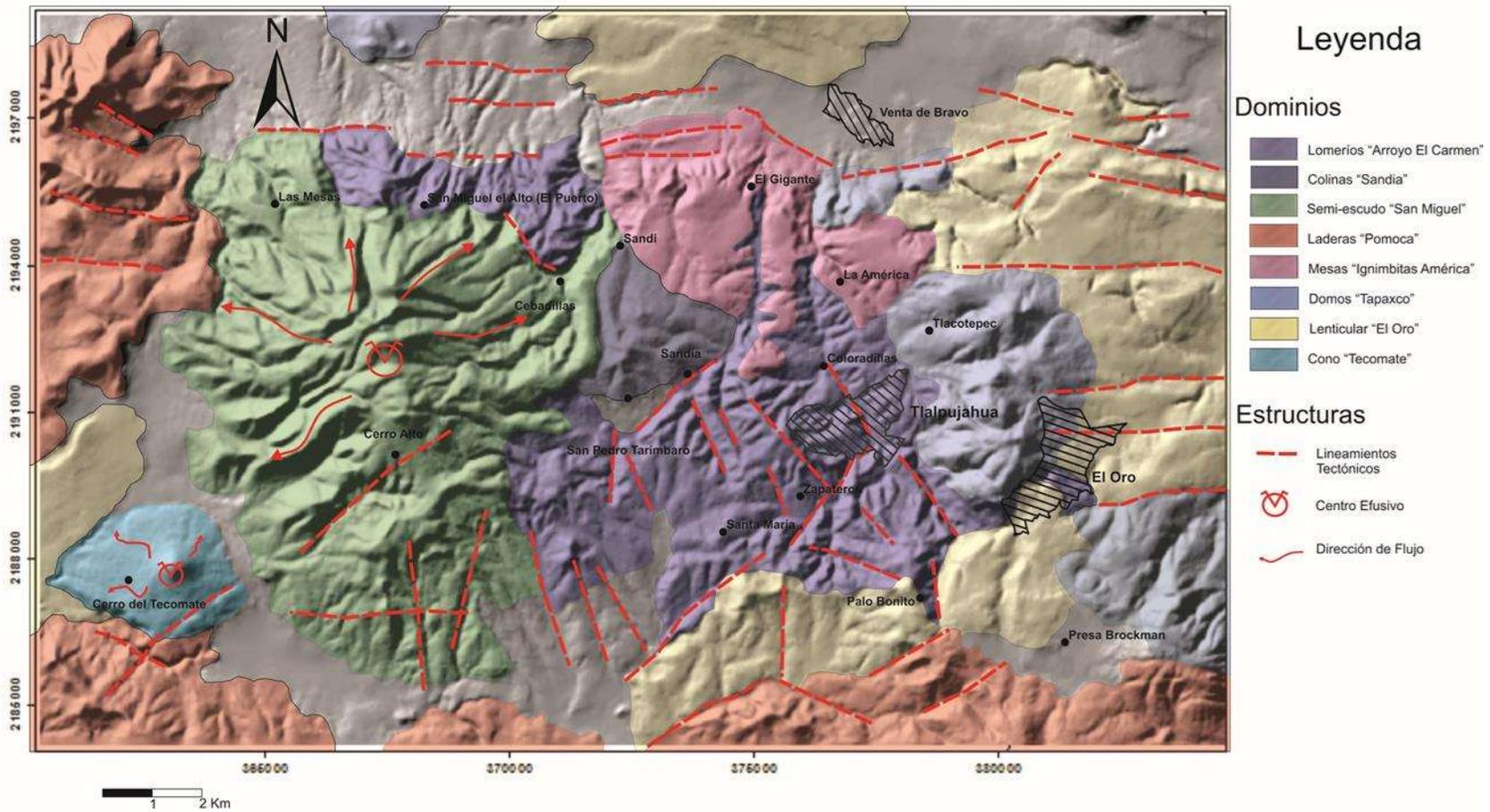


Figura 9. Mapa Morfoestructural de la Región de Tlalpujahua (Tomado de Rivera-Ruiz, 2016).

3.3.2 Dominio de Colinas Sandia

Este dominio se encuentra caracterizado por una distribución discreta en la parte central del área de estudio. Se encuentra constituido por un conjunto de colinas que infrayacen directamente a las secuencias volcánicas del Mioceno. Este dominio también presenta un relieve maduro con desniveles de 150 m, las pendientes son de aproximadamente de 20°-25°; en contacto con los arroyos se observan el desarrollo de cárcavas. El sistema de drenaje es radial- sub-dendrítico, que se encuentra asociado al substrato mesozoico de la región de Tlalpujahuá y es representado por las rocas sedimentarias.

3.3.3 Dominio Semi-Escudo San Miguel

Este dominio se encuentra constituido por edificios volcánicos recientes del Cinturón Volcánico Mexicano teniendo formas de semi-escudo, manteniendo su estructura de base y cima del aparato volcánico aún reconocibles y que se encuentran alineados con una tendencia cuya dirección es SE-NW. Generalmente estos volcanes tienen formas disectadas por la erosión. El volcán San Miguel se encuentra en la zona occidental-centro del mapa cubriendo gran extensión en la parte occidental de la región. Este dominio forma barrancas en sus extremos, teniendo un relieve muy maduro, cuenta con un desnivel promedio de 650 m de la base a la cima, en la cima aproximadamente las pendientes son de 15° a 18° y en las barrancas son de 36° a 50°. Constituye las partes altas de la sierra, tiene un drenaje altamente marcado de tipo radial-dendrítico, además dos sistemas de lineamientos cortando abruptamente a la forma del relieve con dirección SE-NW y N-S, y por último las lavas que lo constituyen están asociadas a andesitas del Terciario tardío.

3.3.4 Dominio de Laderas Pomoca

Este dominio se encuentra constituido por un conjunto de laderas y colinas altamente disectadas en forma de lentes que se encuentran cortadas por lineamientos tectónicos, teniendo una mayor concentración en la zona NW y pequeñas concentraciones en zonas SW y SE de la región. Suelen formarse cañadas en las depresiones que presentan debido al drenaje sub-maduro. Cuenta con un desnivel promedio de 450 m, con pendientes altas de 60°

a 70° aproximadamente, y tiene un sistema de drenaje altamente marcado que es radial-subdendrítico. Este dominio cuenta con una mayor área que el resto de los demás dominios, el cual se encuentra ligado a rocas basálticas, estas rocas se encuentran relacionadas a un vulcanismo monogenético asociado por la reactivación de fallas E-O estrechamente ligado al desarrollo del Cinturón Volcánico Mexicano.

3.3.5 Dominio Mesas Ignimbritas América

Este dominio se encuentra definido por mesas alargadas, las cuales presentan superficies relativamente planas en la cima, teniendo como mayor distribución en la parte centro-norte. Esta caracterizado por un relieve de tipo inmaduro, con bajos índices de erosión, con un desnivel de altura promedio de 200 m de la base (arroyos) a la cima. Las pendientes que presenta son suaves con 3° a 5° en la cima y abruptas con 50° a 70° en contacto con los arroyos. La densidad del drenaje inmaduro está asociada con un sistema de drenaje de tipo concéntrico centrífugo. Las geoformas de estas mesas son afectadas por dos lineamientos que las cortan abruptamente; 1) en la parte norte con dirección E-W, generando escarpes por falla y 2) con dirección N-S generando geoformas lenticulares. Las rocas han sido descritas como Formación Las Américas (Fries et al., 1965; *En*: Rivera-Ruiz, 2016).

3.3.6 Dominio Domos Tapaxco

Este dominio esta encuentra definido como una serie secuencias de domos; el primero se encuentra localizado en la zona oriental de la región y estos están alineados con dirección SE-NO y el segundo con dirección de E-O que se localiza en la zona NE, teniendo menores proporciones. Está caracterizado por presentar un relieve inmaduro a intermedio. Tiene un desnivel promedio de 480 m de la base a la cima, con pendientes moderadas de 26° a 30°. La densidad de drenaje es de tipo sub-maduro en la partes medias-altas de la sierra. El sistema de drenaje tiene una variación de radial a subdetrítico, predominando el radial, las rocas predominantes son los basaltos.

3.3.7 Dominio Lenticular El Oro

Este dominio se encuentra definido por un conjunto de laderas localizadas en la zona oriental y occidental de la región, con mayores concentraciones en la región NE. Se caracteriza por geoformas lenticulares en un relieve inmaduro con pendientes bajas con desniveles de 240 m. Aparentemente no ha sido afectado por lineamientos. La densidad de drenaje es inmadura, teniendo un sistema de drenaje parcialmente subdendrítico. Debido a estas características las rocas basálticas podrían estar relacionadas a derrames fisurales asociadas con secuencias lacustres, es decir, material reciente.

3.3.8 Dominio Conos Tecomate

Este es un dominio pequeño está caracterizado por un cono volcánico prominente y bien conservado, distinguiéndose del resto de los dominios debido su forma cónica, localizado en la zona SW con un desnivel de 270 m y pendientes entre 25° y 30°, decreciendo hacia la base. Tiene un sistema de drenaje radial, el cual indica que es una de las morfologías más jóvenes de la Región de Tlalpujahua.

3.3.9 Sistemas morfo-estructurales

En este apartado se describen los lineamientos morfológicos que se observaron y se trazaron. Se describen con base en su orientación y relativa temporalidad o relación de corte.

El primer sistema tiene una dirección NW-SE, está asociado con fallas normales afectando a los dominios Lomeríos y Colinas; estas fallas normales están asociadas a la mineralización de los distritos mineros Tlalpujahua y El Oro.

El segundo sistema tiene una dirección SW-NE afectando al primer sistema y es posterior. Aparentemente tiene una componente lateral derecha, desplazando un sistema de vetas, el cual afecta a los dominios Lomeríos, Colinas y Semi-escudo.

El tercer sistema tiene una dirección N-S afectando a los dominios Mesas y Semi-escudo; este sistema está asociado a un sistema de fallas de componente normal.

El cuarto sistema tiene una dirección E-W, el cual corresponde a fallas de componente normal asociadas con el sistema de Morelia-Acambay, este sistema afecta a todos los dominios descritos, y el cual se considera activo.

Capítulo 4

Justificación y objetivos

4.1 Justificación

La región de Tlalpujahua cuenta con algunos trabajos que describen su historia minera y su geología. Los estudios de la secuencia volcano-sedimentaria son escasos. Uno de esos trabajos es el realizado por Rivera-Ruiz (2016): "*Estudio Petrográfico de la Secuencia Volcánico-Sedimentaria Mesozoica de la Región de Tlalpujahua, Michoacán*". Este autor distingue la secuencia terrígena psammítica o arcosas San Pedro. Menciona que los afloramientos son escasos y sus relaciones estratigráficas y origen no son claros. Por ello, estudiar a detalle esta secuencia constituye un aporte al entendimiento de la evolución geológica de la región. La descripción detallada de esta secuencia permitirá comprender el ambiente tectónico y el basamento del TG. Los trabajos en los que se basa esta investigación son los de Silva y Salgado (1988), Corona-Chávez y Uribe-Salas (2009) y Rivera-Ruiz (2016). Estos trabajos muestran datos cartográficos y estructurales; sin embargo, no reportan datos geoquímicos por lo que este trabajo sería el primero en realizar un análisis de procedencia de la secuencia terrígena.

4.2 Objetivo general

Con base en un estudio de campo, petrográfico y geoquímico se busca definir la procedencia sedimentaria de las rocas sedimentarias terrígenas Mesozoicas de la región de Tlalpujahua, así como también complementar con un estudio geocronológico que nos ayudará para obtener su respectiva edad con el método isotópico de U/Pb de zircones para su interpretación tectónica en el sur de México.

4.3 Objetivos particulares

1. Describir las relaciones estratigráficas de las unidades psammíticas de la secuencia metasedimentaria de la Región de Tlalpujahua.
2. Identificar las variaciones de los componentes minerales y líticos, así como las relaciones texturales de las areniscas de la secuencia metaasedimentaria de la Región de Tlalpujahua.
3. Determinar la composición química y la correlación petrográfica de la secuencia sedimentaria para determinar el ambiente de la cuenca de depósito.
4. Por medio de técnicas isotópicas de U-Pb en zircones identificar las edades máximas y mínimas de depósito de la secuencia meta sedimentaria de Tlalpujahua.

Capítulo 5

Metodología

La metodología de este estudio consistió en la recopilación bibliográfica, trabajo de campo, elaboración del mapa geológico y de láminas delgadas, separación, montado y pulido de zircons, geoquímica de las muestras, descripción petrográfica e integración de los resultados.

5.1 Trabajo de gabinete

5.1.1 Revisión de bibliografía y compilación de artículos

La primera etapa del trabajo de investigación consistió en la recopilación, revisión y análisis de los trabajos publicados de la zona, así como los relacionados al origen y ambiente tectónico de las rocas terrígenas de estudio. La revisión de trabajos también incluyó aspectos del marco teórico (anexos 1-6). Esta información se complementó con la asistencia al curso "Procedencia de sedimentos en ambientes de arcos volcánicos"

5.1.2 Compilación de material cartográfico y análisis espacial

Primero se realizó una consulta en el repositorio del INEGI de datos vectoriales de las cartas topográficas E14A16 (El Oro-Hidalgo), E14A26 (Angangueo), E14A15 (Maravatío) y EA14A25 (Cd. Hidalgo), debido a que estas cartas son las que comprenden el área de estudio. Una vez realizada esta consulta, se descargaron estos materiales para elaborar los mapas de base (mapa de sombras (realizado con curvas de nivel a cada 20 m), altimétrico y de pendientes), los cuales se elaboraron con el software ArcGis 10.3, con la finalidad de interpretar los rasgos geomorfológicos del área de estudio y fueron esenciales para realizar las salidas de campo; fueron la base para la elaboración del mapa geológico y con la ayuda de la sobreposición-traslape de imágenes georreferenciadas de las cartas topográficas ya mencionadas fueron la guía para el trazado de las unidades geológicas, lineamientos y sobre todo para la distribución de las unidades geológicas.

5.2 Trabajo de campo

Para el trabajo de campo se realizaron dos salidas de 6 días cada una. Para la correcta realización del trabajo de campo se llevaron a cabo las siguientes etapas con algunos objetivos también:

5.2.1 Verificación de contactos y elaboración del mapa geológico

Verificación de contactos litológicos y extensión de unidades. Primero se hizo una revisión bibliográfica y después se realizaron dos salidas de campo teniendo como objetivos el reconocimiento y descripción de unidades aflorantes, identificar con mayor detalle la secuencia terrígena y la distribución espacial (cartográfica), así como las relaciones transicionales estratigráficas con otras unidades de las secuencias metavolcánicas y calcáreas de la región estudiada.

Se elaboró un mapa geológico con el software ArcGIS 10.3 con base en un mapa de sombras, altimétrico y de pendientes junto con otros materiales mencionados en el apartado 5.1.2, el cual también está basado en el mapa geológico del Atlas Cartográfico del Distrito Minero de Tlalpujahua (Corona-Chávez y Uribe –Salas, 2009), el mapa de la tesis "*Estudio Petrográfico de la Secuencia Volcánico-Sedimentaria Mesozoica de la Región de Tlalpujahua, Michoacán*" (Rivera Ruiz, 2016) y el mapa del DIMITO realizado para el proyecto del Geoparque DIMITO (Corona-Chávez, inédito). Además, con las cartas geológicas E14A16 (El Oro) y E14A26 (Angangueo) se completó la cartografía restante de toda el área, poniendo especial énfasis en la cartografía de las unidades sedimentarias. Por último, la distribución de las unidades de estas cartas geológicas se trazó digitalmente a una escala de 1: 50,000.

5.2.2 Revisión de muestras de trabajos previos y colecta de muestras

Se realizó un inventario de muestras colectadas previamente ordenándose en muestras de mano, briquetas, láminas y polvos para geoquímica, basándose la lista por nombre y clave, coordenadas, sección-localidad y clasificación de roca. En total, se revisaron 66 muestras que

se obtuvieron de trabajos previos y 23 de las salidas de campo realizadas. Las muestras fueron separadas en dos grupos: i) volcánicas y ii) volcánico-sedimentarias y sedimentarias (areniscas), tomando como referencia su localización en el mapa del área. A partir de este inventario se procedió a realizar una descripción macroscópica de las briquetas de cada una de las muestras.

Colecta de muestras. Para la colecta de muestras el criterio que se utilizó fue en observar la calidad del afloramiento y elegir aquellos más frescos para recolectar la cantidad necesaria de muestra, tanto para análisis geoquímicos, separación de zircones y para preparación de láminas delgadas. Todo ello con la finalidad de aportar información sobre el ambiente y edades de la secuencia terrígena. En total se cuenta con 89 muestras: 66 de trabajos previos y 23 muestras nuevas que serían procesadas para análisis petrográfico a y/o análisis geoquímicos.

5.2.3 Construcción de secciones transversales

La construcción de secciones transversales se llevó a cabo para definir las relaciones estratigráficas para construir la columna estratigráfica. Para la construcción de las secciones se levantaron datos estructurales y se describió cada uno de los afloramientos de cada sección con la finalidad de observar el tipo de contacto de la secuencia terrígena con el resto de las secuencias.

5.3 Trabajo de laboratorio e integración de los datos

5.3.1 Preparación de las láminas delgadas

Para la elaboración de las láminas delgadas se usó el laboratorio del Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra (INICIT) de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH) y el Laboratorio de Petrografía del Instituto de Geofísica de la UNAM Campus-Morelia. Se usaron las cortadoras AbrassiMet 250 de la marca Buehler, 10” Buehler Trim Saw + PF 10-10003-160, Thin Sectioning System Buehler. Una vez que pasan por estas cortadoras, se usan vidrios con sus diferentes abrasivos: 200, 400, 600 y 1000;

primero se usa el abrasivo 200 para quitar asperezas y colocar el portaobjetos con resina, se pone a secar, se corta nuevamente a un espesor adecuado para descripción petrográfica y luego se marca la clave de la muestra con una punta diamante. Posteriormente se usan los abrasivos 400, 600 y 1000 para pulir la muestra hasta alcanzar las 30 micras de espesor para poder examinarla en el microscopio (Figura 10).



Figura 10. Cortadoras con sus respectivos modelos: a) AbrassiMet 250 de la marca Buehler, b) 10" Buehler Trim Saw + PF 10-10003-160, c) Thin Sectioning System Buehler y d) uso de vidrios con sus respectivos abrasivos (200, 400, 600 y 1000) para pulir la muestra.

5.3.2 Petrografía

Para el análisis petrográfico se partió de la descripción macroscópica de un total de 75 briquetas pertenecientes exclusivamente a la secuencia volcano-sedimentaria de la región de Tlalpujahua (Anexo 7). La muestra se pulió y sucesivamente se escaneó con su clave, localidad, coordenadas, su respectiva descripción y su clasificación, con la finalidad de tener una descripción macroscópica.

Una vez seleccionadas las láminas delgadas se procedió a identificar las muestras de rocas sedimentarias representativas para su análisis petrográfico, y que tuvieran una textura psammítica (arenisca) bien conservada (menos foliada y metamorfizada). Por lo tanto, aunque se hizo una revisión de las muestras de mano y briquetas de las rocas volcánicas o de muestras relativamente alteradas o metamorfizadas, para este estudio se analizaron 36 muestras de rocas sedimentarias (secuencia terrígena), cuyo registro contiene la descripción de campo, textura, componentes, observaciones y sus respectivas fotomicrografías con el objetivo de determinar su abundancia mineral, así como una interpretación preliminar de su procedencia y su respectiva clasificación. La descripción petrográfica se realizó en el INICIT en el microscopio petrográfico marca Olympus BX50.

5.3.3 Procesado de muestras para geoquímica (trituration y pulverización)

Una vez hecha la petrografía se seleccionaron muestras complementarias para su procesamiento (trituration-pulverización) para análisis geoquímicos de roca total y separación de zircones. Para llevar a cabo este procedimiento se revisó la base de datos con que contaba el proyecto y muestras ya trabajadas por Rivera (2016).

A partir de las muestras seleccionadas se hizo una bitácora de un total de 4 muestras (3 areniscas y 1 lava almohadillada (pillow-lava) (OL-6 San Lorenzo, OL-14 San Pedro, OL-16 Coloradillas y OL-20 Santa María). Posteriormente se llevaron a cabo los procesos de: i) quiebra (Figura 11a): en este proceso se utilizó un marro y un banco de apoyo para realizar el rompimiento de las muestras, una vez quebradas, se removieron las partes alteradas separando lo más fresco posible para análisis geoquímico para que no hubiera alteración en los resultados, aunque para los zircones también se separó lo más fresco posible, hubo

menos rigor para desechar los fragmentos alterados; ii) trituración, en este proceso se utilizó una trituradora de quijadas (Figura 11b) para reducir el tamaño del material quebrado de las muestras para poder llevar a cabo la iii) pulverización, en este último proceso se hizo un cuarteo de las muestras, después se colocaron en cápsulas con esferas de acero dentro de una pulverizadora con la finalidad de reducir las partículas a un tamaño muy fino. Para evitar la contaminación se hizo limpieza repetidamente de los equipos que se fueron utilizando, en el cual se usó agua destilada, servilletas de papel y para algunas partes de los equipos que se podían quitar se utilizó jabón, esponjas y cepillos, así como también el baño ultrasónico.



Figura 11. a) Queiebra de las muestras, b) Trituradora de quijadas.

5.3.4 Separación, montaje y pulido de zircones

Con base en criterios de petrografía y geoquímica, se seleccionaron tres muestras para llevar a cabo un proceso de separación de zircones y revisar sus características tipológicas, así como su análisis isotópico por el método de U-Pb. El separado, montaje y pulido de los zircones se hizo en el laboratorio de separación de minerales en la ENES Campus UNAM Morelia con la ayuda y supervisión del M.C. Francisco Javier Gómez Rivera.

Para este procedimiento se utiliza media cucharada de material triturado y se le agregan 100 ml de agua destilada. La metodología fue la siguiente:

- a) Primero se llenaron los vasos de precipitado con agua destilada en la que se separaron los materiales finos y dejando los más densos en uno de los vasos de precipitado.
- b) Después se hicieron los bateos para que se separaran los materiales pesados de los finos, y se usó una pipeta (milimétrica) y puntillas para empezar a separar los zircones.
- c) Por último, las cajas de *tipo petri* se marcaron con el nombre de la muestra y también para indicar si era bateo o zircones separados (Figura 12 y 13).

Para el montado y pulido de los zircones:

- a) se usaron bases cuadradas de vidrio, se colocó una cinta doble cara y marcó con una cruz y un círculo lo más centrado posible en donde se iban a montar los cristales. El círculo se dividió y se marcaron los cuadrantes con el nombre de las muestras.
- b) Después se preparó resina y catalizador en una relación 8:1 para montar los cristales separados. Una vez que se montaron se les colocaron anillos de baquelita en ambas muestras y se colocó la mezcla de resina con el catalizador sobre estos mismos. Finalmente, las muestras fueron cortadas y pulidas para tener cortes adecuados de los cristales y realizar su análisis isotópico en el LEI-Centro de Geociencias - Campus UNAM en Juriquilla, Querétaro (Figura 14).

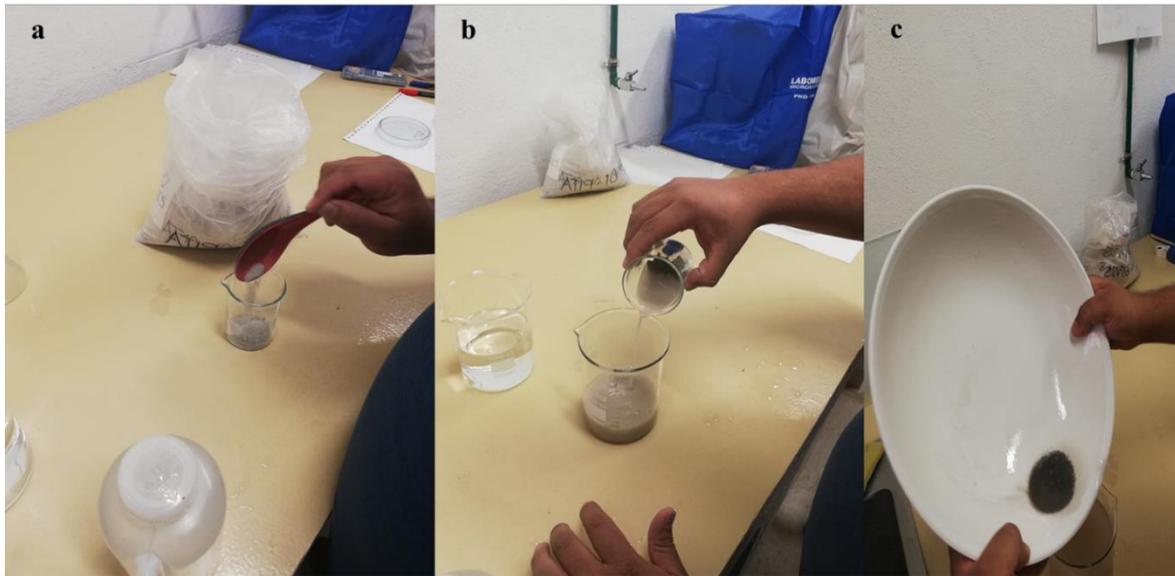


Figura 12. a) Preparación de materiales, b) Separación de los materiales y c) Bateo para separar los materiales pesados de los finos.



Figura 13. a) Cajas de Petri marcadas con nombre de la muestra, b) y c) Separación de zircones con una pipeta milimétrica.

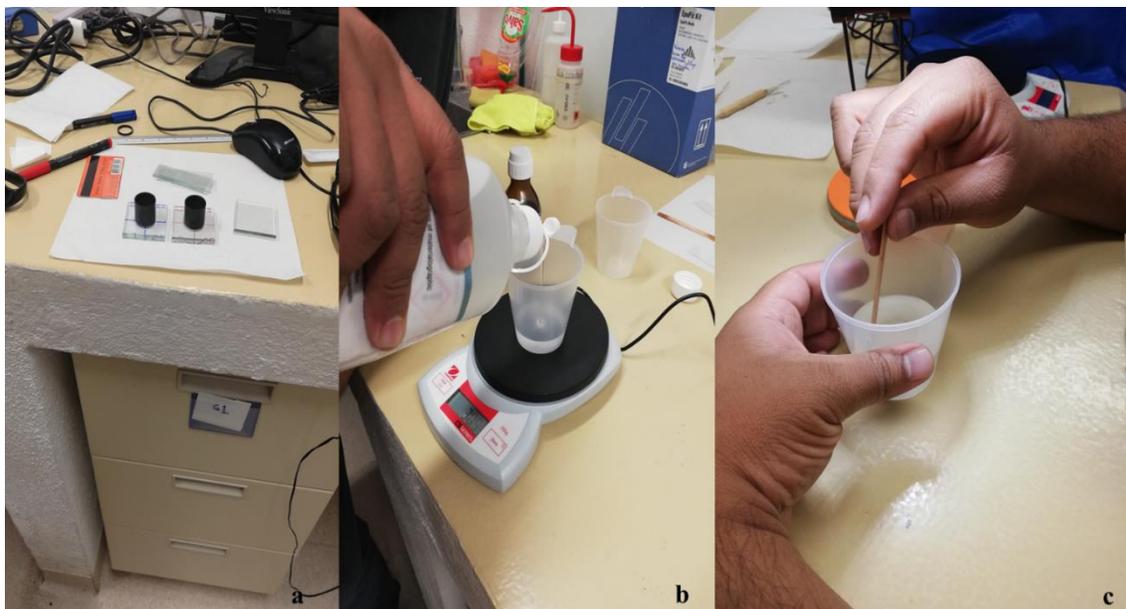


Figura 14. a) Colocación de anillos sobre los zircones montados, b) y c) Preparación de la resina y catalizador para rellenar sobre los anillos para luego ser cortados y pulidos.

5.3.5 Isotopía U-Pb en zircones

En el Laboratorio de Estudio Isotópicas (LEI) del Centro de Geociencias UNAM, Juriquilla, Querétaro, con la ayuda y supervisión del Dr. Carlos Ortega Obregón se realizaron los fechamientos de zircones de dos muestras de areniscas con la clave OL6 y OL14 con el método U/Pb utilizando un espectrómetro de masas equipado con un sistema de ablación láser. A continuación, se describe brevemente este proceso ya que en el Anexo 6 se explica de forma detallada.

La espectrometría de masas de LA-ICP-MS es una técnica que posee una alta sensibilidad y rapidez en análisis multielementales siendo de alta precisión con bajos límites de detección. Tiene la capacidad de determinar concentraciones desde ppt (partes por trillón) hasta tiene la capacidad de cantidades de ppm (partes por millón) en una muestra en un máximo de 5 minutos, incluidas las firmas isotópicas de cada elemento (Díaz-Zamora, 2017). Los análisis son sumamente rápidos y además este instrumento permite microanálisis elementales e isotópicos en minerales, vidrios e inclusiones fluidas con una resolución espacial variable entre 10 y 480 micrómetros de diámetro (Consultado en la página de geociencias de Juriquilla, LUGIS-UNAM).

Se realizó un análisis de catodoluminiscencia (CL) en los cristales zircones utilizando el microscopio binocular SZX12 (Figura 15a). Las muestras se colocan en una cámara al vacío conectada a una fuente de rayos catódicos lo cuales, al golpear la superficie de la muestra y en sitios de emisión producidos por defectos cristalinos, emiten luz visible cuyo color depende de los elementos que la produzcan. En este caso, el análisis se realiza para observar la morfología, tipología y reconocer las diferentes poblaciones en los cristales (Figura 16). Con las imágenes de CL obtenidas y el software Geostar se eligen los puntos de interés (Figura 17) y se procede a analizar la muestra en el espectrómetro LA-ICP-MS (Fig. 15b).



Figura 15. a) Microscopio Binocular SZX 12, b) Espectrómetro de masas (equipo de ablación láser).

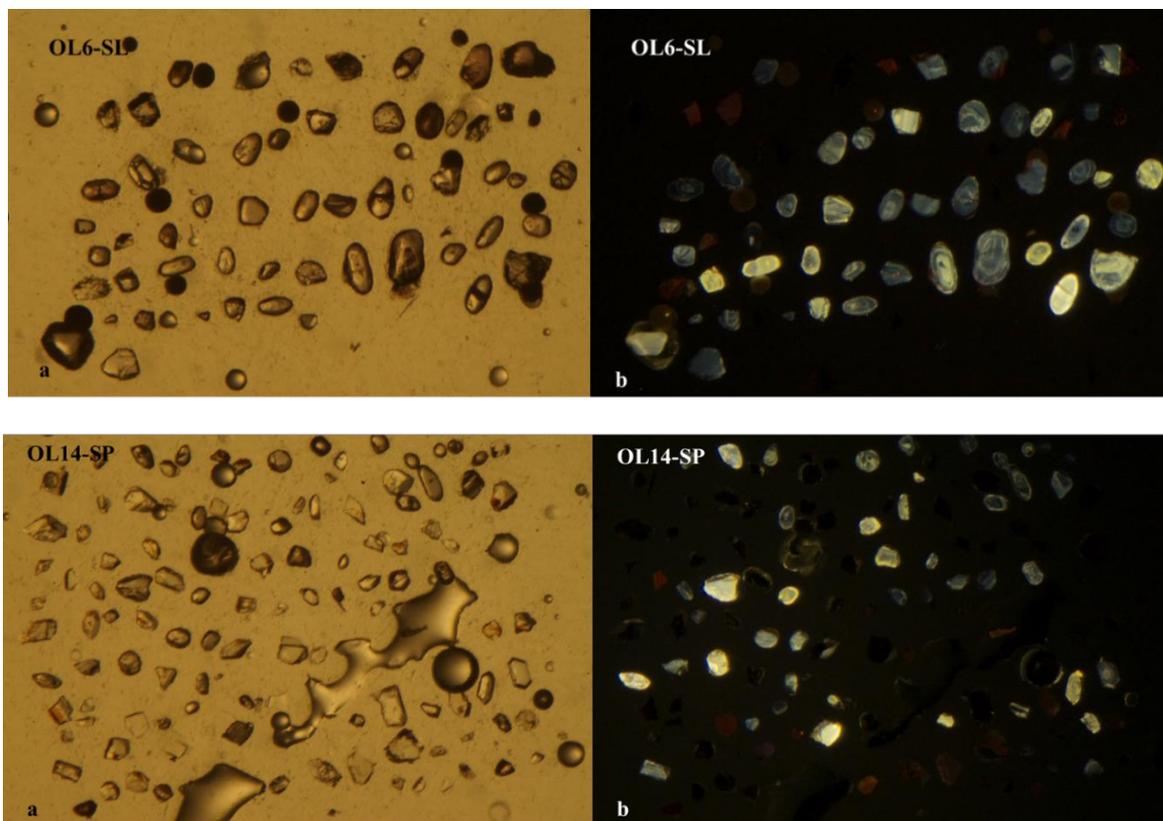


Figura 16. Fotografías de zirrones montados y pulidos de las muestras OL6 y OL14 tomadas con el Microscopio Binocular SZX 12, a) Zirrones vistos con luz paralela, b) zirrones con catodoluminiscencia.

Por último, se llevó a cabo el análisis de los puntos seleccionados en el cual se realiza una relocalización de puntos, reajuste en puntos, bordes y núcleos. Una vez que se llevaron a cabo estos análisis se utilizó un software llamado Igor Lite en el cual se elaboraron los diagramas KDE (Kernel Density Estimation) y de concordia de cada muestra analizada.

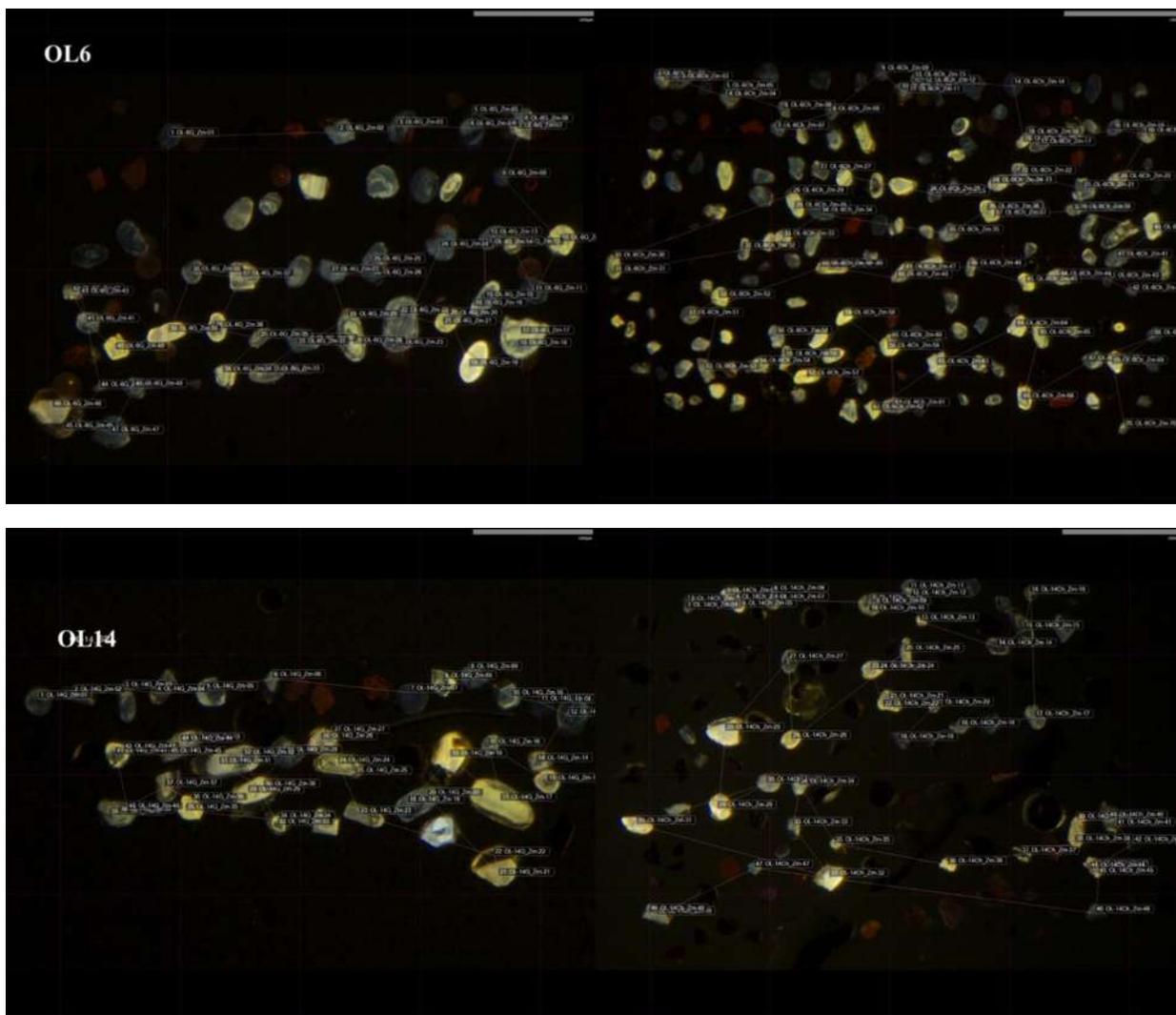


Figura 17. Mapas de la localización de los puntos de análisis de las muestras OL6 y OL14.

5.3.6 Fluorescencia de rayos x

Algunas muestras que fueron pulverizadas para análisis geoquímico se enviaron algunas muestras al Laboratorio de Fluorescencia de Rayos X, cuyo responsable es el Quím. Rufino Lozano en el Instituto de Geología, UNAM. En este laboratorio se dispone de un espectrómetro secuencial de rayos X (Rigaku Primus II) equipado con un tubo de rodio y ventana de berilio de 30 micras, el cual es utilizado para determinar elementos mayores y elementos traza.

5.3.7 Integración e interpretación de resultados

Con base al análisis de los antecedentes geológicos y del marco teórico, se interpretaron y analizaron los resultados obtenidos de campo. Estos resultados incluyen las relaciones estratigráficas y distribución de la secuencia psammítica con respecto al resto de las unidades aflorantes por medio de cartografía, secciones geológicas, petrografía (composición mineralógica, líticos y variaciones texturales de las secuencia terrígena y su respectiva clasificación), geoquímica (composición geoquímica, está nos ayudó con exactitud determinar su ambiente de procedencia) y geocronología (edades máximas y mínimas de depósito obtenidas por el método uranio-plomo), con la finalidad de alcanzar los objetivos propuestos en este trabajo de investigación y discutir la procedencia de esta unidad de psammitas o arcosas San Pedro.

Capítulo 6

Resultados

6.1 Unidades geológicas del basamento de la Región de Tlalpujahua (RT)

En la Figura 18, se presenta una ampliación de la zona de interés del mapa geológico regional de la RT. En el Anexo 11 se muestra un mapa regional. Este mapa fue elaborado por medio de la digitalización con el software ArcGIS con base en el mapa geológico del Atlas cartográfico del Distrito Minero de Tlalpujahua (Corona-Chávez y Uribe-Salas, 2009) y también por este mismo mapa actualizado por los mismos autores, presentado como el mapa del Distrito Minero de El Oro y Tlalpujahua (DIMITO) realizado para el proyecto del Geoparque DIMITO (Corona-Chávez, inédito). Sin embargo, durante el proceso de digitalización se revisaron los contactos y lineamientos con ayuda de una serie de mapas de sombras, altimétrico y de pendientes, así como de las cartas geológicas E14A16 (El Oro) y E14A26 (Angangueo) del Servicio Geológico Mexicano. Es importante hacer notar que en el mapa de la figura 18 se incluye la localización de las muestras con análisis petrográficos y de geoquímica, así como las muestras que han sido fechadas por U-Pb en concentrados de zircones por en este estudio.

A continuación, se presenta la descripción de las secciones geológicas construidas en el presente estudio, en las cuales se integran las observaciones de Rivera-Ruiz (2016), así como la descripción propia de las unidades (ver anexos de campo 10.1 y 10.2). A partir de las relaciones geológicas observadas, posteriormente serán descritas las unidades geológicas de la Región de Tlalpujahua. El orden de descripción se presenta de la base a la cima y está basado en la columna estratigráfica de la Figura 21, sin embargo, es importante hacer notar que se presenta una descripción más amplia y detallada de la unidad geológica Psammitas-Turbiditas (Arcosas) San Pedro, debido a que esta unidad representa el principal objetivo de este trabajo de investigación.

6.1.1 Sección Tlalpujahuá-Santa María (A-A')

En la Figura 19 se muestra la sección geológica Tlalpujahuá-Santa María A-A' con dirección NE-SO.

Se observan contactos litológicos tanto transicionales como tectónicos, así como una serie de pliegues anticlinales con capas buzando hacia el NE y SO y un sistema de fallas normales afectando a las secuencias. La mayor parte de la secuencia está deformada y muestra un metamorfismo heterogéneo de bajo grado. En la fracción N, en la carretera # 126 que se anexa en esta sección A-A' (Figura 19) se muestran intercalaciones de areniscas volcanoclásticas con tobas o metatobas, la cual se encuentra dislocada por una falla que corta esta intercalación. El efecto de esta falla se muestra al inicio de la sección en el arroyo San Lorenzo, lo que nos indica un contacto de tipo tectónico. Posteriormente, en este mismo arroyo se observan estas areniscas volcanoclásticas formando un pliegue anticlinal en el cual sus capas buzando 42° NE y SO, respectivamente, infrayaciendo a las areniscas y a las metatobas, significando que representa un contacto de tipo tectónico. En la parte central de la sección, a lo largo del arroyo Santa María, se pueden observar una serie de secuencias de plegamientos de tipo anticlinal y conforme uno va subiendo topográficamente hacia la dirección SO de la sección, se puede observar una secuencia de estas mismas areniscas intercaladas con calizas carbonosas, las cuales están siendo cortadas por un plano de cizalla o de falla.

Sobre este mismo arroyo se observan a estas areniscas formando un anticlinal con un plano axial con buzamiento inclinado con un ángulo de 34° NE y 56° hacia el SO. Esta secuencia es sobreyacida por los volcanoclásticos, las pillow lavas y las areniscas volcanoclásticas. En el extremo de la sección hay una posible cabalgadura que se observa en las lutitas de Santa María sobreyaciendo a las secuencias que están encima a las areniscas plegadas.

6.1.2 Sección Arroyo San Pedro (B-B')

En la Figura 20 se presenta la sección geológica B-B' Arroyo San Pedro, la cual tiene dos direcciones, primero de SE-NO en el camino a San Pedro-Tarímbaro, donde se

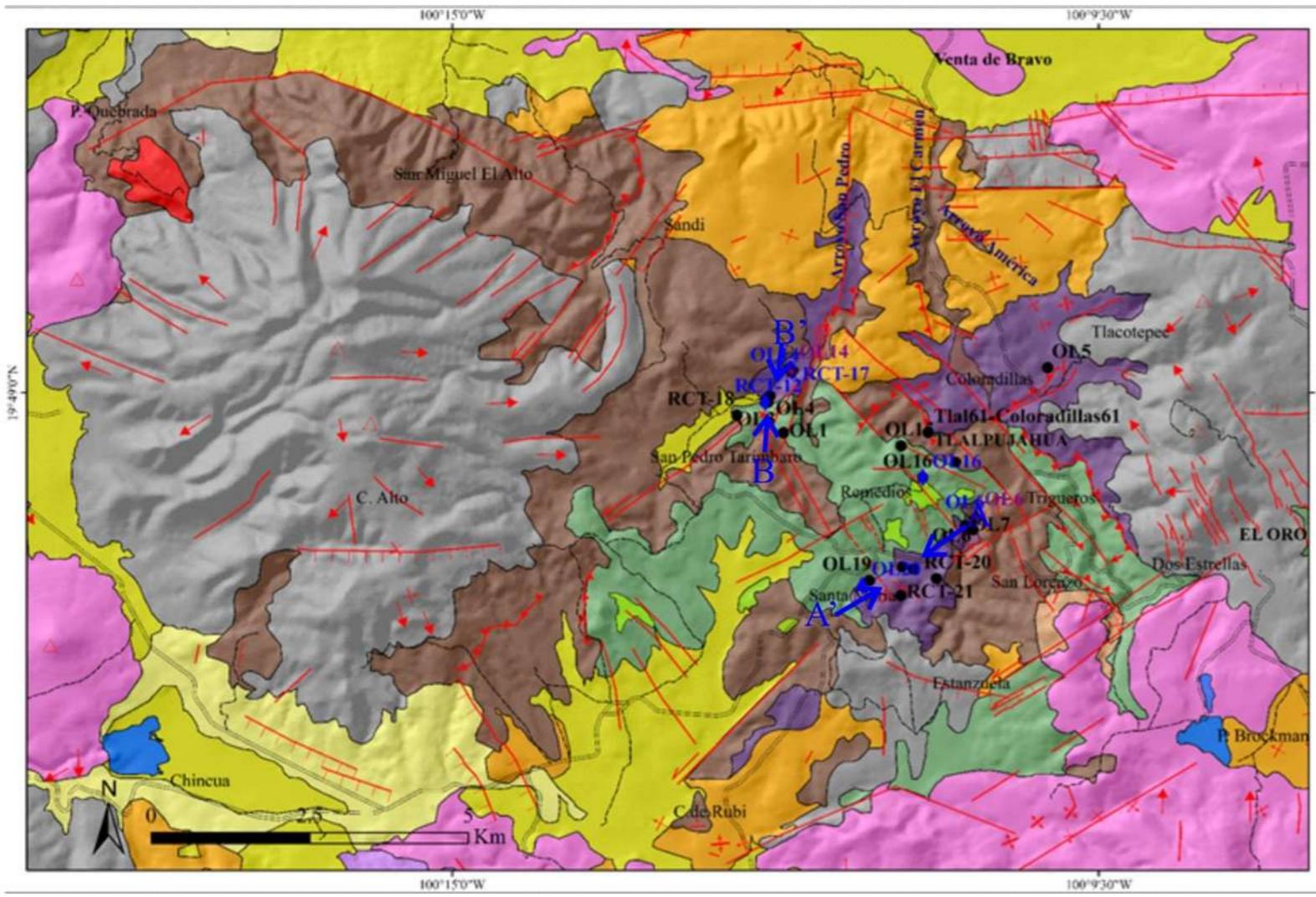


Figura 18. Mapa geológico del Distrito Minero Talpueh y el Oro donde las flechas indican el trazo de las secciones geológicas.

Leyenda

- | | | |
|--|--|---------------------------|
| Unidades geológicas | | Estructuras |
| Vulcanismo y sedimentación lacustre (Plioceno-Cuaternario) | | → Echado vertical |
| ■ Depositos fluvio-lacustres o piemonte recientes e indiferenciados Remedios | | → Echado horizontal |
| ■ Basaltos derivados de los conos o derrames fisurales | | ⊕ Domo |
| ■ Domos y conos andesítico-dacítico Somera-San Miguel | | → Seudoestratificación |
| Vulcanismo y sedimentación lacustre (Mioceno Medio y Superior) | | — Carreteras_ter |
| ■ Secuencia fluvio-lacustre y diatomitas Chincua | | — Carreteras_pav |
| ■ Secuencias félsica de ignimbritas y domos dacítico-riolíticos (Capulín América) | | → Dirección de flujo |
| ■ Andesitas Sierra del Rosario (20 Ma) | | → Lineamientos |
| Depósitos continentales post-orogénicos (Eoceno Inferior) | | → So-S1 Estratificación |
| ■ Brechas y conglomerados polimicticos Talpuehuilla | | → Sinclinal |
| Secuencia Volcánico Sedimentaria Terreno Guerrero (Jurásico Superior-Cretácico Inferior) | | → S2 Crenulación |
| ■ Secuencia Calizas masivas Remedios | | → S2-S3 Foliación Cizalla |
| ■ Secuencia Calcárea-Pelítica Dos Estrellas | | → Pliegue recumbente |
| ■ Secuencia Pelítica-Siliciclástica (Piroclástica) Talpuehuilla | | → L3 Pliegue |
| ■ Secuencia Volcánica-Andesítica El Carmen | | → L2 Pliegue |
| ■ Gabrodiorita El Cuervo (Jurásico Inferior-Cretácico Inferior) | | → L1 Pliegue |
| ■ Gabrodiorita El Cuervo | | → Falla lateral |
| Muestras | | → Falla inversa |
| Algunos datos del vulcanismo del cuaternario han sido compilados de las Cartas Geológicas E14A16 El Oro y E14A26 Anganguero del SGM. | | → Anticlinal |
| ★ Muestras Fechamientos | | → Fallas normales |
| ◆ Muestras Geoquímica | | → Centro eruptivo |
| ● Muestras Petrografía | | → Cuerpos de agua |

Base de datos INEGI.
 Proyección cartográfica Universal Transversal de Mercator UTM, Zona 14
 Datum horizontal WGRS84



Elaborado por Omar Lerma Rodríguez
 Universidad Michoacana de San Nicolás Hidalgo
 Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra
 Diciembre 2019



Sección Tlalpujahuá- Santa María (A-A')

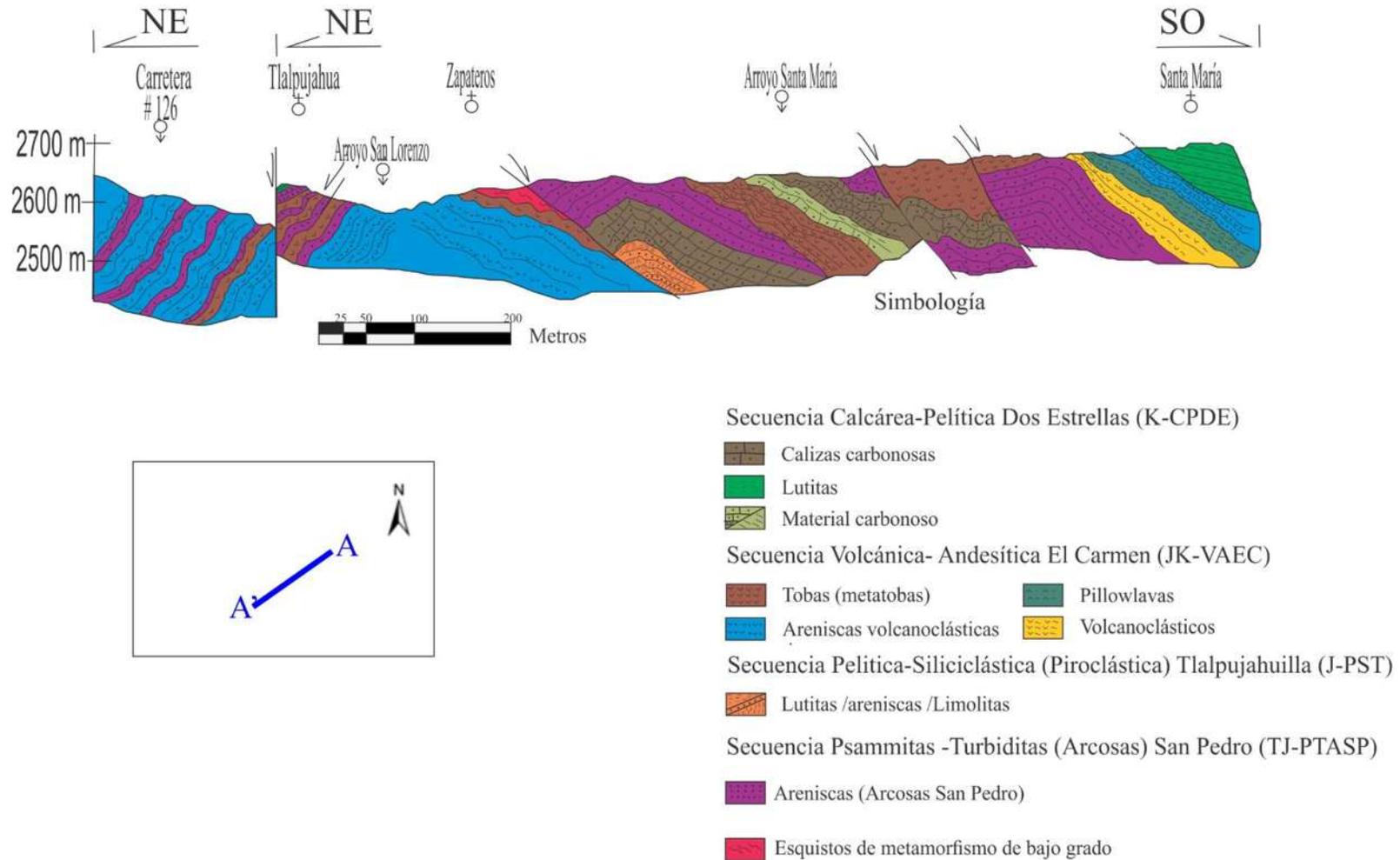


Figura 19. Sección Tlalpujahuá-Santa María (A-A') (Modificada de Rivera-Ruiz, 2016), en el cual se incluye el trazo de la sección.

muestran unas areniscas con diversos planos de falla, en el cual podría haber un plano falla que corta a estas areniscas con otra secuencia. Bajando al arroyo se cambia de dirección SO-NE donde se observan andesitas de forma masiva en contacto con calizas carbonosas intercaladas con areniscas anastomosadas, lo que significa un contacto aparentemente de tipo tectónico.

Estas mismas areniscas con una estructura anastomosada están en contacto con las arcosas San Pedro. Posteriormente las arcosas San Pedro se presentan con un sistema de plegamiento en donde el buzamiento es variable hasta el contacto donde sobreyacen a las calizas de la secuencia Remedios por un contacto de cabalgadura, así como posteriormente en el extremo final de la sección se puede observar un contacto tectónico con la secuencia de piroclastos o volcánicos con un metamorfismo de esquistos verdes desarrollando la intersección de planos de clivaje buzando al S y SE. La secuencia el Carmen se encuentra bascula por fallas normales y de manera discordante con la secuencia de arcosas San Pedro, la cual no hay relación directa con esta secuencia y además es afectada por un dique, aunque también hay fallas inversas afectando y dislocando a la secuencia El Carmen.

6.1.3 Unidades geológicas de la Región de Tlalpujahua

En la Figura 21 se presenta la columna estratigráfica de la RT, la cual muestra las unidades geológicas de la RT de la base a la cima.

Como se ha mencionado, el principal objetivo de este trabajo consiste en describir con mayor detalle la secuencia de arcosas San Pedro, las cuales además representan el basamento relativo de la secuencia volcánica-sedimentaria. Por medio de observaciones de campo y las relaciones estratigráficas propuestas en las secciones A-A' y B-B', se observa que la secuencia de arcosas San Pedro se encuentra sobreyacidas por una secuencia carbonatada y de margas que representa la unidad cretácica más joven. Así mismo es oportuno mencionar que en la columna se muestra la discordancia angular con la secuencia de conglomerados terciarios, así como las secuencias volcánicas del Plio-Cuaternario del Cinturón Volcánico Mexicano (De la Teja *et al.*, 2000).

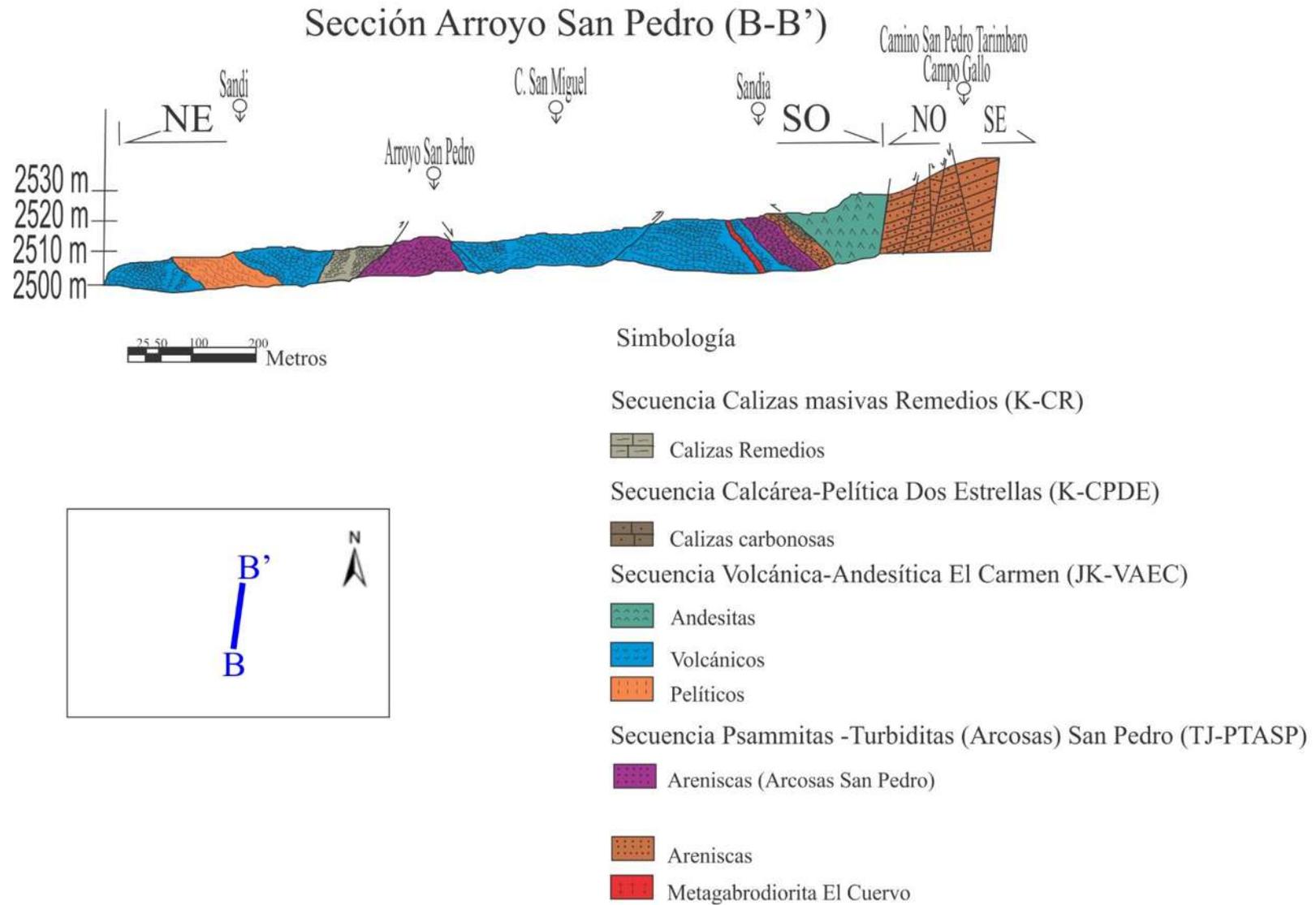


Figura 20. Sección Arroyo San Pedro (B-B') (Modificada de Rivera-Ruiz, 2016), en el cual se le incluye un trazo de localización.

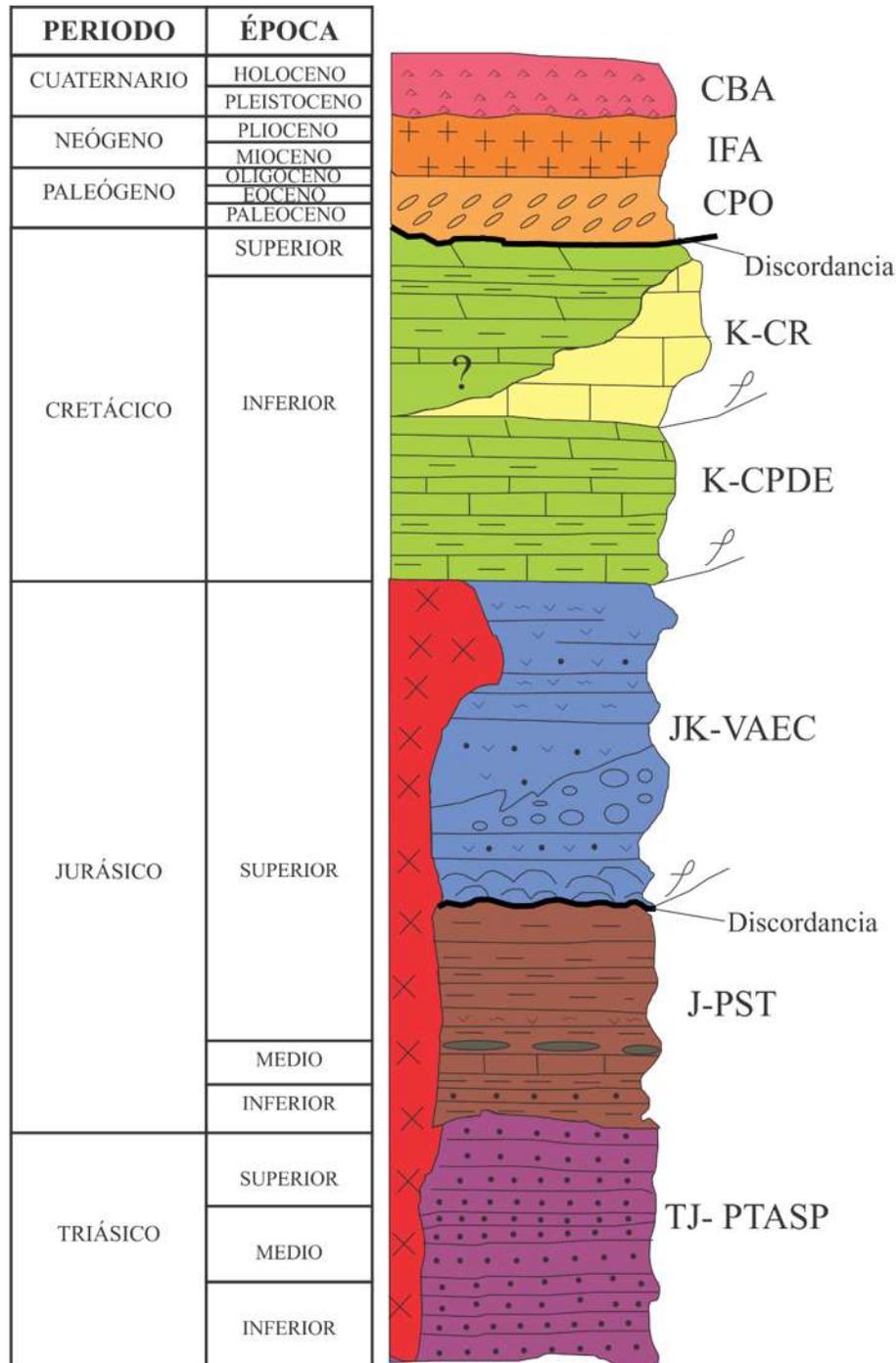


Figura 21. Columna estratigráfica compuesta de la Región de Tlalpujahuá (Modificada de Rivera-Ruiz, 2016). Donde TJ-PTASP: Triásico-Jurásico – Secuencia Psammitas-Turbiditas (Arcosas) San Pedro; (J-PST): Jurásico – Secuencia Pelítica Siliciclástica Tlalpujahuilla; (JK-VAEC): Jurásico Cretácico – Secuencia Volcánica Andesítica El Carmen; (K-CPDE): Cretácico – Secuencia Calcárea-Pelítica Dos Estrellas; (K-CR): Cretácico-Secuencia Calizas Remedios; CPO: Conglomerados post-orogénicos; IFA: Ignimbritas “Formación Las Américas” y CBA: Basaltos-andesitas del Cuaternario.

6.1.3.1 Secuencia Psammitas-Turbiditas (Arcosas) San Pedro (TJ-PTASP)

Esta unidad consiste en una intercalación de areniscas de grano fino a grano medio, bien estratificadas con estructuras primarias de turbidez.

Los principales afloramientos de la secuencia TJ-PTASP se encuentran en la parte norte del arroyo San Pedro (Figura 22a), los cuales fueron reportados por Rivera-Ruiz (2016), mientras que en este trabajo la secuencia TJ-PTASP también han sido descrita en el arroyo Santa María (Figura 22b, sección A-A'). Sin embargo, algunos afloramientos también se observaron en el arroyo San Lorenzo (Figura 22c). Los mejores afloramientos o localidad tipo de esta unidad se encuentra en el arroyo San Pedro, donde aflora por más de 2 km de secuencias rítmicas y donde tiene un espesor de más de 200 metros.



Figura 22- Secuencia Psammitas-Turbiditas (Arcosas) San Pedro (TJ-PTASP): a) Arroyo San Pedro, b) Arroyo Santa María y c) Arroyo San Lorenzo.

En relación con las variaciones litológicas, esta unidad se presenta en intercalaciones en forma rítmica o de tipo flysch con areniscas que pueden variar de gris a negras con estratos de diferente espesor que varía entre 2 y 20 centímetros.

En muestra de mano las areniscas son de color gris con una textura clástica, compuesta principalmente en su mayor proporción por clastos visibles de feldespatos y cuarzo, aunque también son visibles líticos del tamaño de arena que son los que al aparecer le atribuyen el

color gris a verde oscuro a la roca. Los fragmentos tienen una moderada selección, se encuentran generalmente en una textura matriz-sostenida y algunas veces en grano-sostenida, con una matriz variable, >15% de matriz. Los clastos varían de subangulosos a subredondeados, aunque también se presentan algunos angulosos. Esta unidad se caracteriza por presentar en campo, diferentes tipos de estructuras primarias, que varían desde graduada, de carga, flasser y bloques en forma de *slumps* (Figura 23).

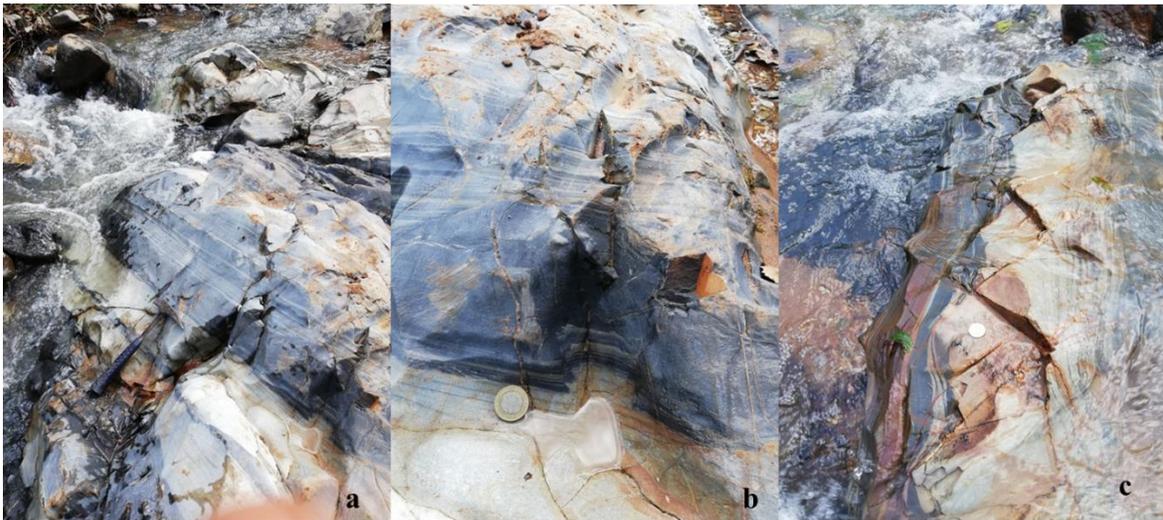


Figura 23. Estructuras primarias de la secuencia (TJ-PTASP) a) Secuencia sedimentaria rítmica, b) proceso de licuefacción y c) estructura tipo flasser que significa que se va adelgazando la secuencia.

La textura clástica algunas veces se presenta deformada por plegamientos, desarrollando diferentes tipos de grados de foliación, desde inter-espaciada a muy intensa, por crenulaciones y con una intensidad que puede mostrar un cierto grado de metamorfismo.

En el arroyo San Pedro esta unidad se observa con una estructura sedimentaria rítmica y con estructuras de turbidez en el cual se muestran estructuras de carga mostrándose una clara estratificación, con fracturas y con vetas rellenas de calcita. Los fenómenos físicos y de licuefacción entre los estratos y las estructuras sedimentarias de turbiditas y en forma de *slumps*, sugieren que se pudieron depositar en una cuenca profunda e inestable (Figura 23).

En el arroyo San Lorenzo se observa un afloramiento con estructura laminar y relativamente foliado en donde estas areniscas se encuentran intercaladas con lutitas y limolitas, las cuales a su vez sobreyacen a las areniscas y con posibles horizontes de tobas

(metatobas). Sucesivamente esta secuencia se encuentra dislocada por una falla que yuxtapone a la secuencia (TJ-PTASP) con las unidades volcánicas.

En el arroyo Santa María se observan afloramientos de estas mismas areniscas con una estructura bien estratificada, con un echado y asociado a una deformación de plegamiento y fallamiento que pone en contacto tectónico con las calizas carbonosas, observándose también un plano de cizalla. Esta relación a su vez es afectada por un plano de falla (normal; Fig. 19). Con base en los afloramientos observados en campo y las relaciones de las secciones geológicas, se sugiere que la secuencia (TJ-PTASP) constituye la base estratigráfica de toda la RT, infrayaciendo a la secuencia volcánica-sedimentaria y a la secuencia de carbonatos. Sin embargo, generalmente se muestran relaciones de contacto de tipo tectónico, como puede observarse en la sección Tlalpujahuilla-Santa María (A-A') (Figura 19) y en la sección Arroyo San Pedro (B-B') (Figura 20).

En relación con su edad, con base en la revisión bibliográfica esta secuencia solo ha sido reportada en el trabajo de Rivera-Ruiz (2016), en donde la considera pre-Cretácica, pero hasta este trabajo no se tenía una edad bien establecida. Este autor menciona que debido a la composición cuarzo-feldespática, podría representar un producto de erosión de un antiguo basamento de origen desconocido.

6.1.3.2 Secuencia Pelítica-Siliciclástica (Piroclástica) Tlalpujahuilla (J-PST)

Esta unidad se define como una intercalación de lutitas y limolitas o pelitas con areniscas, con algunos paquetes de tobas con lentes de carbonatos carbonosos y pedernal asociados a una secuencia terrígena de ambiente profundo.

Se observa en toda la RT (unidad café del mapa), pero se encuentra bien expuesta en el camino Santa María y San Miguel el Alto. En el camino a Santa María (Figura 24a) los afloramientos tienen una extensión de algunos kilómetros, ya sea sobre la carretera como sobre el arroyo del mismo nombre. Del mismo modo, está muy bien expuesta en la carretera Tlalpujahuilla- Tlalpujahuilla (Figura 24b), donde se pueden observar sus características y variaciones a lo largo de casi 6 km, por lo que puede considerarse como la localidad tipo de la J-PST. Sin embargo, es posible observar algunos otros afloramientos en el arroyo El

Carmen y en la región de Senguio, en donde se asocia con secuencias volcánicas que pueden presentar una estructura de pillow lava.



Figura 24- Secuencia pelítica-siliciclástica (piroclástica) Tlalpujahuilla (J-PST): a) Camino a Santa María y b) Carretera Tlalpujahuilla-Tlalpujahuilla.

La secuencia de J-PST se caracteriza por presentar una intercalación de areniscas con lutitas, las cuales tienen un color amarillento a rojizo mostrando una estructura bien estratificada de aspecto rítmica, con estratos de espesor variable desde laminar en las lutitas, hasta en estratos delgados de tipo centimétrico y excepcionalmente de más de 10 centímetros en el caso de algunas areniscas. Se observan con frecuencia lentes de pedernal negro. En muestra de mano las areniscas presentan texturas clásticas de arenas medias a gruesas con abundante cuarzo y líticos de color oscuro. La textura es comúnmente grano-sostenida, caracterizada porque los clastos están inmersos en una matriz arcillosa, lo cual le da el color amarillento. Esta unidad suele presentar transiciones con material carbonatado en camino hacia Tlalpujahuilla y en la parte sur del Arroyo Santa María, aunque también suele presentar una transición de lutitas a margas de colores negros con estratos de tamaño de 2 a 5 cm, sugiriendo un cambio en las condiciones de depósito. En el camino a Santa María suelen

observarse segregaciones de cuarzo notorias y micas indicándonos metamorfismo de bajo grado, aunque también el afloramiento se encuentra alterado.

Las relaciones estratigráficas de esta secuencia muestran que aparentemente podrían ser transicionales entre las areniscas y algunos horizontes calcáreos y siliciclásticos, incluso en la sección (A-A') Tlalpujahuá-Santa María (Figura 19).

Otra característica de la secuencia de J-PST, se refiere a que por sus propiedades mecánicas poco competentes generalmente se encuentra deformada en forma heterogénea. Generalmente presenta variaciones de tipos de plegamiento, inclinado, de rodilla e isoclinal asociados con diferentes tipos de foliación, planos de crenulación, así como también algunas grietas de tensión.

Con base en las observaciones y relaciones estratigráficas, se establece que la secuencia de J-PST sobreyace a las psammitas de la secuencia de San Pedro y subyace a la secuencia de volcanoclásticos. Sin embargo, en algunas ocasiones se pueden observar secuencias pelíticas y de metavolcánicos muy finos que por su estructura sedimentaria análoga hacen difícil distinguirla de la secuencia de J-PST.

En relación con su edad, con base en referencias bibliográficas (De la Teja-Segura *et al.*, 2000), la secuencia J-PST sería correlacionable con la Fm. Acapetlahuaya, a la cual le han asignado edades que varían desde el Tithoniano al Aptiano.

6.1.3.3 Secuencia Volcánica-Andesítica El Carmen (JK-VAEC)

La secuencia Volcánico-andesítica El Carmen (JK-VAEC) consiste en una serie de productos volcánicos de color verde que incluyen derrames con una estructura estratificada, brecha y pillow lavas asociados con secuencias piroclásticas estratificadas.

Los principales afloramientos se encuentran localizados en los arroyos El Carmen (región sur) y San Pedro (región centro-sur) (Figura 25a y b), aunque también los hay en el arroyo Santa María (Figura 25c), siendo ya reportados por Rivera-Ruiz (2016) y los observados en este trabajo en el arroyo San Lorenzo (Figura 25d). Sin embargo, también es

posible observar afloramientos dispersos en San Miguel El Alto, Sandía y en la base de la secuencia de la Mesa La Giganta.



Figura 25. Secuencia Volcánico-andesítica El Carmen (JK-VAEC): a) Andesitas (Arroyo San Pedro), b) Piroclastos (Arroyo San Pedro), c) Pillow-lavas (Arroyo Santa María) y d) Metatobas (Arroyo San Lorenzo).

En relación con las variaciones litológicas observadas en los arroyos El Carmen, San Pedro, Santa María, se describen una gran variedad de estructuras que van desde derrames masivos, brechas y aglomerados y pseudo-pillow con matriz carbonatada en arroyo El Carmen y pillow lavas en el arroyo Santa María. Los derrames están intercalados con

secuencias de metatobas (Figura 25d) bien estratificadas que en ocasiones muestran una estructura anastomosada.

En descripción de muestra de mano, las rocas relacionadas con los derrames son de color gris a verde o gris verdoso. Estas rocas muestran una textura afanítica con una matriz cristalina microlítica; la distribución del tamaño de los cristales es bimodal (anhedrales, subhedrales y euhedrales), compuesta por plagioclasas, piroxenos y minerales de alteración como la clorita y sulfuros. Los paquetes de tobas intercaladas con los derrames por lo general son de color amarillento a negro, aunque algunas son de color verde. Estos paquetes tobáceos se encuentran estratificadas, teniendo una variación de espesor en los estratos de 2, 10 y 15 cm y que a su vez se encuentra intercalados con granulometrias más gruesas de estas mismas tobas. En el arroyo Santa María se reconoció una unidad conglomerática con fragmentos de 2 cm de líticos con plagioclasas y pómez, teniendo una textura de tipo piroclástica de caída con fragmentos de plagioclasas rotas en una matriz de ceniza, con sulfuros diseminados en algunas zonas y alteración hidrotermal.

Las relaciones estratigráficas de esta secuencia JK-VAEC se pueden observar con base en las secciones geológicas Tlalpujahuá-Santa María (A-A') y Arroyo San Pedro (B-B') (Figuras 19 y 20), las cuales indican que sus contactos son transicionales entre los productos masivos y derrames con la secuencia piroclástica. No ha sido posible observar un contacto directo con otras unidades, ya que siempre han sido afectados por estructuras tectónicas. Sin embargo, dado que en las secuencias carbonatadas y de margas se han encontrado fragmentos de rocas volcánicas, se considera que la secuencia JK-VAEC infrayace a las unidades carbonatadas superiores. Esta secuencia se encuentra deformada y en algunos casos desarrolla foliación, lo cual sugiere que toda la secuencia ha sufrido el mismo proceso de deformación.

Los paquetes de la secuencia JK-VAEC, de derrames y depósitos piroclásticos suelen encontrarse basculados y por lo tanto yuxtapuestos, ya sea a la secuencia TJ-PTASP como a la J-PST, así como a las secuencias de los carbonatos. Esta relación tectónica relacionada a las fallas frágiles normales o laterales, es muy clara en la sección sur del arroyo San Pedro (Figura 20).

Hasta el momento no se cuenta con ninguna edad isotópica absoluta. Con base en la revisión bibliográfica de trabajos como de Silva y Salgado (1988) la edad propuesta sería del Jurásico Superior-Cretácico Inferior, debido a que ellos también describen rocas metavolcánicas determinando dicha edad a través de correlaciones estratigráficas con otros afloramientos de la región del sur de México. Así mismo, De la Teja-Segura *et al.*, (2000) señala que sería correlacionable con la Formación Villa de Ayala, a la cual asignan una edad del Huauteriviano (?)-Aptiano (Cretácico Inferior).

6.1.3.4 Secuencia Calcárea-Pelítica Dos Estrellas (K-CPDE)

Esta unidad consiste en una secuencia de calizas en estratos delgados, usualmente carbonosos intercalados con paquetes de lutitas y margas.

La secuencia K-CPDE se distribuye en la parte centro-sur de la zona de estudio, aunque se encuentra extendida en la parte noroeste. Su mayor distribución está en el centro de la zona de estudio con una exposición de aproximadamente 4 km, proponiendo la localidad tipo al arroyo Dos Estrellas (Figura 26a), ya descrita por Rivera-Ruiz (2016).

En relación con sus variaciones litológicas, la secuencia K-CPDE se observa que la secuencia K-CPDE consiste en una intercalación de lutitas carbonosas y margas. Cuenta con una mayor abundancia de los carbonatos, su color oscuro se debe a la presencia de materia orgánica. La estructura general consiste en estratos delgados y laminares de 2 a 4 cm, aunque se puede observar una intercalación rítmica de lutitas, calizas y limolitas (Figura 27a) de entre 40 y 50 cm. En muestra de mano las rocas carbonatadas varían de colores entre gris oscuro a negras, variando de textura entre mudstone a packstone. Las lutitas son de color ocre a amarillo claro variando de limolitas a lutitas, con lentes de radiolaritas y pedernal oscuro. Otra variación litológica de esta unidad menos común se refiere a aquella observada en el arroyo San Pedro, donde se intercala con una caliza oscura (Figura 26b) con piritita diseminada de origen vulcanogénico. Por último, la secuencia de lutitas que se encuentran en Santa María contiene abundantes segregaciones de cuarzo, relacionadas con el efecto de la deformación y metamorfismo con una foliación (Figura 26c).

Respecto a sus relaciones estratigráficas, como se observa en la sección Tlalpujahuá-Santa María (A-A') (Figura 19), los contactos entre la composición terrígena y calcárea tienden a ser transicionales y su espesor es variable. Por otro lado, en la sección Arroyo San Pedro (B-B') se puede observar cómo esta secuencia K-CPDE está en contacto tectónico con las areniscas que están, junto con la secuencia JT-PTASP, relacionadas con estructuras de deformación y foliación intensas, así como con estructuras anastomosadas. El tipo de plegamiento que presenta la secuencia es inclinado o recostado con fracturas o vetas rellenas de calcita.



Figura 26. Secuencia Calcárea-Pelítica Dos Estrellas (K-CPDE): a) Intercalación de lutitas, calizas y limolitas distribuida en el arroyo Dos Estrellas, b) Caliza oscura distribuida en el arroyo San Pedro y c) Lutitas distribuidas en el poblado de Santa María.

Con base en la revisión bibliográfica en trabajos previos, Silva y Salgado (1988) le asignaron de manera general una edad del Jurásico Superior-Cretácico Inferior. De la Teja-Segura *et al.* (2000) consideraron que sería correlacionable con antecedentes de la Formación Amatepec de la región de Guerrero en donde se le ha asignado una edad del Aptiano-Albiano. Recientemente, Rivera- Ruiz (2016) refiere el trabajo de González *et al.* (2006), en el cual se ha estudiado los contenidos de nannoplancton fósil, radiolarios y globigerínidos, asignando a esta secuencia pelítico-carbonatada un rango de edad del Titoniano-Aptiano (Jurásico Superior-Cretácico Inferior).

6.1.3.5 Secuencia Calizas masivas Remedios (K-CR)

Esta unidad se refiere a una secuencia de calizas en estratos medios e intercalados con margas y algunos horizontes de lutitas.

Se encuentra distribuida en una serie de exposiciones de pequeña dimensión a lo largo de toda el área, generalmente asociados a pequeñas cabalgaduras y bajo forma de *klippes*. La localidad tipo puede ser considerada en un banco de material del poblado de Remedios, sin embargo, en el arroyo San Pedro (Figura 27) tiene muy buena exposición.



Figura 27. Secuencia Calizas masivas Remedios (K-CR) distribuida en el arroyo San Pedro.

En relación con su estructura se observa calizas grises a ocre en estratos de espesor variable desde centímetros hasta de un par de metros, intercalados de manera variable con margas gris claro y lutitas con estructura laminar. En descripción de muestra de mano, las rocas varían de colores grises claros a oscuros, tipo *packstone* y rara vez *grainstone*. Además,

se encuentran vetillas de calcita y recristalización asociada a deformación de pliegues. La secuencia se presenta con un plegamiento de tipo isoclinal y una intensa foliación asociada a zonas de despegue o cabalgaduras.

Sus relaciones estratigráficas no son claras, ya que generalmente está en contacto tectónico y con evidencias de clara yuxtaposición anómala. Sin embargo, por las características litológicas, se sugiere que está en contacto transicional con la secuencia Dos Estrellas. En la sección geológica Arroyo San Pedro (B-B') (Figura 20) puede observarse un contacto de cabalgadura con la secuencia Psammitas-Turbiditas (Arcosas) San Pedro (TJ-PTASP), como también se mencionó en la descripción de esta misma sección. Del mismo modo, González *et al.*, (2006) le asignan un rango de edad del Titoniano-Aptiano (Jurásico Superior-Cretácico Inferior) debido al contenido fósil.

6.2 Petrografía y Geoquímica de la Secuencia Psammitas-Turbiditas (Arcosas) San Pedro (TJ-PTASP) y Areniscas Coloradillas

6.2.1 Introducción

Para este análisis petrográfico se estudiaron 36 láminas delgadas (Anexo 9 “Tabla petrográfica”), con el objetivo de describir con detalle las areniscas de la Secuencia Psammitas-Turbiditas (Arcosas) San Pedro (TJ-PTASP), así como las areniscas volcanoclásticas de Coloradillas-Barrio del Carmen, pertenecientes a unidades superiores volcánico-sedimentarias de la RT. También, se comparan sus características con otras unidades sedimentarias de la RT (ver los términos y metodología en el anexo 8 “Descripción petrográfica de areniscas”). La descripción se sigue el orden descriptivo de textura, composición mineralógica y de líticos, así como las variaciones entre los mismos componentes.

Por otro lado, en este apartado se incluye además la presentación de los resultados de los análisis geoquímicos obtenidos en este estudio, considerando que se relacionan de manera muy estrecha con las observaciones petrográficas y aunque poco numerosos, se consideran representativos. La selección de las muestras para análisis geoquímico (y para geocronología) se basó en el criterio estratigráfico y sucesivamente fue depurado durante la observación petrográfica para determinar el medio ambiente de depósito.

6.2.2 Secuencias psammiticas de la RT

En la Tabla 1 se presenta la síntesis petrográfica de la secuencia TJ-PTASP.

La descripción de los rasgos petrográficos se divide en a) la granulometría; b) textura; c) proporciones de los componentes y d) clasificación.

En relación con la granulometría, las muestras de areniscas varían en forma

Tabla 1. Síntesis petrográfica de la Secuencia Psammitas-Turbiditas (Arcosas) “San Pedro” (JT-PTASP) y de las Areniscas Coloradillas. Donde las abreviaturas como Q-F: relación cuarzo-feldespatos, Q: cuarzo, F: feldespatos, Plg: plagioclasas, FRt: Fragmentos de roca totales o líticos totales, Lv: líticos volcánicos, Lm: líticos metamórficos y Lgr: líticos graníticos. En la textura los números 1: grano fino a medio (0.06-0.4 mm), 2: grano medio a grueso (0.4 a 0.6 mm) y 3: grano fino a grueso (> 0.6 mm).

Muestra	Localidad	Textura	Q-F	Q	F	Plg	FRt	Lv	Lm	Lgr	Matriz	Madurez	Selección	Clasificación
Tlal61-Coloradillas	Camino a Coloradillas	1	35	20	5	10	35	35	0	0	30	Inmadura	Mala	Grauvaca lítica
RCT 04	Barrio El Carmen	1	88	40	35	13	0	0	0	0	12	Submadura	Excelente	Arcosa
RCT 11B	Arroyo San Pedro	1	50	15	5	30	40	40	0	0	10	Submadura	Mala	Litarenita
RCT 16	Arroyo San Pedro Sur	2	80	50	15	15	15	0	10	5	5	Submadura	Moderada	Arcosa
RCT 17	Arroyo San Pedro Sur	2	79	55	14	10	16	0	10	6	5	Submadura	Moderada	Arcosa
RCT 18	Arroyo San Pedro Sur	2	85	18	5	62	5	5	0	0	10	Submadura	Buena	Arenisca volcanoclástica
RCT 19	Arroyo Santa María	1	83	48	15	20	10	2	5	3	7	Submadura	Buena	Arcosa
RCT 20	Arroyo Santa María	2	82	45	13	24	11	0	5	6	7	Submadura	Buena	Arcosa
RCT 21	Arroyo Santa María	1	81	42	11	28	9	0	7	2	10	Submadura	Moderada	Arcosa
OL1	Camino a San Pedro	2	82	52	25	5	8	0	0	8	10	Submadura	Moderada	Arcosa
OL2	Arroyo San Pedro	1	42	20	10	12	48	48	0	0	10	Submadura	Buena	Litarenita
OL3	Arroyo San Pedro	1	83	53	20	10	7	1	2	4	10	Submadura	Moderada	Arcosa
OL4	Arroyo San Pedro	2	80	50	20	10	10	0	0	10	10	Submadura	Buena	Arcosa
OL5	Arroyo América	1	32	22	5	5	45	45	0	0	23	Inmadura	Mala	Grauvaca lítica
OL6	Arroyo San Lorenzo	3	78	53	18	7	12	2	2	8	10	Submadura	Moderada	Arcosa
OL7	Arroyo San Lorenzo	3	79	54	19	6	11	1	8	2	10	Submadura	Moderada	Arcosa
OL14	Arroyo San Pedro	3	81	56	15	10	14	0	8	6	5	Submadura	Moderada	Arcosa
OL15	Brecha entre Coloradillas y Campo de Gallo	1	45	22	8	15	17	17	0	0	38	Inmadura	Mala	Grauvaca feldespática
OL16	Crucero entre Coloradillas-Tlalpujahuá	1	62	42	6	14	18	18	0	0	20	Inmadura	Mala	Grauvaca feldespática
OL17	Arroyo Santa María	3	77	52	16	9	13	0	8	5	10	Submadura	Buena	Arcosa
OL18	Arroyo Santa María	3	76	50	19	7	14	0	7	7	10	Submadura	Moderada	Arcosa
OL19	Arroyo Santa María	3	70	10	10	50	20	20	0	0	10	Submadura	Buena	Arenisca volcanoclástica

heterogénea, en orden de abundancia desde grano fino a medio, de grano medio a grueso y en menor proporción de grano fino a grueso. Estas variaciones pueden ser bien observadas en las localidades de Camino a Coloradillas, Barrio El Carmen, Arroyo San Pedro, Arroyo Santa María, Arroyo América, Brecha entre Coloradillas y Campo de Gallo y Crucero entre Coloradillas-Tlalpujahuá (Fig. 18).

Respecto a las características texturales en la figura 28 se presentan las fotomicrografías de las muestras San Pedro y Coloradillas. Con base en la descripción petrográfica sintetizada en la Tabla 1, se puede observar que las areniscas de la secuencia TJ-PTASP presentan una textura predominantemente sub-madura (Figura 28a, San Pedro), debido a que no exceden de matriz y representan <15% de matriz y se diferencian de las areniscas de la localidad de Coloradillas, las cuales muestran una textura inmadura, debido a que exceden de matriz >15% matriz (Figura coloradillas 28b).

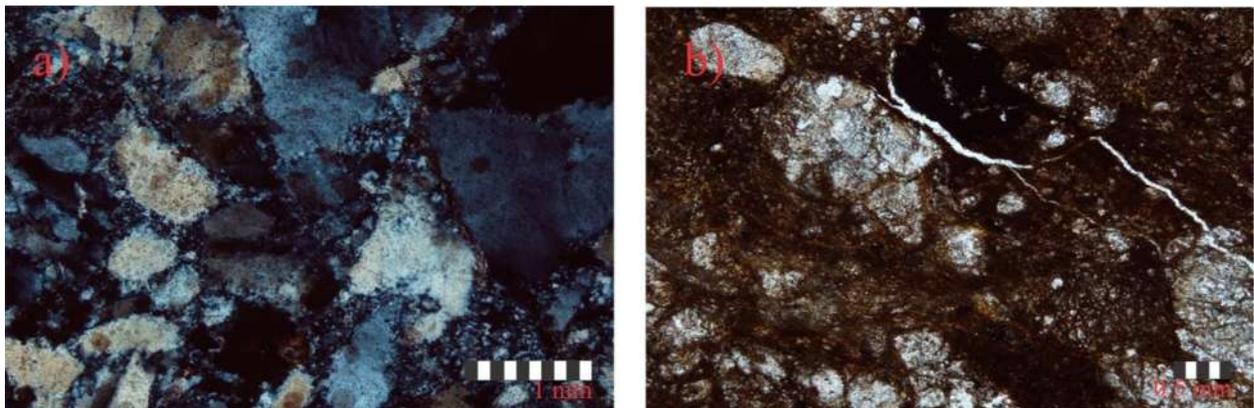


Figura 28. Fotomicrografías de la secuencia “TJ-PTASP”: a) Muestra de San Pedro en el cual se presenta una textura submadura y b) Muestra de Coloradillas en el cual se presenta una textura inmadura.

Las areniscas de la secuencia TJ-PTASP tienden a mostrar una textura tipo matriz-sostenida, donde la proporción de sus clastos varía entre 60% y 90% de clastos y del 10% al 40% de matriz. Sin embargo, hay pocas muestras que presentan matriz escasa, por lo que se consideran con textura tipo grano-sostenida (95% de clastos y 5% de matriz).

Las areniscas de la secuencia TJ-PTASP tienen una clasificación *buen*a y *moderada*, pocas muestras son las que tienen una mala clasificación; los clastos son subredondeados,

aunque en menor proporción también hay clastos con formas angulosas y redondeadas.

En relación con las características texturales de los componentes (Figura 29), se observa que los cuarzos son monocristalinos y policristalinos, algunos se encuentran fracturados, con extinción ondulante y no ondulante, presentan formas anhedrales o irregulares, tienen un tamaño aproximado de 0.06 mm a 0.25 mm, presentes en la proporción de 10% al 56%.

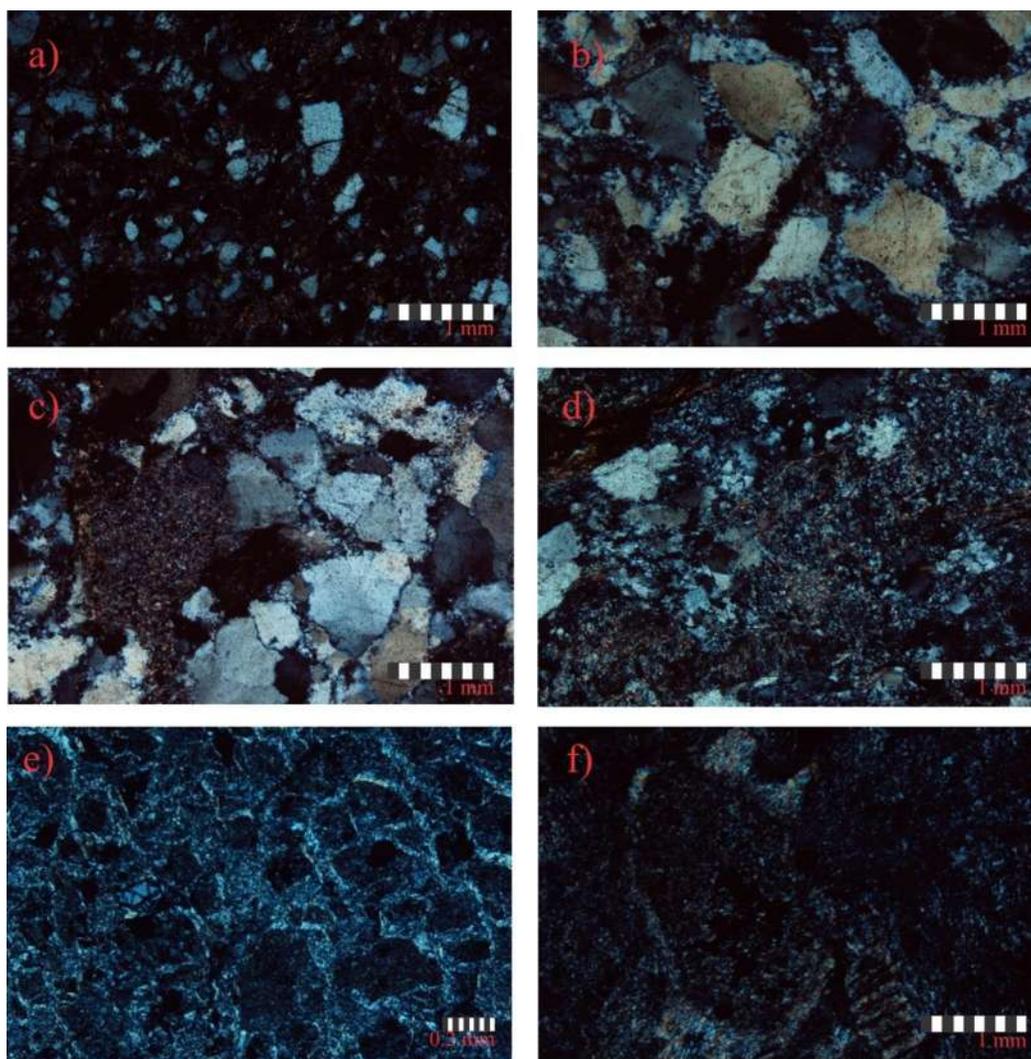


Figura 29. Fotomicrografías de la secuencia TJ-PTASP: a) y b) se observa gran abundancia de cuarzo y feldespato, c) y d), se observan fragmentos líticos metamórficos y fragmentos líticos graníticos, e) y f) se observan fragmentos líticos volcánicos.

Los feldespatos y las plagioclasas presentan formas subhedralas y con una extinción oblicua. Las plagioclasas que se presentan tienen un maclado de tipo polisintético, la proporción de los feldespatos es del 5% al 35%, con un tamaño de 0.06 mm- 0.35 mm y las plagioclasas del 5% al 62% con un tamaño por lo general de 0.08 mm a 0.48 mm, incluso hasta de 0.07 mm.

Respecto a los fragmentos de roca, los líticos metamórficos muestran una textura bandeada con los minerales orientados, variando su presencia del 1% al 10%. Los líticos graníticos presentan una textura fanerítica los cuales varían del 1% al 10% y los líticos volcánicos que tienen una textura afanítica varían del 1% al 48%. Los líticos tienen un tamaño que varía de 0.1 mm a 0.7 mm, o incluso hasta 1 mm.

A continuación, se presenta la proyección en diagramas binarios y ternarios de los datos estimados en petrografía (Tabla 1). Es importante hacer notar que los datos fueron agrupados en relación con los dos tipos de areniscas identificados en campo y petrografía: i) Las areniscas de la Secuencia TJ-PTASP, separadas en dos localidades, Arroyo San Pedro y Arroyos San Lorenzo-Santa María; ii) Areniscas Coloradillas, en donde se incluyen las localidades de Barrio del Carmen, Arroyo América y Coloradillas.

En los siguientes cuatro diagramas binarios (Figura 30) se graficaron los componentes de cuarzo, fragmentos de roca totales, fragmentos líticos volcánicos, fragmentos líticos cristalinos (fragmentos líticos metamórficos y fragmentos líticos graníticos) y la textura con el fin de observar cómo son las variaciones entre estos componentes graficados.

En el primer diagrama binario (Figura 30a) se muestra la relación entre la abundancia del cuarzo y la textura. Se observa que el grupo de muestras de la Secuencia TJ-PTASP tiene variedad textural y, a excepción de dos muestras, está enriquecida en cuarzo. Por su parte, el grupo de muestras de las Areniscas Coloradillas (incluyendo el Arroyo América y Barrio El Carmen) está tiene menor cantidad de cuarzo, a excepción de dos muestras que muestran un contenido un poco más alto o moderado. Ambas secuencias de areniscas (TJ-PTASP y Coloradillas) muestran variación textural de 0.06 a > 0.6 mm.

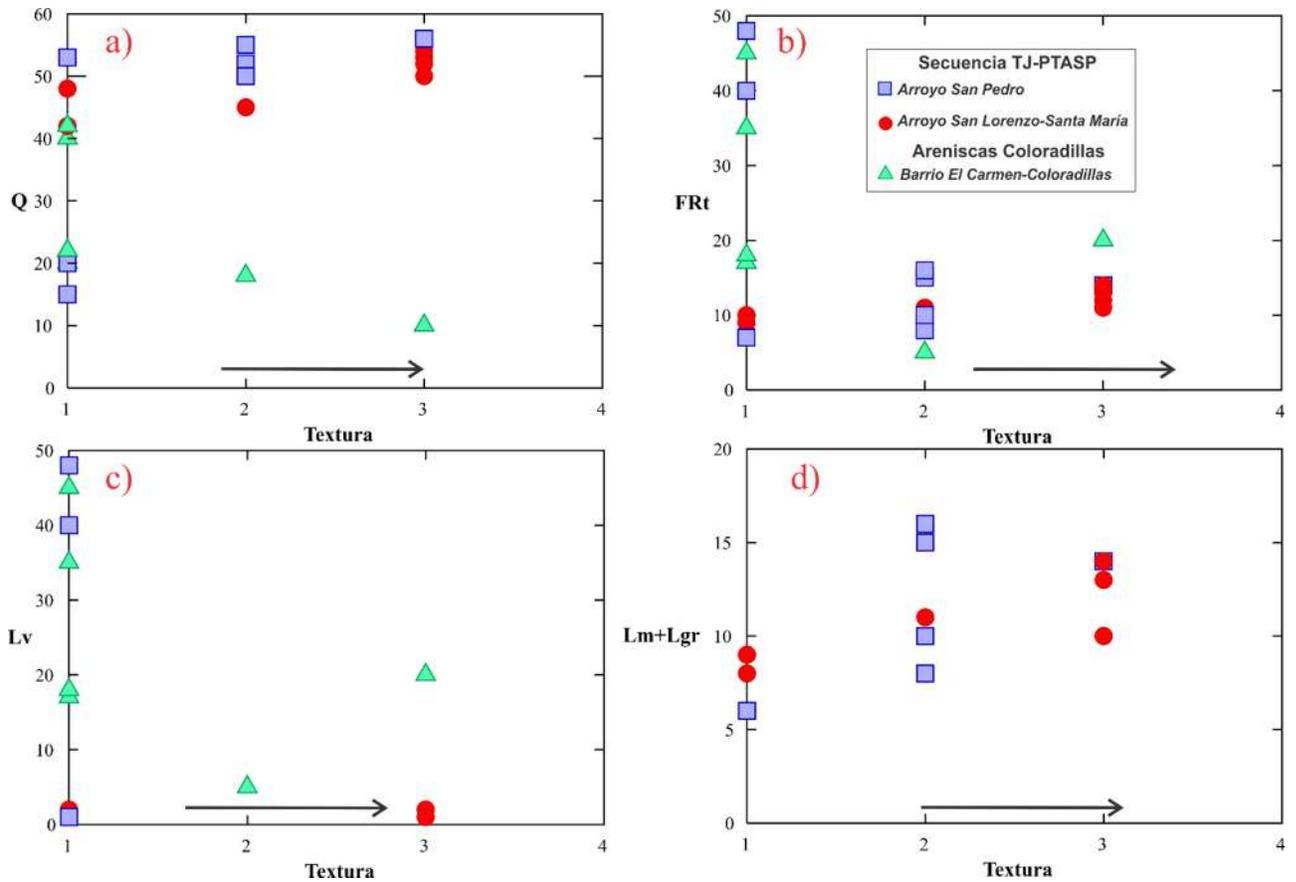


Figura 30. Diagramas binarios para la Secuencia TJ-PTASP (cuadros y círculos) y Areniscas Coloradillas (triángulos): a) Diagrama tamaño de grano (textura) vs. Cuarzo, b) Diagrama binario de tamaño de grano (textura) vs. Fragmentos rocosos totales, c) Diagrama binario de tamaño de grano (textura) vs. Fragmentos líticos volcánicos y d) Diagrama binario de tamaño de grano (textura) vs. Fragmentos líticos cristalinos (metamórficos-graníticos). Donde los números 1, 2, 3 y 4 representan los tipos de textura (ver cada tipo en la Tabla 1) y flecha indica hacia dónde crece el tamaño de grano.

En el segundo diagrama binario (Figura 30b) donde se muestra la relación entre los fragmentos rocosos totales y la textura, puede observarse una cierta dispersión en los dos tipos de areniscas (Secuencia TJ-PTASP y Areniscas Coloradillas) debido a que presentan variaciones en los contenidos de fragmentos de roca total en cada tipo de textura. También, se puede notar que las muestras de las Areniscas Coloradillas tienen de bajos a altos contenidos de fragmentos de roca total, sin embargo, en las muestras de la secuencia TJ-PTASP, se tiene menor contenido de FRT; sólo algunas presentan altos contenidos.

En el tercer diagrama binario (Figura 30c) donde se muestra la relación entre los fragmentos líticos volcánicos y la textura, se puede notar que la mayoría de las muestras de las Areniscas Coloradillas se encuentran graficadas en este diagrama debido a que en ellas

predominan los fragmentos líticos volcánicos, observándose de pequeñas a grandes cantidades, a diferencia de las muestras de areniscas de la Secuencia TJ-PTASP, las cuales son pocas las graficadas en este diagrama, debido a que la mayoría no contiene fragmentos líticos volcánicos, las pocas muestras que se encuentran graficadas, tienen de bajos a altos contenidos, respectivamente.

Por último, en el cuarto diagrama binario (Figura 30d) donde se muestra la relación entre los fragmentos cristalinos totales (metamórficos-graníticos) y la textura, se puede notar que las muestras de areniscas que no se graficaron son las que pertenecen a las Areniscas Coloradillas debido a que tienen una ausencia de fragmentos líticos cristalinos, en este diagrama solo se encuentran graficadas las muestras de areniscas de la Secuencia TJ-PTASP mostrando variación de contenido en cada tipo de textura.

En la Figura 31 se muestran dos diagramas ternarios Q-F-L y Q-Lv-Lm+Lgr de acuerdo con Bathia (1981). En el diagrama ternario de la Figura 31a se muestra la relación entre los componentes de cuarzo, feldespatos y líticos, donde se graficaron las muestras de la Secuencia TJ-PTASP y las Areniscas Coloradillas (incluyendo el Arroyo América y Barrio El Carmen). Las muestras de la Secuencia TJ-PTASP muestran que la mayoría están enriquecidas en cuarzo, indicando una posible procedencia de erosión continental, y sólo algunas se encuentran enriquecidas en líticos y empobrecidas en cuarzo. En las Areniscas Coloradillas el contenido de cuarzo y líticos es más variado, así como mayor el contenido de feldespatos.

En el diagrama ternario de la Figura 31b, donde se muestra la relación entre los componentes de cuarzo, fragmentos líticos volcánicos y fragmentos líticos cristalinos (metamórficos-graníticos), se observa que las muestras de la Secuencia TJ-PTASP y Areniscas Coloradillas (incluyendo Arroyo y Barrio El Carmen) se mantienen con una agrupación y tendencia en forma clara. Se puede notar que las muestras de la Secuencia TJ-PTASP muestran una relativa abundancia de fragmentos líticos cristalinos (líticos metamórficos (Lm) y graníticos (Lgr)), sugiriendo que puedan ser producto de erosión del basamento continental y muy pocos de origen volcánico. Las muestras de las Areniscas Coloradillas, sin embargo, muestran una relativa ausencia de líticos cristalinos, pero por el contrario predominan los líticos de origen volcánico.

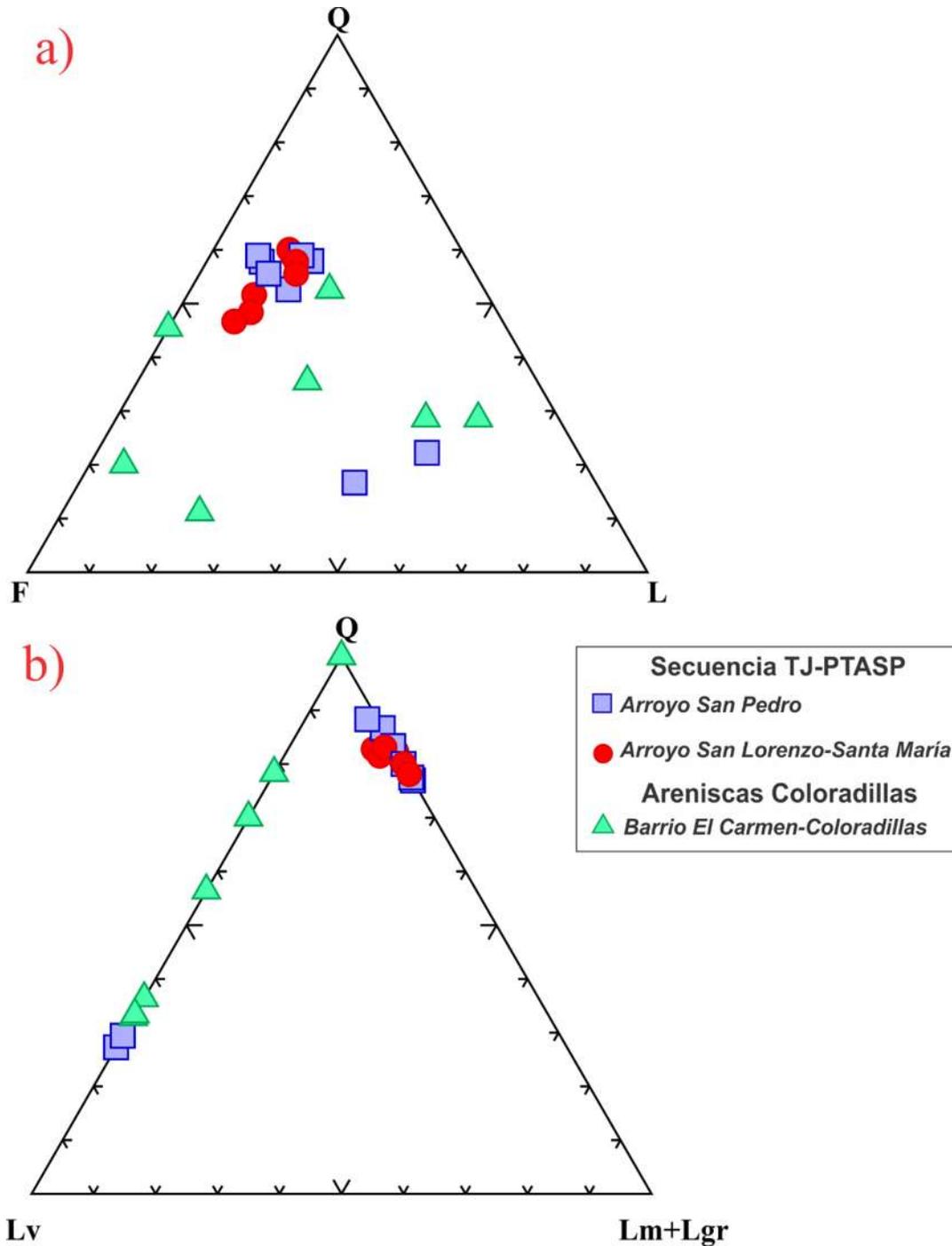


Figura 31. Diagramas ternarios para la Secuencia TJ-PTASP (cuadros y círculos) y Areniscas Coloradillas (triángulos) basados en Bathia, 1981: a) Q-F-L y b) Q-Lv-Lm+Lgr.

En el diagrama ternario de la Figura 32 propuesto por Pettijhon *et al.*, (1987), se proyectan los porcentajes de cuarzo, feldespatos y fragmentos de roca total que se muestran en la Tabla 1. Las rocas de la Secuencia TJ-PTASP colectadas en el Arroyo San Pedro,

Arroyo Santa María, Camino a San Pedro y Arroyo San Lorenzo, se proyectan principalmente en el campo de las arcosas y solo un par de muestras en el campo de las litarenitas.

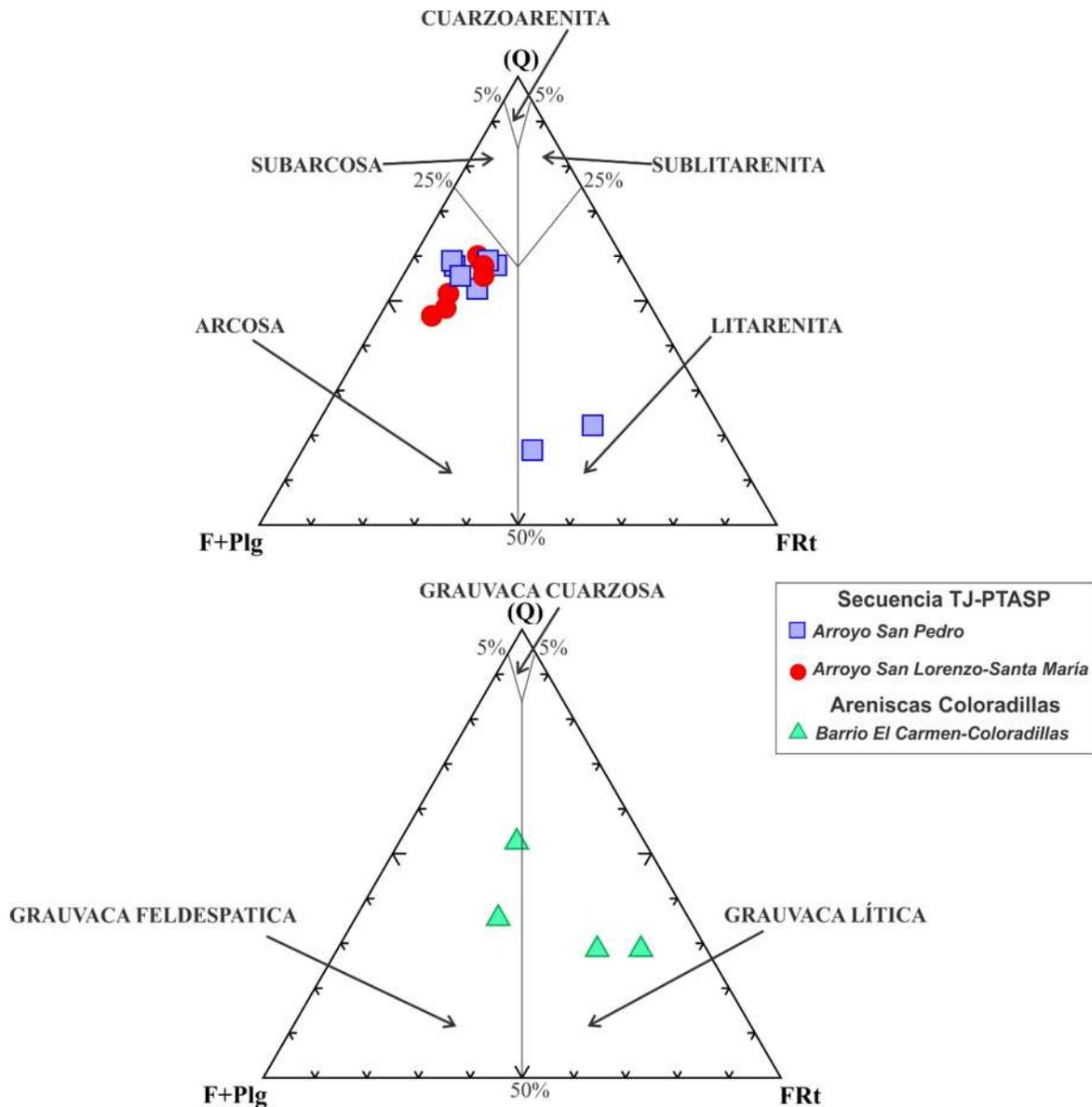


Figura 32. Diagrama ternario de clasificación de areniscas para la Secuencia TJ-PTASP (cuadros y círculos) y Areniscas Coloradillas (triángulos) (modificado de Pettijohn *et al.*, 1987).

Por su parte el grupo de muestras de las Areniscas Coloradillas colectadas en Camino a Coloradillas, Arroyo América y Brecha entre Coloradillas se clasifican de manera

predominante como grauvacas (grauvaca feldespática y lítica) y en menor proporción como sub-arcosas. Este resultado es consistente, con las observaciones petrográficas donde se observa que exceden del 15% de matriz arcillosa.

6.2.3 Geoquímica

En la tabla 2 se presentan los resultados geoquímicos de elementos mayores obtenidos por FRX y en la tabla 3 se presentan los resultados de elementos menores o traza obtenidos por el mismo método. Se presentan tres muestras de las areniscas de la Secuencia TJ-PTASP y dos muestras de las Areniscas Coloradillas, así como con fines comparativos se presentan dos muestras de origen volcánico, una muestra de un dique (RCT 12) perteneciente a la localidad del Arroyo San Pedro y un derrame de tipo pillow lava colectada en el Arroyo Santa María (OL-20).

Tabla 2. Concentración de elementos mayores (wt%) de la Secuencia TJ-PTASP y Areniscas Coloradillas, de un dique y una pillow lava.

Muestra	Localidad	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	PXC
RCT 04	Barrio El Carmen	72.71	0.31	14.20	3.58	0.01	2.24	0.35	0.52	1.71	0.07	4.28
RCT 12	Arroyo San Pedro	47.07	1.52	18.47	8.54	0.08	10.23	2.43	0.00	3.50	0.20	7.97
RCT 17	Arroyo San Pedro Sur	89.38	0.33	24.88	1.91	0.04	0.40	0.34	0.00	0.81	0.05	1.87
OL6	Arroyo San Lorenzo	82.45	0.71	10.53	0.85	0.00	0.26	0.02	0.00	3.20	0.01	1.97
OL14	Arroyo San Pedro	89.77	0.38	4.85	1.45	0.02	0.36	0.33	0.61	0.69	0.05	1.50
OL16	Crucero entre Coloradillas-Tlalpujahuá	59.99	0.48	21.99	3.91	0.05	1.02	2.70	4.68	1.32	0.14	3.74
OL20	Arroyo Santa María	49.73	0.95	16.78	7.49	0.10	7.52	8.54	2.75	1.21	0.13	4.82

Tabla 3. Concentración de elementos traza de la Secuencia TJ-PTASP y Areniscas Coloradillas, de un dique (RCT12) y una pillow lava (OL20).

Muestra	Localidad	Rb	Sr	Ba	Y	Zr	Nb	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Th	Pb
RCT 04	Barrio El Carmen	57.00	176.00	1069.00	16.00	148.00	8.00	54.00	59.00	8.00	37.00	22.00	97.00	6.00	9.00
RCT 12	Arroyo San Pedro	80.00	42.00	827.00	26.00	154.00	10.00	253.00	405.00	32.00	139.00	53.00	197.00	5.00	2.00
RCT 17	Arroyo San Pedro Sur	32.00	17.00	172.00	8.00	140.00	6.00	32.00	144.00	5.00	20.00	7.00	9.00	3.00	7.00
OL6	Arroyo San Lorenzo	75.00	7.00	492.00	25.00	448.00	12.00	76.00	94.00	2.00	43.00	5.00	2.00	10.00	4.00
OL14	Arroyo San Pedro	26.00	20.00	157.00	8.00	140.00	6.00	28.00	270.00	5.00	18.00	8.00	3.00	4.00	7.00
OL16	Crucero entre Coloradillas-Tlalpujahuá	50.00	239.00	362.00	28.00	181.00	7.00	46.00	26.00	6.00	10.00	25.00	83.00	5.00	6.00
OL20	Arroyo Santa María	15.00	290.00	313.00	15.00	95.00	6.00	153.00	272.00	35.00	89.00	70.00	68.00	5.00	4.00

En relación con los elementos mayores de las areniscas se puede observar que todas las muestras tienen altas concentraciones de SiO_2 , sobre todo el grupo TJ-PTASP, con concentraciones entre 78 y 79 wt. %. En la figura 33, se presentan los diagramas de variación tipo Harker de las areniscas de la Secuencia TJ-PTASP y Coloradillas, los cuales nos sirven para comparar las concentraciones de SiO_2 con el resto de los elementos. En general se observa que ambos grupos de areniscas muestran consistencia con sus características descritas en campo y petrografía.

En estos diagramas se observa que las muestras de todos los grupos de areniscas tienen alto contenido de sílice, indicando una madurez mineralógica que es caracterizada por enriquecimiento de cuarzo y un empobrecimiento de grano detríticos inestables como los feldespatos y fragmentos de roca volcánicos. Los altos contenidos de K_2O indican un incremento de feldespatos y contenido de micas y los bajos contenidos indican que los feldespatos altamente maduros son agotados (Bathia, 1983).

Por otro lado, en las muestras de areniscas que pertenecen a las Areniscas Coloradillas se nota un incremento en elementos mayores como el Al_2O_3 , TiO_2 , Fe_2O_3 y K_2O en ambas muestras, pero un decremento en elementos mayores como el MgO , CaO y Na_2O en una muestra y un incremento en la otra muestra. Por su parte, en dos muestras de areniscas de la Secuencia TJ-PTASP se observa un decremento en sus elementos mayores (CaO , MgO , Na_2O , K_2O , Fe_2O_3 y TiO_2), a excepción del Al_2O_3 . Por último, para la tercera muestra de arenisca de la Secuencia TJ-PTASP, en los elementos mayores Al_2O_3 , CaO , Fe_2O_3 , MgO y Na_2O se nota un decremento, mientras que para los elementos mayores como el TiO_2 y K_2O se puede notar un incremento. La variación de estos elementos está en función del contenido de sílice, sea este moderado (50-70%) o alto (60-80%), ya que es proporcional a la presencia de cuarzo y feldespatos. Si el contenido de K_2O excede al contenido de Na_2O , se asocia a la presencia predominante de feldespatos potásicos respecto a las plagioclasas. Este contenido de K y Na también varía dependiendo de la presencia de la matriz y de arcillas (Pothero y Schwab, 2004).

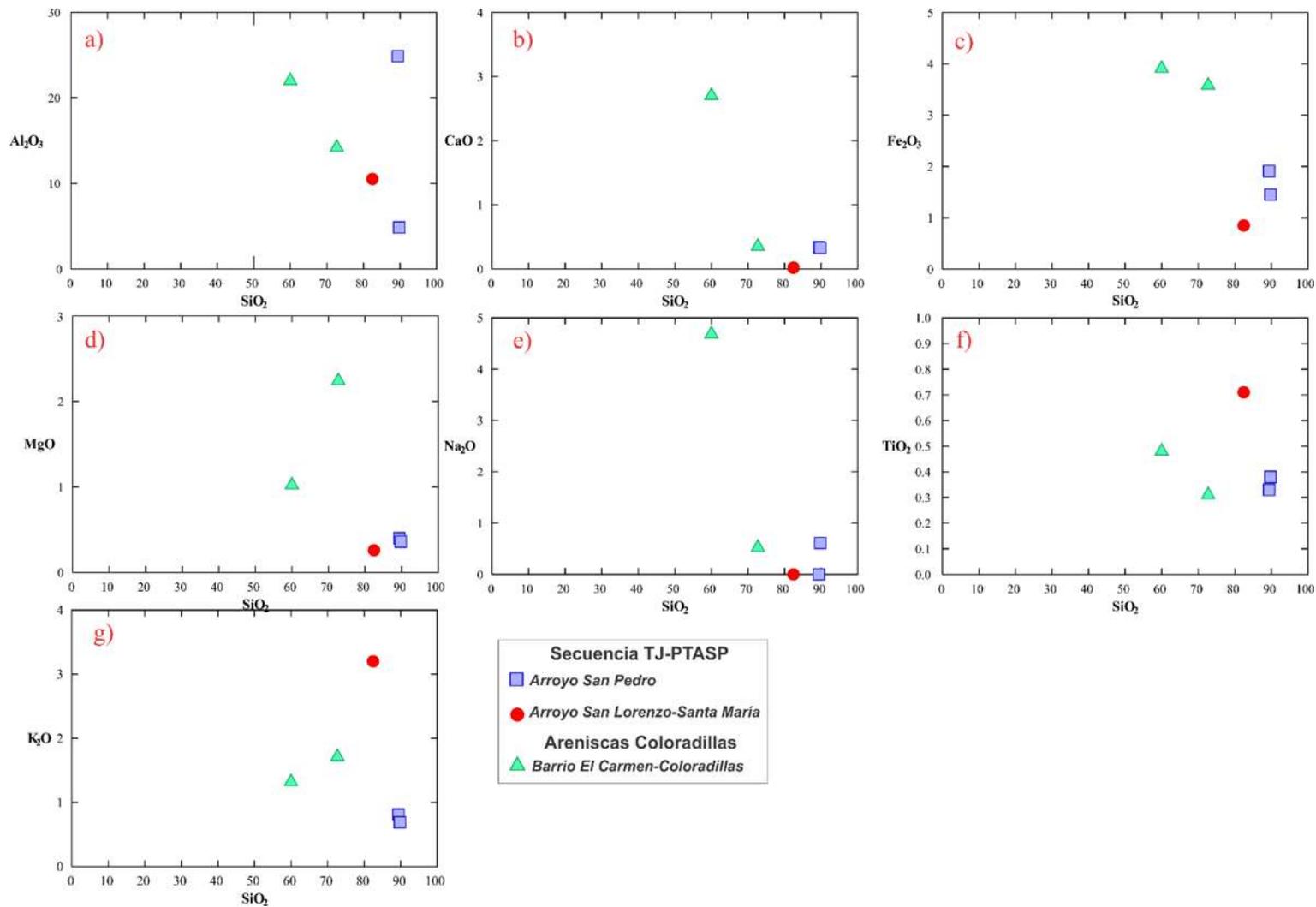


Figura 33. Diagramas de variación tipo Harker de los elementos mayores para las muestras de areniscas de la Secuencia TJ-PTASP (cuadros y círculos) y Areniscas Coloradillas (triángulos): a) SiO₂ vs Al₂O₃, b) SiO₂ vs CaO, c) SiO₂ vs Fe₂O₃, d) SiO₂ vs MgO, e) SiO₂ vs TiO₂, f) SiO₂ vs Na₂O y g) SiO₂ vs K₂O.

En los diagramas binarios de la Figura 34 se proyecta el comportamiento del elemento mayor SiO_2 en relación con los contenidos de los fragmentos de roca total (FRt), el cuarzo (Q), así como la textura en cada uno de los tipos de areniscas graficadas (Secuencia TJ-PTASP y Areniscas Coloradillas). En las muestras de la Secuencia TJ-PTASP se nota que prevalece la relativa abundancia de los FRt (Figura 34a) y un enriquecimiento de cuarzo (Figura 34b), mostrando una variación en su textura (Figura 34c). En las muestras de las Areniscas Coloradillas, una muestra tiene escasez de FRt y la otra está más enriquecida (Figura 34a); ambas muestras tienen contenidos moderados de cuarzo (Figura 34b) y el mismo tipo de textura (Figura 34c).

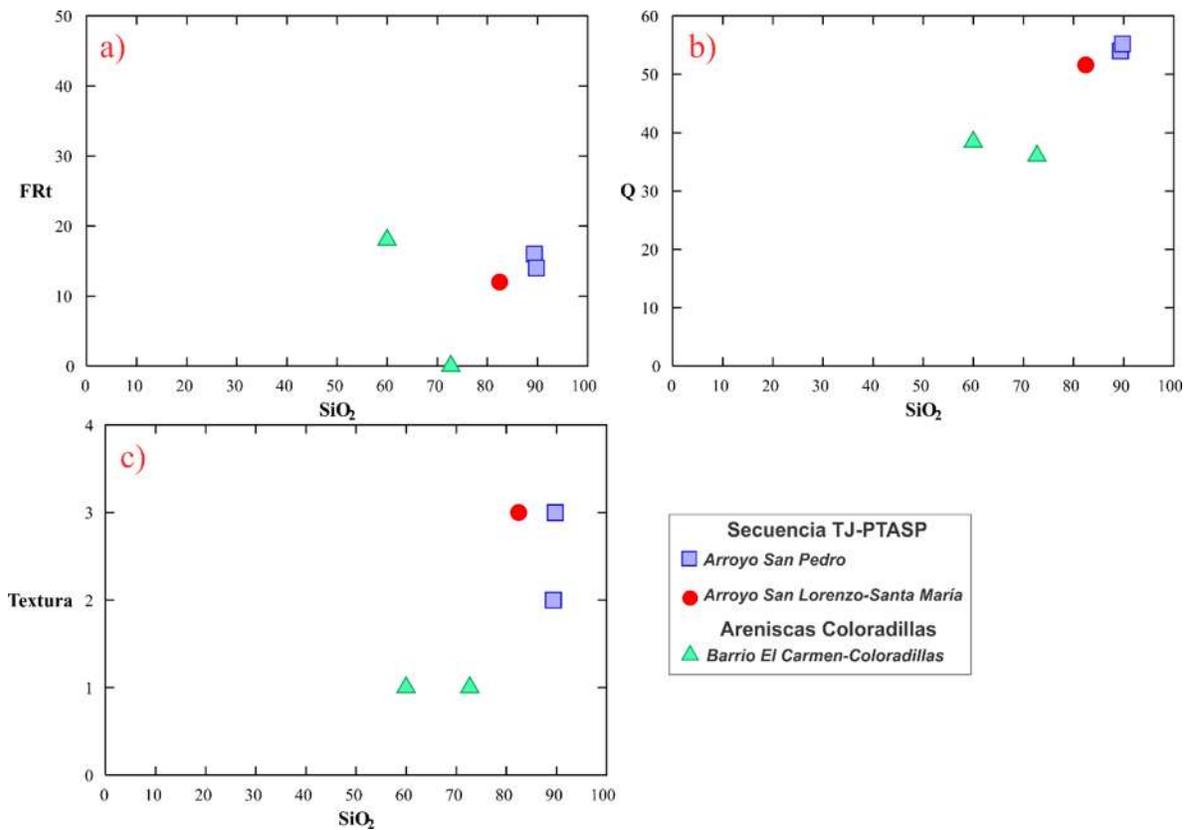


Figura 34. Diagramas binarios de las muestras de areniscas de la Secuencia TJ-PTASP (cuadros y círculos) y Areniscas Coloradillas (triángulos): a) Frt vs SiO_2 , b) Q vs SiO_2 y c) Textura vs SiO_2 .

En el diagrama ternario $\text{CaO-Na}_2\text{O-K}_2\text{O}$ de la Figura 35, se proyectan los elementos álcalis con la finalidad de identificar la roca fuente de los sedimentos. Se observa que una muestra perteneciente a las Areniscas Coloradillas tiene un aumento en la concentración de

Na₂O y CaO, por lo que se agrupa en el campo de andesita. Dos muestras pertenecientes a la Secuencia TJ-PTASP muestran bajas concentraciones de Na₂O y CaO proyectando en el campo de granito, pero a excepción de una muestra de la Secuencia TJ-PTASP se encuentra de manera dispersa en los campos marcados.

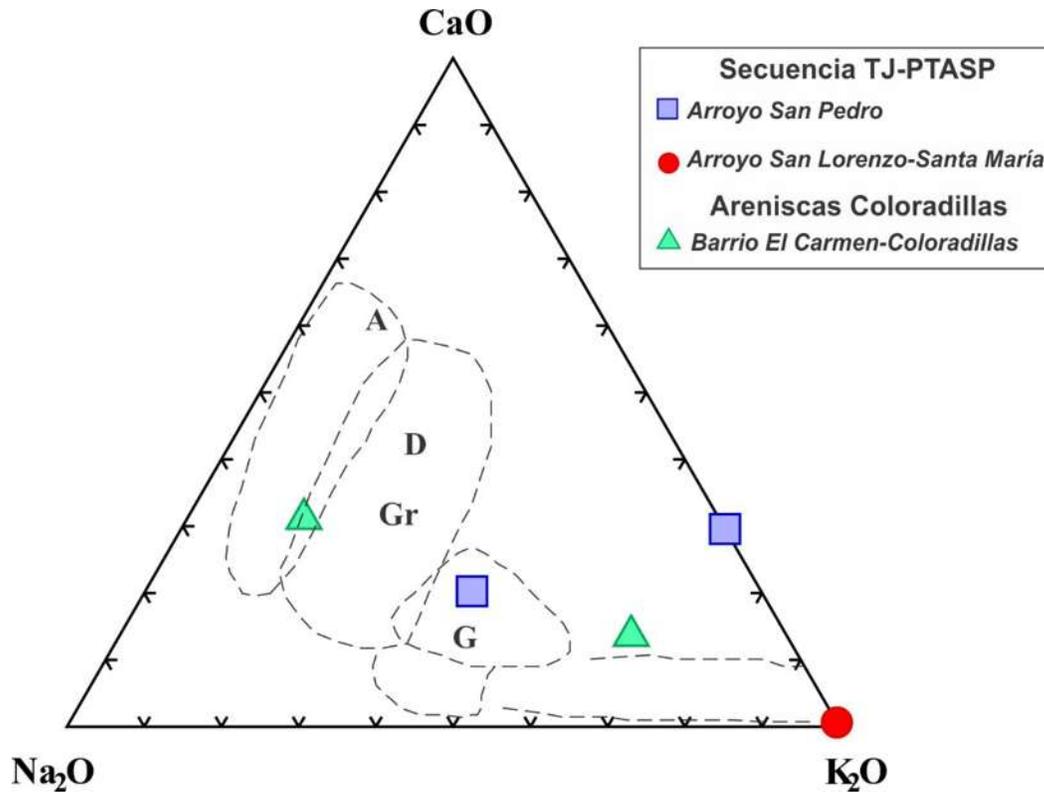


Figura 35. Diagrama ternario CaO-NaO-K₂O (Bathia, 1983) de las muestras de areniscas de la Secuencia TJ-PTASP (cuadros y círculos) y Areniscas Coloradillas (triángulos). Donde se encuentran los campos de andesita (A), dacita (D), granodiorita (Gr) y granito (G).

El diagrama binario Th-Zr (Figura 36), se propone identificar las relaciones de los elementos del grupo de los lantánidos relacionados con los minerales pesados; de modo que, cuando están enriquecidos en micas y minerales pesados como el zircón, turmalina y el rutilo, indica que puede ser un detrito granítico o reciclado (Bathia y Crook, 1986). En este diagrama se observa que una muestra que pertenece a la Secuencia TJ-PTASP se encuentra enriquecida en Zr y Th, mientras que se nota una relativa agrupación de muestras pertenecientes a la Secuencia TJ-PTASP y Areniscas Coloradillas, las cuales tienen menores concentraciones de Zr y Th. Esto significa que la fuente de un cuerpo granítico posiblemente habría estado

presente en ambos grupos de areniscas y con mayor probabilidad en el grupo de las arcosas de la Secuencia TJ-PTASP.

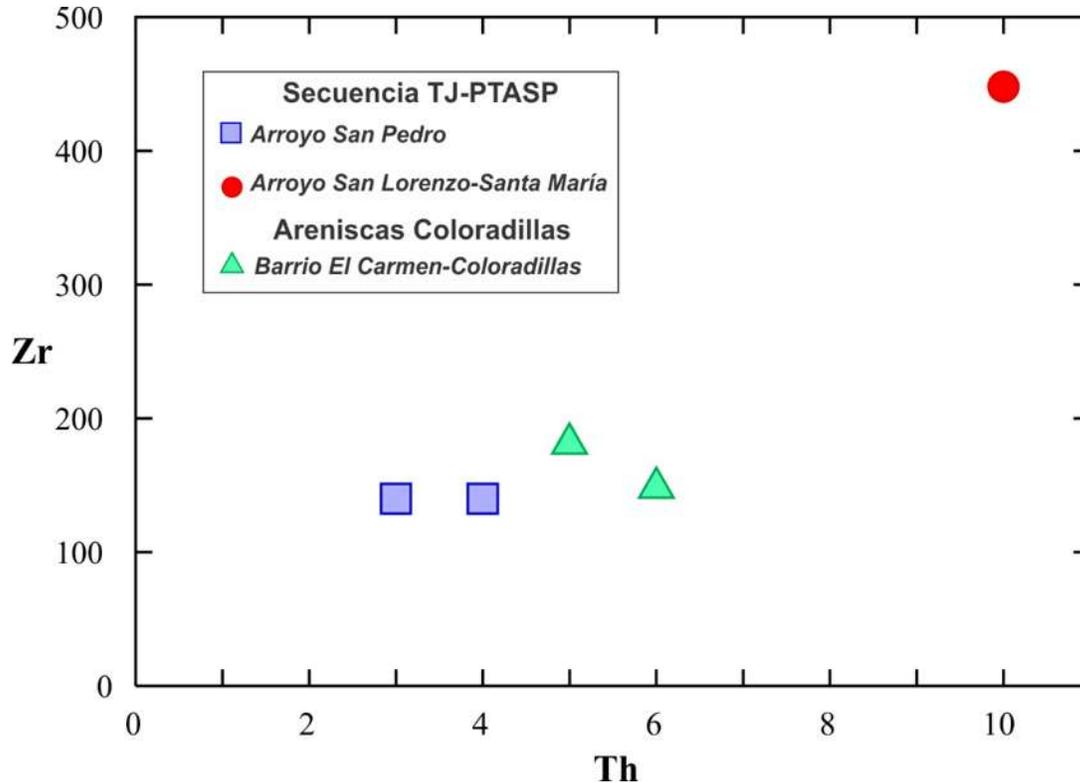


Figura 36. Diagrama binario Th-Zr (Bathia y Crook, 1986) de las muestras de areniscas de la Secuencia TJ-PTASP (cuadros y círculos) y Areniscas Coloradillas (triángulos).

En la Figura 37, se presenta un diagrama tipo multielemental (*spider*) normalizado con manto primordial (Sun y MacDonough, 1989). Los elementos traza que se encuentran graficados en este diagrama, Y, Th, Zr, Nb, Ti, Sr, K, Rb, Pb y Ba, son elementos que se han revelado útiles para determinar la procedencia y ambientes tectónicos debido a su baja movilidad en los procesos sedimentarios y a su bajo tiempo de residencia en el mar. Algunos elementos indican un relativo decremento de feldespatos y clastos volcánicos, así como una asociación con el componente cuarzoso, enriquecimiento de micas, minerales pesados como zircón, turmalina y rutilo, así como en feldespatos K (Bathia y Crook, 1986).

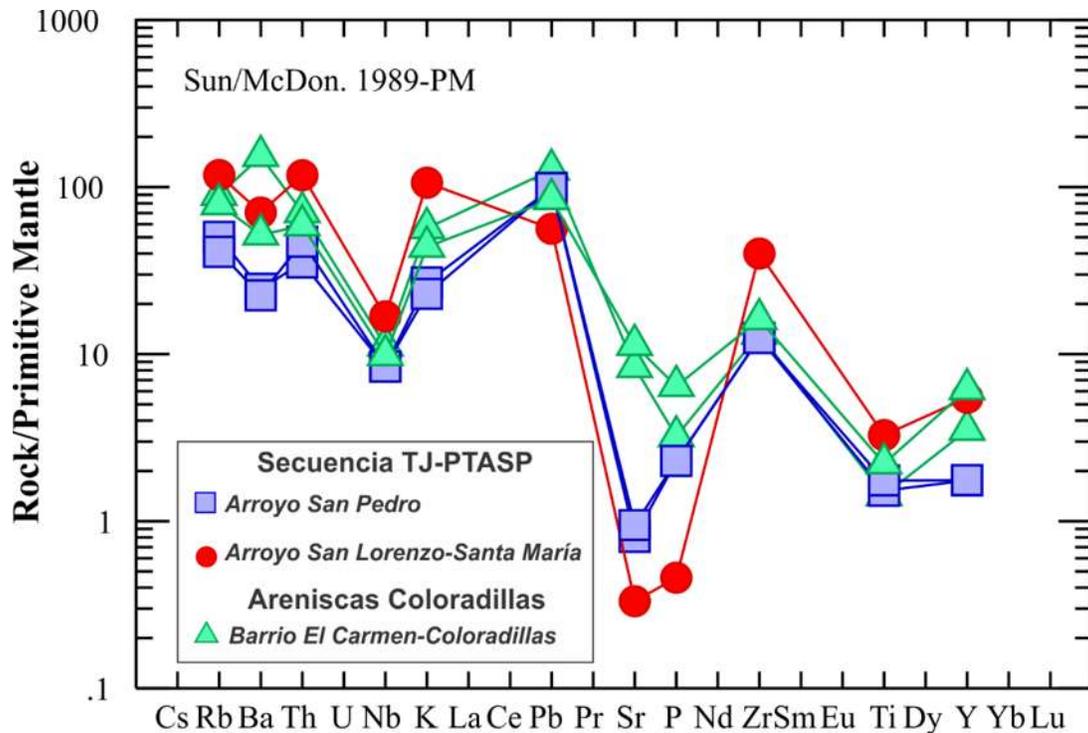


Figura 37. Diagrama tipo *Spider* normalizado con manto primordial de las muestras de areniscas de la Secuencia TJ-PTASP (cuadros y círculos) y Areniscas Coloradillas (triángulos) (basado en Bathia y Crook, 1986; McLennan y Taylor 1991).

En esta Figura 37, se pueden observar anomalías tanto positivas o enriquecimiento en relación con el manto (arriba de 10) como negativas (debajo del 1 o 10) en ambos grupos TJ-PTASP y Coloradillas, lo cual es interpretado como un enriquecimiento o empobrecimiento relativo de sus concentraciones. En una muestra que pertenece a la Secuencia TJ-PTASP se muestra que los elementos en traza como el Rb, Ba, Th, Nb, K, Pb y Zr muestran anomalías positivas mientras que Sr, P, Ti e Y muestran anomalías negativas. Para las muestras que pertenecen a las Areniscas Coloradillas, los elementos traza que muestran anomalías positivas son el Rb, Ba, Th, Nb, K, Pb, Sr y Zr mientras que los que muestran anomalías negativas son el Sr nuevamente, P, Ti e Y. Por último, las otras dos muestras pertenecientes a la Secuencia TJ-PTASP en los elementos traza como Rb, Ba, Th, K, Pb y Zr muestran anomalías positivas mientras que los que muestran anomalías negativas son Nb, Sr, P, Ti e Y.

Si comparamos las anomalías de los elementos traza mencionados en la Secuencia TJ-PTASP y Areniscas Coloradillas son similares en sus anomalías positivas, con una diferencia

en el Sr y Nb, aunque en ambos grupos los elementos P, Ti e Y, tienen las mismas anomalías negativas. Las anomalías positivas de K, Rb, Th, Nb, Pb, y Zr se encuentran asociadas con el enriquecimiento en sílice, micas y minerales pesados (zircón, turmalina y rutilo), los cuales pueden ser procedentes detríticos de rocas de tipo granítico o un basamento reciclado. Las anomalías positivas de K, Ba y Rb por su parte nos indican una relación con importantes concentraciones en feldespato potásico. Finalmente, las anomalías negativas de P, Ti e Y nos indica un relativo empobrecimiento en fósforo y minerales pesados; (Bathia y Crook, 1986).

6.3 Geocronología e isotopía de U-Pb en zircones detríticos

6.3.1 Introducción

En este apartado se hará una breve introducción sobre el método Uranio-Plomo en zircones detríticos ya que en el anexo 6 del marco teórico se habla con más detalle sobre esto. El método de Uranio-Plomo (U-Pb) es una herramienta muy utilizada en la geocronología de zircones detríticos en las últimas dos décadas debido a avances técnicos. Estos nos ayudan a determinar edades precisas revelando información valiosa acerca de una gama de procesos (Suárez *et al.*, 1993; Gehrels, 2014).

Por su parte, los zircones detríticos son componentes menores en las rocas sedimentarias clásticas o detríticas, los cuales son clave para interpretar la procedencia de sedimentos y la evolución de la corteza debido a que tienen una gran resistencia fisicoquímica y a las altas concentraciones de ciertos elementos traza (Cawood *et al.*, 2012). La geocronología de zircones detríticos permite determinar edades máximas de depósito, las cuales, asociadas con estudios de estratigrafía, sedimentología y en particular procedencia de sedimentos contribuyen a la caracterización del origen de los terrenos (Gehrels, 2014).

A continuación, se describen los zircones que fueron separados, concentrados y sucesivamente analizados para su fechamiento de las muestras (OL6-SL y OL14-SP). Estas muestras corresponden a la selección de areniscas pertenecientes a la secuencia Psammitas-Turbiditas (Arcosas) San Pedro (TJ-PTASP). Inicialmente se describe la diversidad morfológica y textural para sucesivamente presentar los resultados isotópicos y geocronológicos.

6.3.2 Caracterización y diversidad de zircones

En las muestras OL6-SL y OL14-SP, la morfología de los zircones es variada ya que algunos se encuentran en formas desgastadas, elípticas e incluso redondeados, relacionado con su afinidad clástica y en específico al transporte sedimentario (Figura 38). Sin embargo, algunos zircones preservan aún sus formas prismáticos y piramidales, incluso zoneamientos (Figura 38).

Con base en la morfología observada en los zirrones, así como basándonos en el diagrama de clasificación de tipología de los zirrones (Pupin, 1980) (Figura 39), los zirrones de la muestra OL6 -SL y OL14- SP se encuentran en los campos S (S_3 , S_4 , S_5) y P (P_1 , P_2 y P_5). Estos subgrupos nos indican que existe una diversidad de procedencia asociado con rocas magmáticas (plutónicas) de alta y baja temperatura, así como zirrones de posible origen metamórfico. De hecho, la diversidad de la procedencia de los zirrones puede también relacionarse con núcleos heredados que son evidentes por medio de las imágenes de catodoluminiscencia (Figura 38).

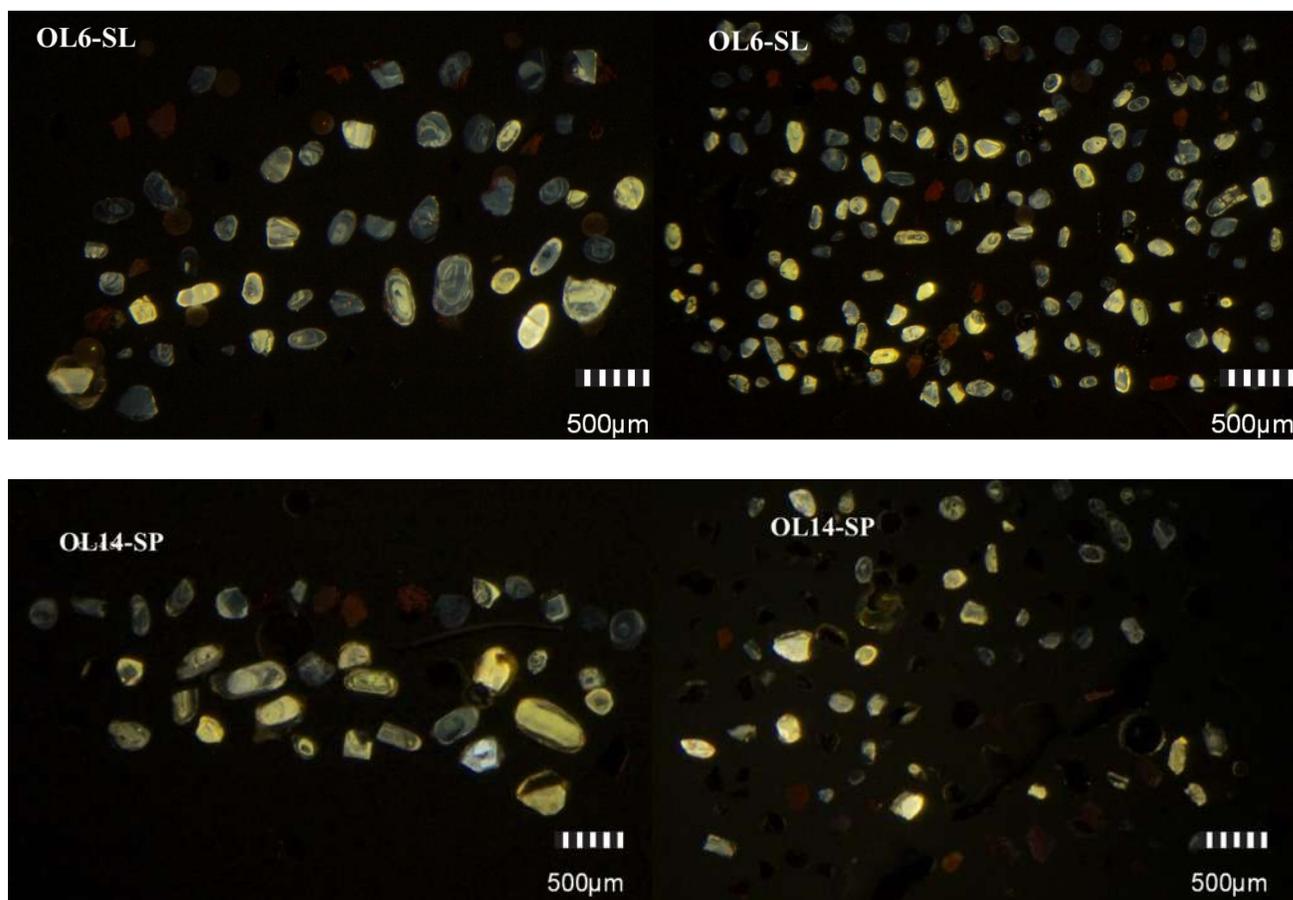


Figura 38. Imágenes de catodoluminiscencia en donde se observa la morfología de los zirrones analizados de las muestras OL6-SL y OL14-SP.

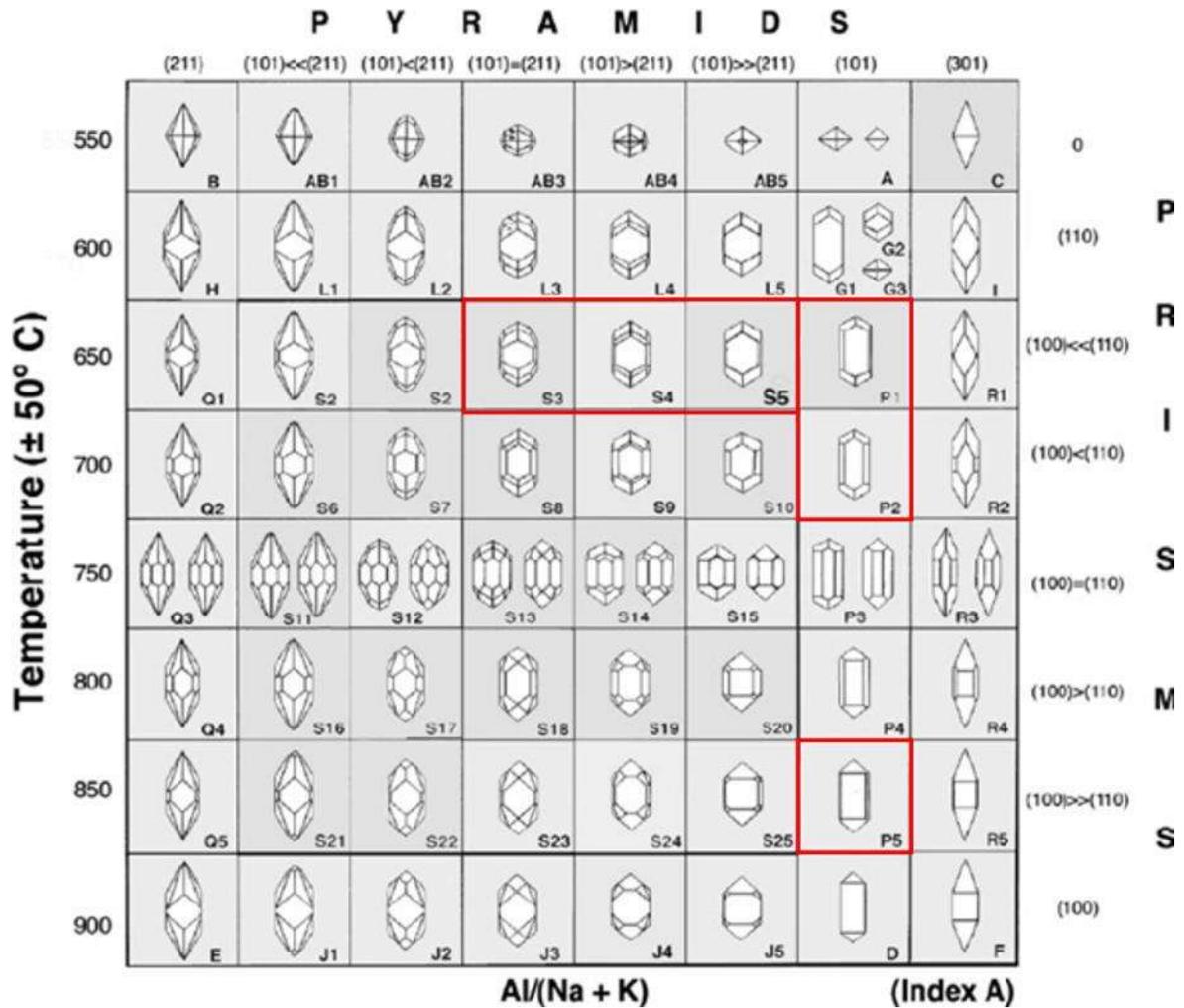


Figura 39. Clasificación tipológica de zircons de las muestras OL6-SL y OL14-SP (los recuadros rojos nos indican la morfología de los zircons identificados en este estudio; Pupin 1980).

6.3.3 Edad de sedimentación de las areniscas

En las tablas 4 y 5 se presentan los resultados de 116 zircons analizados de la muestra OL6-SL y 90 zircons para la muestra OL14-SP de la unidad Psammitas-Turbiditas (Arcosas) San Pedro (TJ-PTASP).

Como se observa en la Figura 40, en donde se presentan los histogramas de frecuencia (KDE) (Kernel Density Estimation) de las dos muestras. En la muestra OL6-SL se obtuvieron cuatro grupos de edades con picos de: i) Mesoproterozoico (Calimíniano; 1476 Ma); ii) Neoproterozoico, (Toniano; 936 Ma); Cámbrico temprano (Terreneuviano; 567.5 Ma), así como iv) algunos zircons del Triásico Superior (Nórico; 221.6 Ma).

Tabla 4. Resultados de los 116 zircons analizados de la muestra OL6-SL.

CORRECTED AGES (Ma)								
$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 2s$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 2s$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 2s$	Best age		
						(Ma)	$\pm 2s$	Disc %
686.0	20.0	744.0	34.0	920.0	120.0	686.0	20.0	7.8
1410.0	35.0	1420.0	31.0	1444.0	60.0	1444.0	60.0	0.7
1241.0	36.0	1340.0	28.0	1506.0	44.0	1241.0	36.0	7.4
1196.0	42.0	1348.0	38.0	1591.0	50.0	1196.0	42.0	11.3
1557.0	67.0	1563.0	47.0	1579.0	47.0	1579.0	47.0	0.4
959.0	57.0	1066.0	46.0	1280.0	52.0	959.0	57.0	10.0
603.0	20.0	643.0	24.0	770.0	75.0	603.0	20.0	6.2
672.1	17.0	720.0	19.0	855.0	47.0	672.1	17.0	6.7
923.0	32.0	991.0	32.0	1139.0	53.0	923.0	32.0	6.9
890.0	22.0	899.0	20.0	945.0	46.0	890.0	22.0	1.0
1105.0	26.0	1122.0	21.0	1127.0	42.0	1105.0	26.0	1.5
822.0	20.0	903.0	21.0	1107.0	40.0	822.0	20.0	9.0
1055.0	52.0	1090.0	46.0	1164.0	51.0	1055.0	52.0	3.2
1617.0	44.0	1616.0	29.0	1597.0	35.0	1597.0	35.0	-0.1
538.0	19.0	645.0	36.0	1000.0	150.0	538.0	19.0	16.6
259.6	7.5	265.0	14.0	310.0	120.0	259.6	7.5	2.0
446.0	21.0	543.0	24.0	940.0	89.0	446.0	21.0	17.9
752.0	55.0	890.0	52.0	1228.0	61.0	752.0	55.0	15.5
616.0	19.0	616.0	33.0	680.0	140.0	616.0	19.0	0.0
387.0	14.0	459.0	23.0	810.0	110.0	387.0	14.0	15.7
1411.0	34.0	1439.0	31.0	1476.0	54.0	1476.0	54.0	1.9
438.0	17.0	453.0	21.0	520.0	70.0	438.0	17.0	3.3
1749.0	47.0	1834.0	33.0	1947.0	48.0	1947.0	48.0	4.6
1643.0	90.0	1739.0	67.0	1848.0	38.0	1848.0	38.0	5.5
803.8	24.0	875.0	20.0	1060.0	39.0	803.8	24.0	8.1
1437.0	35.0	1470.0	35.0	1492.0	66.0	1492.0	66.0	2.2
1376.3	33.0	1432.0	26.0	1506.0	41.0	1376.3	33.0	3.9
610.8	16.0	624.0	24.0	690.0	93.0	610.8	16.0	2.1
637.8	17.0	653.0	27.0	660.0	110.0	637.8	17.0	2.3
811.0	33.0	880.0	34.0	1040.0	89.0	811.0	33.0	7.8
395.0	45.0	430.0	49.0	590.0	92.0	395.0	45.0	8.1
489.6	16.0	527.0	18.0	687.0	66.0	489.6	16.0	7.1
479.0	49.0	489.0	56.0	530.0	100.0	479.0	49.0	2.0
906.0	27.0	1066.0	26.0	1399.0	45.0	906.0	27.0	15.0
1513.0	36.0	1526.0	27.0	1544.0	42.0	1544.0	42.0	0.9
613.9	17.0	612.0	24.0	579.0	100.0	613.9	17.0	-0.3
541.1	15.0	572.0	24.0	670.0	98.0	541.1	15.0	5.4
1174.0	29.0	1255.0	27.0	1383.0	53.0	1174.0	29.0	6.5
914.0	24.0	1110.0	33.0	1527.0	73.0	914.0	24.0	17.7
1198.0	33.0	1203.0	35.0	1237.0	71.0	1198.0	33.0	0.4
1001.0	31.0	1008.0	41.0	980.0	110.0	1001.0	31.0	0.7

753.0	26.0	937.0	29.0	1396.0	73.0	753.0	26.0	19.6
552.0	72.0	733.0	77.0	1262.0	66.0	552.0	72.0	24.7
417.0	18.0	449.0	26.0	690.0	130.0	417.0	18.0	7.1
292.0	19.0	369.0	19.0	860.0	130.0	292.0	19.0	20.9
432.0	16.0	521.0	27.0	950.0	110.0	432.0	16.0	17.1
312.7	9.2	325.0	16.0	370.0	130.0	312.7	9.2	3.8
249.9	10.0	273.0	15.0	540.0	95.0	249.9	10.0	8.5
239.9	6.8	257.0	14.0	430.0	120.0	239.9	6.8	6.7
221.6	6.4	237.0	11.0	380.0	90.0	221.6	6.4	6.5
1472.0	42.0	1498.0	35.0	1514.0	49.0	1514.0	49.0	1.7
654.0	23.0	653.0	38.0	670.0	170.0	654.0	23.0	-0.2
1017.0	42.0	1056.0	100.0	1170.0	180.0	1017.0	42.0	3.7
1436.0	35.0	1479.0	39.0	1520.0	79.0	1520.0	79.0	2.9
619.4	16.0	624.0	19.0	651.0	65.0	619.4	16.0	0.7
346.0	18.0	439.0	30.0	940.0	130.0	346.0	18.0	21.2
2144.0	52.0	2201.0	32.0	2242.0	45.0	2242.0	45.0	2.6
1959.0	45.0	2056.0	27.0	2132.0	34.0	2132.0	34.0	4.7
1276.0	70.0	1384.0	62.0	1552.0	52.0	1276.0	70.0	7.8
963.0	38.0	1181.0	41.0	1584.0	69.0	963.0	38.0	18.5
1232.0	32.0	1302.0	31.0	1385.0	56.0	1232.0	32.0	5.4
587.0	20.0	613.0	45.0	620.0	200.0	587.0	20.0	4.2
936.0	25.0	932.0	27.0	897.0	84.0	936.0	25.0	-0.4
608.0	16.0	630.0	23.0	700.0	89.0	608.0	16.0	3.5
549.0	15.0	600.0	19.0	821.0	65.0	549.0	15.0	8.5
911.0	29.0	1053.0	23.0	1346.0	48.0	911.0	29.0	13.5
532.0	17.0	603.0	28.0	840.0	120.0	532.0	17.0	11.8
1278.0	34.0	1608.0	28.0	2057.0	39.0	1278.0	34.0	20.5
1653.0	37.0	1654.0	26.0	1644.0	32.0	1644.0	32.0	0.1
629.0	40.0	709.0	41.0	980.0	68.0	629.0	40.0	11.3
1485.0	35.0	1477.0	25.0	1470.0	36.0	1470.0	36.0	-0.5
1492.0	40.0	1490.0	29.0	1480.0	49.0	1480.0	49.0	-0.1
1381.0	35.0	1392.0	24.0	1402.0	33.0	1381.0	35.0	0.8
1324.0	32.0	1303.0	26.0	1261.0	50.0	1324.0	32.0	-1.6
1250.0	31.0	1274.0	28.0	1326.0	65.0	1250.0	31.0	1.9
1339.0	31.0	1335.0	25.0	1328.0	48.0	1339.0	31.0	-0.3
1510.0	35.0	1500.0	25.0	1500.0	35.0	1500.0	35.0	-0.7
562.9	15.0	570.0	27.0	550.0	130.0	562.9	15.0	1.2
1635.0	42.0	1633.0	30.0	1622.0	43.0	1622.0	43.0	-0.1
2464.0	140.0	2615.0	88.0	2724.0	33.0	2724.0	33.0	5.8
1565.0	37.0	1560.0	28.0	1536.0	51.0	1536.0	51.0	-0.3
1516.0	35.0	1515.0	26.0	1521.0	41.0	1521.0	41.0	-0.1
1540.0	37.0	1540.0	28.0	1541.0	43.0	1541.0	43.0	0.0
1474.0	34.0	1475.0	30.0	1484.0	54.0	1484.0	54.0	0.1
1220.0	33.0	1241.0	34.0	1247.0	97.0	1220.0	33.0	1.7

1051.0	29.0	1056.0	32.0	1078.0	66.0	1051.0	29.0	0.5
381.0	16.0	456.0	43.0	750.0	230.0	381.0	16.0	16.4
412.0	18.0	426.0	24.0	490.0	130.0	412.0	18.0	3.3
484.6	13.0	491.0	18.0	539.0	82.0	484.6	13.0	1.3
1616.0	40.0	1630.0	30.0	1640.0	39.0	1640.0	39.0	0.9
1000.0	31.0	1016.0	30.0	1023.0	57.0	1000.0	31.0	1.6
1015.4	25.0	999.0	23.0	955.0	64.0	1015.4	25.0	-1.6
1550.0	36.0	1558.0	26.0	1583.0	38.0	1583.0	38.0	0.5
1052.0	26.0	1050.0	21.0	1042.0	46.0	1052.0	26.0	-0.2
1199.0	29.0	1188.0	24.0	1170.0	45.0	1199.0	29.0	-0.9
1409.0	36.0	1434.0	30.0	1468.0	59.0	1468.0	59.0	1.7
1405.0	53.0	1414.0	45.0	1416.0	57.0	1416.0	57.0	0.6
1391.0	32.0	1402.0	25.0	1418.0	47.0	1391.0	32.0	0.8
1495.0	37.0	1496.0	28.0	1482.0	39.0	1482.0	39.0	0.1
644.1	17.0	639.0	22.0	624.0	90.0	644.1	17.0	-0.8
567.5	15.0	561.0	19.0	507.0	84.0	567.5	15.0	-1.2
1633.0	47.0	1636.0	35.0	1618.0	49.0	1618.0	49.0	0.2
584.0	16.0	581.0	24.0	550.0	110.0	584.0	16.0	-0.5
587.4	15.0	579.0	21.0	546.0	78.0	587.4	15.0	-1.5
804.0	21.0	799.0	25.0	811.0	79.0	804.0	21.0	-0.6
931.0	24.0	903.0	22.0	810.0	63.0	931.0	24.0	-3.1
349.0	28.0	364.0	150.0	430.0	340.0	349.0	28.0	4.1
246.6	8.1	252.0	16.0	280.0	140.0	246.6	8.1	2.1
1153.0	29.0	1139.0	28.0	1111.0	64.0	1153.0	29.0	-1.2
892.0	24.0	936.0	27.0	1016.0	68.0	892.0	24.0	4.7
588.0	26.0	697.0	29.0	998.0	88.0	588.0	26.0	15.6
397.0	20.0	420.0	23.0	470.0	80.0	397.0	20.0	5.5
1215.0	33.0	1280.0	28.0	1380.0	33.0	1215.0	33.0	5.1
931.0	31.0	948.0	47.0	970.0	150.0	931.0	31.0	1.8
1121.9	27.0	1126.0	23.0	1122.0	46.0	1121.9	27.0	0.4
1437.0	34.0	1461.0	26.0	1493.0	51.0	1493.0	51.0	1.6

Tabla 5. Resultados de los 90 zircones analizados de la muestra OL14-SP.

CORRECTED AGES (Ma)								
$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 2s$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 2s$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 2s$	Best age (Ma)	$\pm 2s$	Disc %
1770.0	110.0	1894.0	83.0	2025.0	41.0	2025.0	41.0	6.5
592.1	12.0	602.0	21.0	630.0	76.0	592.1	12.0	1.6
1690.0	32.0	1821.0	32.0	1994.0	46.0	1994.0	46.0	7.2
254.9	7.5	268.0	29.0	380.0	200.0	254.9	7.5	4.9
289.3	7.6	376.0	31.0	960.0	170.0	289.3	7.6	23.1
1034.0	16.0	1047.0	26.0	1060.0	58.0	1034.0	16.0	1.2
1147.0	18.0	1144.0	28.0	1140.0	66.0	1147.0	18.0	-0.3
1328.0	27.0	1326.0	28.0	1306.0	43.0	1328.0	27.0	-0.2
470.3	7.0	464.0	14.0	412.0	73.0	470.3	7.0	-1.4
915.9	16.0	910.0	21.0	886.0	47.0	915.9	16.0	-0.6
1210.0	20.0	1171.0	26.0	1080.0	60.0	1210.0	20.0	-3.3
924.0	17.0	956.0	25.0	1020.0	59.0	924.0	17.0	3.3
236.9	10.0	328.0	18.0	1000.0	130.0	236.9	10.0	27.8
1123.5	16.0	1129.0	25.0	1142.0	62.0	1123.5	16.0	0.5
933.4	13.0	973.0	23.0	1062.0	57.0	933.4	13.0	4.1
1287.0	35.0	1485.0	38.0	1776.0	51.0	1287.0	35.0	13.3
1174.0	19.0	1166.0	28.0	1140.0	68.0	1174.0	19.0	-0.7
1296.6	19.0	1288.0	25.0	1279.0	47.0	1296.6	19.0	-0.7
529.0	13.0	560.0	28.0	670.0	95.0	529.0	13.0	5.5
731.4	12.0	755.0	22.0	805.0	76.0	731.4	12.0	3.1
274.2	5.9	283.0	21.0	350.0	180.0	274.2	5.9	3.1
390.0	10.0	412.0	22.0	500.0	120.0	390.0	10.0	5.3
1234.0	20.0	1251.0	26.0	1293.0	54.0	1234.0	20.0	1.4
1293.0	24.0	1270.0	29.0	1235.0	49.0	1293.0	24.0	-1.8
691.0	20.0	722.0	51.0	760.0	210.0	691.0	20.0	4.3
256.0	11.0	259.0	42.0	220.0	340.0	256.0	11.0	1.2
1811.0	32.0	1795.0	37.0	1795.0	64.0	1795.0	64.0	-0.9
1154.0	19.0	1145.0	37.0	1114.0	86.0	1154.0	19.0	-0.8
960.0	22.0	963.0	43.0	970.0	150.0	960.0	22.0	0.3
534.4	9.6	540.0	22.0	579.0	100.0	534.4	9.6	1.0
807.0	20.0	836.0	34.0	900.0	130.0	807.0	20.0	3.5
278.3	6.9	281.0	15.0	260.0	110.0	278.3	6.9	1.0
294.0	9.3	344.0	37.0	540.0	260.0	294.0	9.3	14.5
1198.0	19.0	1201.0	26.0	1221.0	53.0	1198.0	19.0	0.2
258.0	10.0	289.0	34.0	500.0	280.0	258.0	10.0	10.7
245.0	11.0	266.0	31.0	430.0	260.0	245.0	11.0	7.9
506.0	13.0	494.0	39.0	530.0	200.0	506.0	13.0	-2.4
478.5	11.0	470.0	21.0	410.0	110.0	478.5	11.0	-1.8
1538.0	27.0	1539.0	35.0	1550.0	72.0	1550.0	72.0	0.1

1130.0	26.0	1138.0	28.0	1166.0	65.0	1130.0	26.0	0.7
1033.0	17.0	1016.0	29.0	969.0	87.0	1033.0	17.0	-1.7
1229.0	31.0	1217.0	35.0	1186.0	90.0	1229.0	31.0	-1.0
997.0	16.0	1000.0	28.0	1012.0	78.0	997.0	16.0	0.3
959.0	22.0	980.0	29.0	1070.0	89.0	959.0	22.0	2.1
1113.0	19.0	1114.0	31.0	1119.0	78.0	1113.0	19.0	0.1
1045.0	18.0	1089.0	26.0	1223.0	61.0	1045.0	18.0	4.0
999.0	17.0	990.0	22.0	993.0	49.0	999.0	17.0	-0.9
969.0	17.0	971.0	28.0	988.0	80.0	969.0	17.0	0.2
1532.0	26.0	1514.0	29.0	1520.0	56.0	1520.0	56.0	-1.2
290.5	4.9	291.0	11.0	301.0	84.0	290.5	4.9	0.2
998.0	15.0	988.0	21.0	975.0	48.0	998.0	15.0	-1.0
1630.0	25.0	1616.0	30.0	1610.0	49.0	1610.0	49.0	-0.9
1026.4	16.0	1021.0	23.0	1014.0	49.0	1026.4	16.0	-0.5
1208.0	17.0	1206.0	26.0	1199.0	49.0	1208.0	17.0	-0.2
1015.0	16.0	1006.0	25.0	973.0	63.0	1015.0	16.0	-0.9
1056.0	16.0	1025.0	27.0	961.0	68.0	1056.0	16.0	-3.0
1234.8	18.0	1189.0	24.0	1126.0	51.0	1234.8	18.0	-3.9
1457.0	21.0	1449.0	29.0	1419.0	51.0	1419.0	51.0	-0.6
1107.0	19.0	1114.0	24.0	1128.0	44.0	1107.0	19.0	0.6
1103.0	17.0	1101.0	25.0	1120.0	60.0	1103.0	17.0	-0.2
825.7	12.0	818.0	22.0	808.0	66.0	825.7	12.0	-0.9
1097.2	16.0	1094.0	25.0	1078.0	53.0	1097.2	16.0	-0.3
975.0	40.0	967.0	44.0	840.0	88.0	975.0	40.0	-0.8
280.1	7.3	281.0	28.0	240.0	220.0	280.1	7.3	0.3
1007.0	20.0	1001.0	28.0	1004.0	64.0	1007.0	20.0	-0.6
984.0	18.0	971.0	28.0	951.0	74.0	984.0	18.0	-1.3
295.8	7.5	304.0	26.0	340.0	200.0	295.8	7.5	2.7
576.0	12.0	581.0	26.0	580.0	120.0	576.0	12.0	0.9
269.8	6.4	297.0	14.0	510.0	98.0	269.8	6.4	9.2
279.1	6.0	278.6	12.0	268.0	87.0	279.1	6.0	-0.2
1412.0	22.0	1387.0	28.0	1332.0	52.0	1332.0	52.0	-1.8
575.0	14.0	566.0	28.0	520.0	130.0	575.0	14.0	-1.6
1110.0	16.0	1087.0	24.0	1061.0	50.0	1110.0	16.0	-2.1
1069.0	21.0	1065.0	37.0	1055.0	97.0	1069.0	21.0	-0.4
1112.0	23.0	1114.0	38.0	1110.0	110.0	1112.0	23.0	0.2
1181.0	21.0	1169.0	47.0	1170.0	120.0	1181.0	21.0	-1.0
1241.0	24.0	1214.0	38.0	1145.0	87.0	1241.0	24.0	-2.2
1006.0	19.0	1049.0	31.0	1130.0	71.0	1006.0	19.0	4.1
995.0	18.0	970.0	24.0	912.0	67.0	995.0	18.0	-2.6
996.0	22.0	1007.0	33.0	1016.0	90.0	996.0	22.0	1.1
1098.0	28.0	1122.0	43.0	1220.0	110.0	1098.0	28.0	2.1
271.5	5.8	273.0	18.0	310.0	140.0	271.5	5.8	0.5
923.0	19.0	954.0	34.0	994.0	93.0	923.0	19.0	3.2

975.0	20.0	985.0	41.0	990.0	130.0	975.0	20.0	1.0
882.0	16.0	926.0	30.0	1036.0	81.0	882.0	16.0	4.8
1086.0	18.0	1099.0	28.0	1135.0	69.0	1086.0	18.0	1.2
582.0	31.0	782.0	40.0	1290.0	130.0	582.0	31.0	25.6
976.0	20.0	999.0	31.0	1020.0	84.0	976.0	20.0	2.3
1036.0	22.0	1062.0	42.0	1100.0	120.0	1036.0	22.0	2.4
1047.0	18.0	1057.0	37.0	1080.0	81.0	1047.0	18.0	0.9

Por su parte, en la muestra OL14-SP se obtuvieron tres grupos de edades con picos de: i) Mesoproterozoico (Steniano; 1056 Ma); ii) Cámbrico temprano (Terreneuviano; 529 Ma) y iii) Pérmico (Kunguriano; 280.1 Ma).

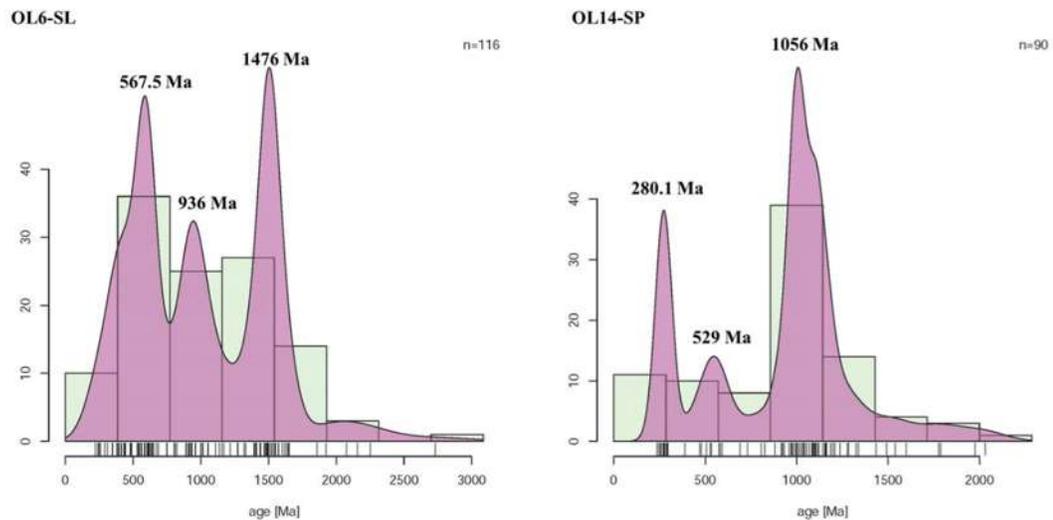


Figura 40. Distribución de frecuencias (KDE) de edades obtenidas de las muestras OL6-SL Y OL14-SP.

En la Figura 41 se presentan los diagramas de concordia para los pares isotópicos $x=^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$; $y=^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$. En estos diagramas se pueden observar los mismos grupos de poblaciones ya descritos en los diagramas de frecuencia de la Figura 40, en donde se observa que las concentraciones de las edades más antiguas de los zircones son del Mesoproterozoico

~1500 Ma, seguido de edades greenvillianas de ~900-1200 Ma, otro grupo de edades del Cámbrico temprano de ~500 Ma y finalmente otro grupo de edades mucho más jóvenes del Pérmico-Triásico entre ~280-220 Ma.

Los diferentes grupos de edades obtenidas en los zircones en ambas muestras, así como la tipología de granitos y rocas metamórficas (Figura 39), sugieren que la secuencia de Psammitas-Turbiditas (Arcosas) San Pedro (TJ-PTASP) ha sido producto de erosión de un basamento u orógeno de tipo continental con rocas tan antiguas del Mesoproterozoico. Considerando estos datos la edad máxima de sedimentación corresponde al Triásico superior (Nórico-Cárnico).

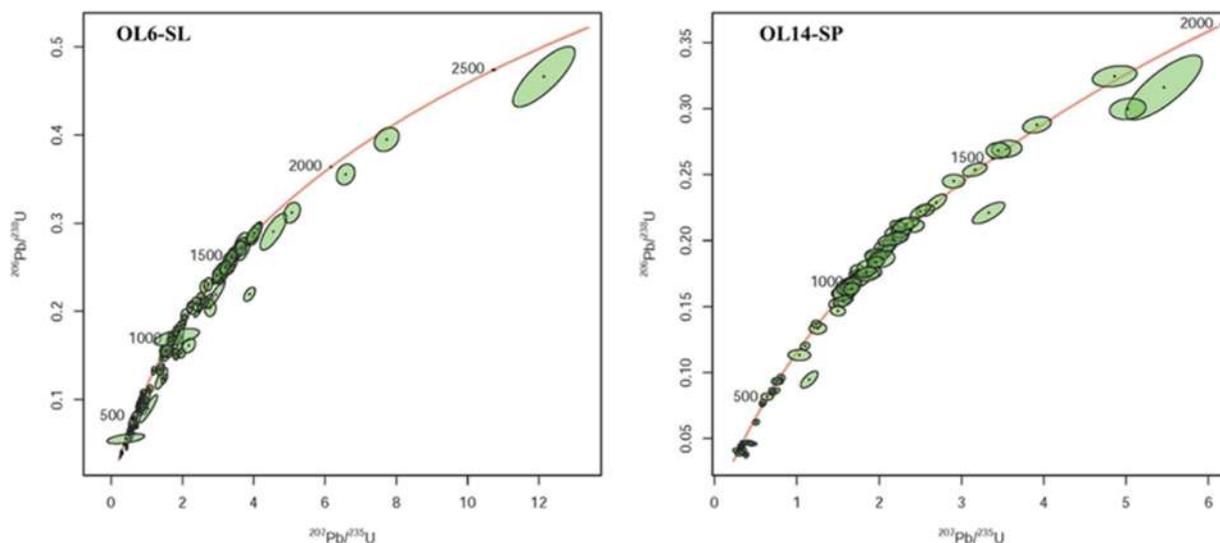


Figura 41. Diagramas de concordia mostrando las edades U/Pb esencialmente concordantes de las muestras OL6-SL y OL14-SP con los pares isotópicos $x=^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$; $y=^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$.

Capítulo 7

Discusión

7.1 Variaciones estratigráficas de la secuencia Psammitas-Turbiditas (Arcosas) San Pedro (TJ-PTASP) y volcánica-sedimentaria de la RT.

En la Figura 21 se presenta la propuesta de la columna estratigráfica de la RT de este estudio. Esta propuesta está basada en el trabajo de campo y de petrografía, y contiene algunas modificaciones a la columna propuesta por Rivera-Ruiz (2016). Por otro lado, con la finalidad de dar una mayor idea de las variaciones geológicas de la región se han integrado las secuencias de conglomerados del Terciario, así como las secuencias volcánicas del Plio-Cuaternario (De la Teja *et al.*, 2000). Sin embargo, considerando que el principal objetivo de trabajo consiste en determinar las variaciones estratigráficas de la secuencia TJ-PTASP, se propone dar particular atención en sus relaciones estratigráficas.

Con base en las observaciones de campo expresadas en las secciones geológicas (Figuras 19 y 20), se observa que una secuencia de lutitas intercaladas con limolitas y algunos horizontes de areniscas de la secuencia pelítica-siliciclástica (piroclástica) Tlalpujahuilla (J-PST) se encuentra sobreyaciendo, aparentemente de manera transicional a la secuencia de areniscas de arcosas TJ-PTASP. Ambas unidades con estructuras de plegamiento estarían infrayaciendo de manera discordante a la secuencia volcánica-sedimentaria del Jurásico tardío - Cretácico temprano. Esta sucesión que representa la evolución de un arco volcánico de tipo insular nos muestra una variación en la base con una serie de depósitos volcánicos con intercalaciones de metatobas, lutitas e intermitentes derrames de lava con estructura variable desde brecha volcánica hasta pillow-lavas de la secuencia (JK-VAEC). Asociado con esta secuencia se observan una serie de secuencias sedimentarias terrígenas-calcáreas, en donde afloran las Areniscas Coloradillas de la unidad de K-CPDE, las cuales pasan progresivamente a carbonatos asociados con pequeños bancos arrecifales, con calizas y

margas de la unidad K-CR, en donde González (2002) ha encontrado numerosa nanofauna a los cuales les ha asignado una edad del Aptiano.

La secuencia Psammitas-Turbiditas (Arcosas) San Pedro (TJ-PTASP), son de gran importancia porque representan la sucesión sedimentaria más antigua de la Región de Tlalpujahua. Debido a su composición con gran abundancia de cuarzo, así como numerosos fragmentos de roca de origen metamórfico y granítico, nos indica, por un lado, que se han formado como producto de erosión de una estructura de basamento cristalino cercano, y, por otro lado, que lo diferencia notablemente del resto de las unidades volcánico-sedimentarias superiores (De la Teja *et al.*, 2000; Rivera-Ruiz, 2016).

Es oportuno mencionar que el primer trabajo en el que se reporta esta secuencia TJ-PTASP es el de Rivera-Ruiz (2016), sin embargo, este autor solo describió de manera general afloramientos en el arroyo San Pedro, mientras que en este trabajo se reporta en los arroyos de San Lorenzo y Santa María, y en el cual se ha hecho una descripción más detallada. Esta secuencia tiene variaciones estratigráficas que muestran diferentes tipos de areniscas, desde arcosas a litarenitas, así como algunas intercalaciones de lutitas y limolitas. Por otro lado, también son comunes observar una serie de estructuras primarias típicas de corrientes de turbidez, licuefacción y *slumps*, que sugieren un ambiente de depósito típico marino de turbiditas y relativamente profundas. Por otro lado, la secuencia TJ-PTASP se encuentra generalmente muy plegada y en algunas ocasiones intensamente deformada con un cierto grado de metamorfismo que dificulta comprender las variaciones estratigráficas.

En contraste, las diferentes unidades superiores de la secuencia volcánica-sedimentaria varían en su composición, granulometría, de pelítica a psammítica con una relativa y variable influencia volcánica, desde depósitos piroclásticos (tobas y areniscas), con estructuras de derrames masivos pseudo-estratificados, las cuales muestran entre ellas contactos transicionales. Esta secuencia volcánico-sedimentaria tiene un contacto de tipo tectónico con la secuencia TJ-PTASP.

7.2 Procedencia sedimentaria y tectónica de la secuencia Psammitas-Turbiditas (Arcosas) San Pedro (TJ-PTASP) y Areniscas Coloradillas

Con la finalidad de favorecer la discusión acerca del origen de la secuencia TJ-PTASP, en este apartado se presenta la interpretación del análisis petrográfico y geoquímico de la procedencia de sedimentos y sus relaciones tectónicas. Las muestras de la secuencia TJ-PTASP se han proyectado con las Areniscas de Coloradillas, las cuales pertenecen a la secuencia volcánica-sedimentaria superior y muestran una composición de grauvacas (ver tabla 1). En la Figura 42 se proyectaron los valores de la relación de cuarzo-feldespato (Q-F) y los fragmentos de roca total (FRt), en donde se observa una clara agrupación de las areniscas pertenecientes a la Secuencia TJ-PTASP, donde predomina la relación de cuarzo-feldespato, indicando que las areniscas de la Secuencia TJ-PTASP podrían provenir ya sea de rocas graníticas, metamórficas o de un basamento u orógeno más antiguo (Rivera-Ruiz, 2016). Por su parte, para el grupo de las Areniscas Coloradillas, las muestras se observan de

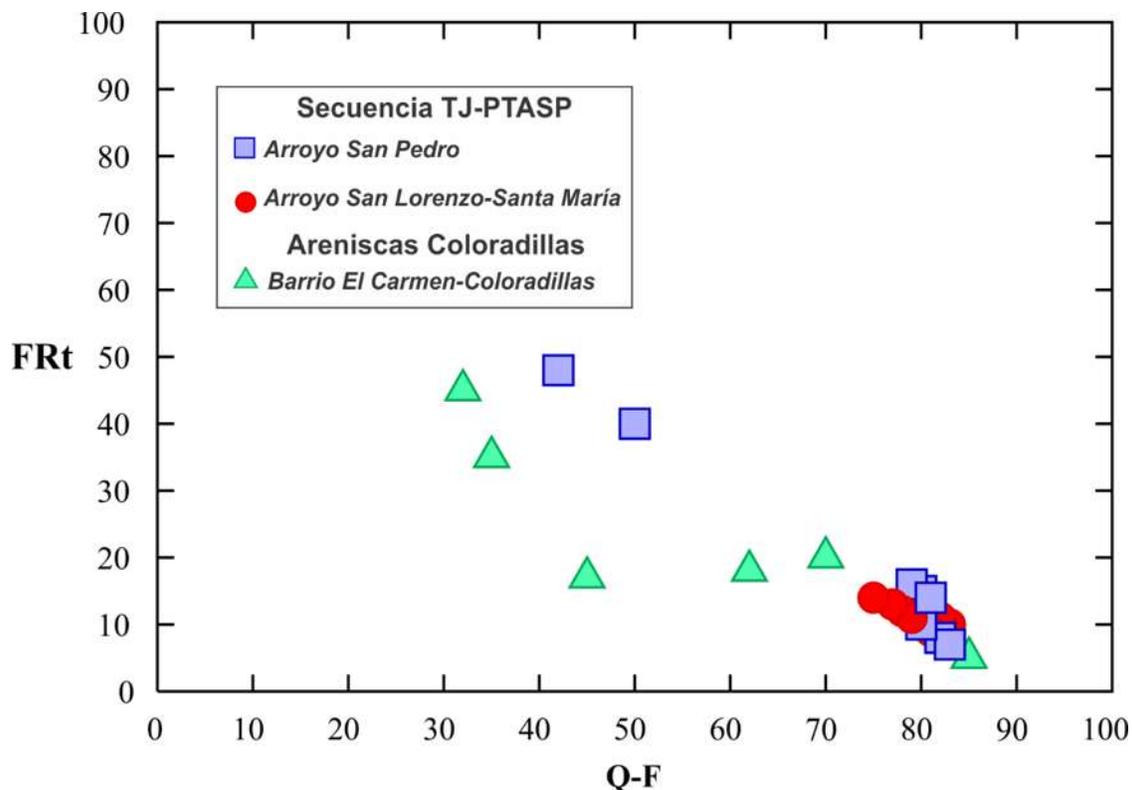


Figura 42. Diagrama binario de la relación de Q-F vs FRt de la Secuencia TJ-PTASP (cuadros y círculos) y Areniscas Coloradillas (triángulos).

una manera más dispersa, donde la mayoría presentan una moderada relación de cuarzo-feldespatos con bajos contenidos de fragmentos líticos. Una muestra perteneciente a este grupo tiene una relación de cuarzo-feldespatos más alta que las otras, pero no presenta fragmentos líticos totales.

Para determinar el tipo de ambiente tectónico y entender el origen de la secuencia TJ-PTASP y las Areniscas Coloradillas se construyó un diagrama de Qt-F-L (Dickinson, 1985; Figura 43), en donde se observan que las muestras graficadas de ambos grupos tienen una agrupación diversa entre sí. La secuencia TJ-PTASP se encuentra principalmente en el campo de orógeno reciclado, tendiendo ligeramente y hacia los campos de transición continental, arco disectado y transicional. Las Areniscas Coloradillas se muestran muy dispersas, pero relacionadas a productos de erosión de las secuencias de arco volcánico, con algunas muestras que sugieren un aporte relativo de orógeno reciclado.

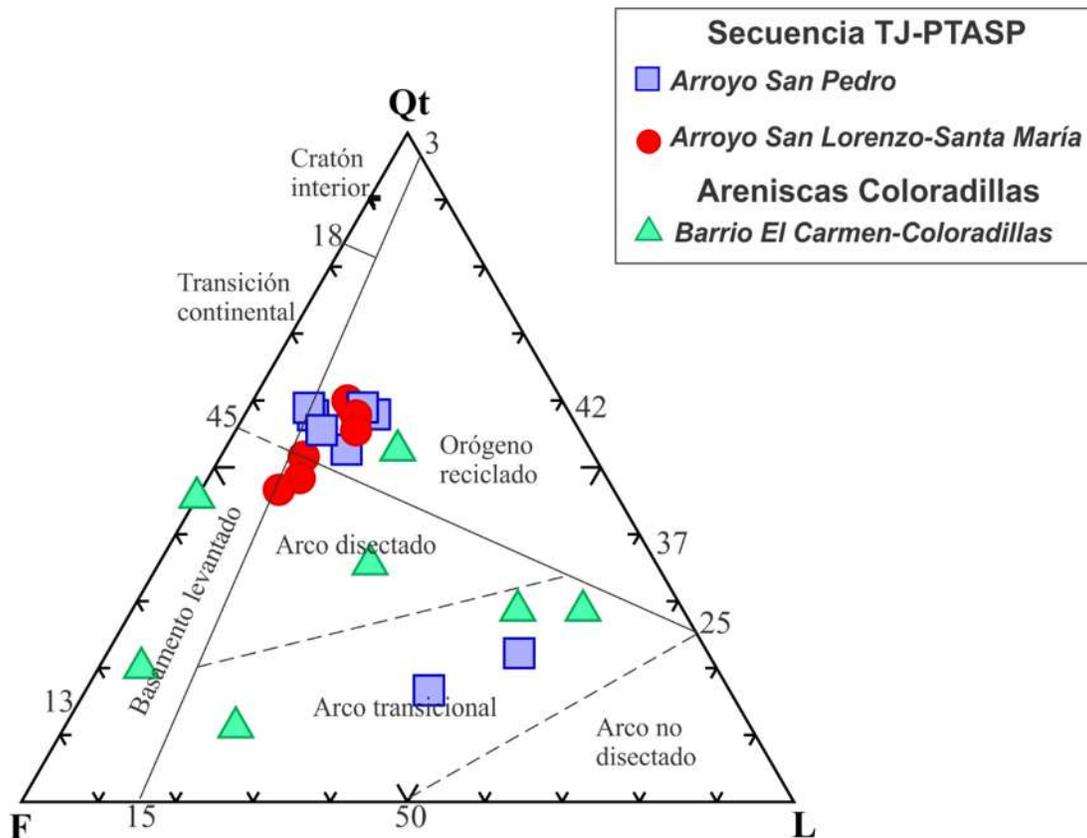


Figura 43. Diagrama ternario de discriminación de ambientes de procedencia de la Secuencia TJ-PTASP (cuadros y círculos) y Areniscas Coloradillas (triángulos) (Dickinson, 1985).

De acuerdo con Pothero y Schwab, 2004, muchas arcosas como las descritas para la Secuencia TJ-PTASP pueden ser referidas a abanicos aluviales o bien a depósitos sedimentarios transicionales relacionados con deltas y abanicos submarinos. Este último origen parecería más factible, considerando el tipo de estructuras y estratigrafía de la Secuencia TJ-PTASP. Por su parte, las litarenitas usualmente coinciden temporal y espacialmente con la disección de márgenes activas relacionadas con la subducción y probablemente en parte con orógenos colisionales. Por su parte, las grauvacas del grupo de Coloradillas, considerando sus componentes, pueden ser interpretadas como depósitos de corrientes turbidíticas en complejos de abanicos submarinos, asociadas con la disección de una serie de formas topográficamente positivas de arco volcánico.

Considerando que los dos grupos de areniscas, Secuencia TJ-PTASP y de Coloradillas están asociados con márgenes continentales marinos, se propone proyectar los datos de geoquímica de estas muestras en la proyección de Al_2O_3/SiO_2 vs Fe_2O_3+MgO (Figura 44) y TiO_2 vs Fe_2O_3+MgO (Figura 45), donde se puede discriminar los diferentes tipos de ambientes tectónicos (Bathia, 1983).

En los diagramas de las Figuras 44 y 45 se observa que las muestras de las Areniscas Coloradillas caen en el campo de Margen Continental Activa (MCA) o de subducción, mientras que las muestras de la Secuencia TJ-PTASP caen en el campo de Margen Continental Pasiva (MCP) o margen de subsidencia, aunque en el diagrama de la figura 44 se encuentran fuera de este campo. Por lo tanto, ambos grupos de areniscas muestran un ambiente de sedimentación marino, pero de afinidad tectónica completamente diferente. Estos resultados pueden ser explicados debido a que el titanio y el hierro son elementos que muestran una relativa baja movilidad y también un corto tiempo de residencia en el mar, el cual nos indica un decrecimiento de TiO_2 en estos márgenes continentales. Por su parte, la relación Al_2O_3/SiO_2 indica una correlación con un enriquecimiento de cuarzo y feldespatos, es decir, con una procedencia relacionada con un orógeno reciclado, siendo consistente con lo observado en la Figura 43 (Dickinson, 1985).

Finalmente, en la Figura 46 se muestra un diagrama de discriminación ternario Th-Co-Zr/10, propuesto por Bathia y Crook (1986), en donde se grafican las muestras de areniscas de la Secuencia TJ-PTASP y Areniscas Coloradillas. Se observa de manera consistente cómo

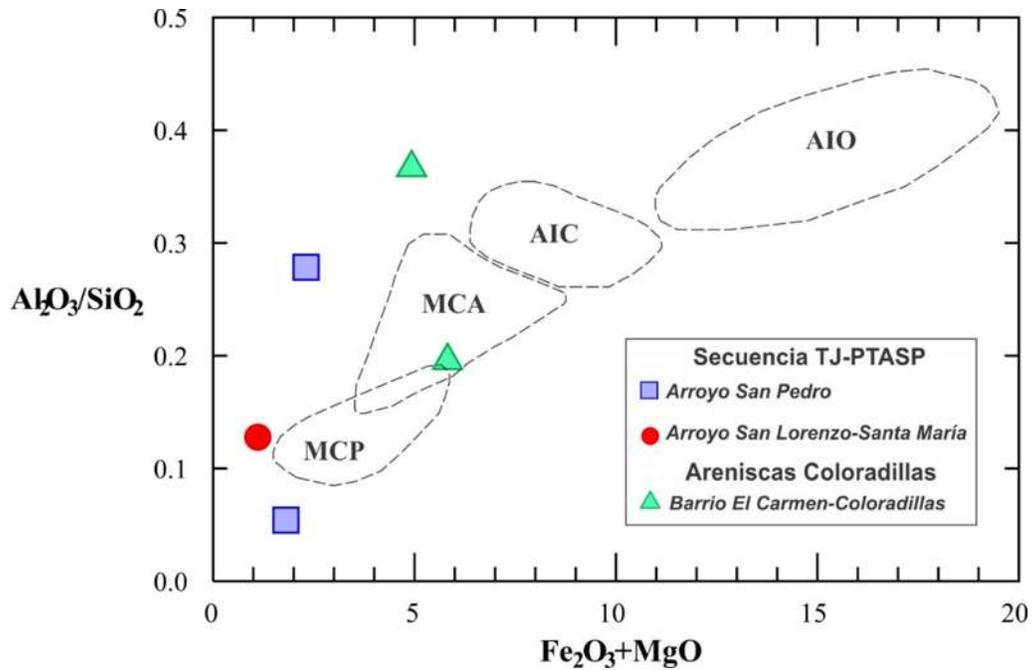


Figura 44. Diagrama de discriminación de ambientes tectónicos de las muestras de areniscas de la Secuencia TJ-PTASP (cuadros y círculos) y Areniscas Coloradillas (triángulos) propuesto por Bathia (1983). Donde AIO: Arcos de islas oceánicas, AIC: Arcos de islas continental, MCA: Margen continental activa y MCP: Margen continental pasiva.

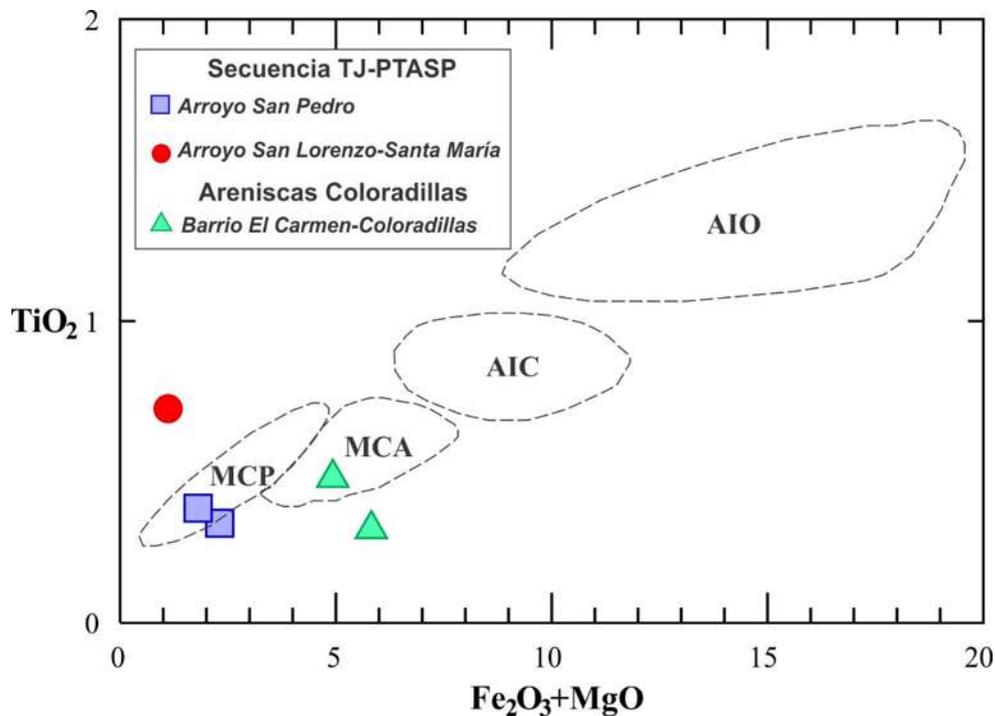


Figura 45. Diagrama de discriminación de ambientes tectónicos de las muestras de areniscas de la Secuencia TJ-PTASP (cuadros y círculos) y Areniscas Coloradillas (triángulos) propuesto por Bathia (1983). Donde AIO: Arcos de islas oceánicas, AIC: Arcos de islas continental, MCA: Margen continental activa y MCP: Margen continental pasiva.

una muestra perteneciente a las Areniscas Coloradillas cae en el campo de Arco de Islas (AIC), debido a que puede tener componentes volcánicos félsicos de arcos más maduros, mostrando menores concentraciones en Zr y Th. Por su parte, una de las muestras que pertenece a la Secuencia TJ-PTASP cae en el campo de Margen Continental Pasiva (MCP), debido a su alta relación de Zr/Th, siendo éste característico de reciclamiento de sedimentos de márgenes continentales pasivos, resultando en el agotamiento de feldespatos y fragmentos lábiles e incremento en la abundancia de minerales pesados durante los procesos sedimentarios (Bathia y Crook, 1986). Por otro lado, en el diagrama de la Figura 46 se observa que una muestra perteneciente a las Areniscas Coloradillas cae en un campo distinto asociado con material volcánico félsico y también porque sus concentraciones de Co, Th y Zr son bajas, sugiriendo que contenga componentes mixtos de ambos campos de MCA y AIC.

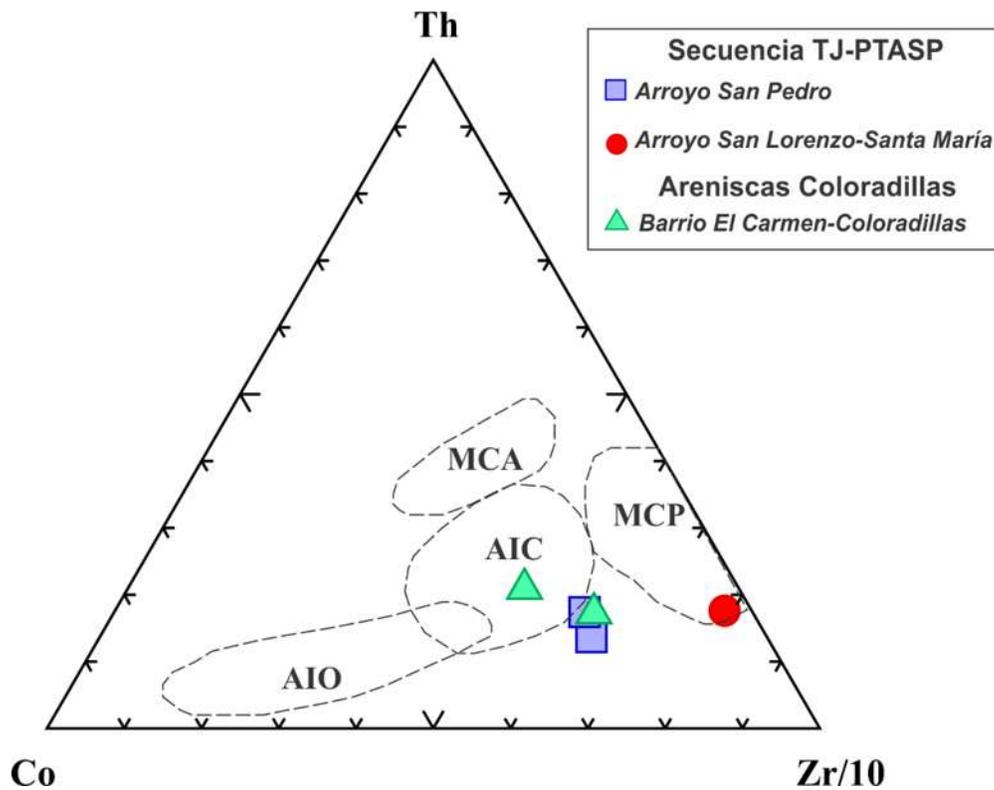


Figura 46. Diagrama de discriminación de ambientes tectónicos de las muestras de areniscas de la Secuencia TJ-PTASP (cuadros y círculos) y Areniscas Coloradillas (triángulos) propuesto por Bathia y Crook (1986). Donde AIO: Arcos de islas oceánicos, AIC: Arcos de islas continental, MCA: Margen continental activo y MCP: Margen continental pasivo.

En base en los resultados observados de este diagrama, dos de las tres muestras de la Secuencia TJ-PTASP fueron fechadas por el método U/Pb, en el cual la muestra que cae en el campo MCP (Arroyo San Lorenzo-Santa María) mostraba una gran abundancia de zircones, ya que tiende a estar enriquecida en Zr, sin embargo, la otra muestra que pertenece al Arroyo San Pedro, mostraba una menor cantidad, el cual está empobrecida en Zr, reflejándonos ciertas diferencias geoquímicas.

En suma, a partir de las variaciones petrográficas y geoquímicas de la Secuencia TJ-PTASP y de las Areniscas Coloradillas, resulta evidente que muestran claras diferencias de composición mineralógica y por lo tanto de procedencia de ambiente sedimentario. Las areniscas de la Secuencia TJ-PTASP muestra características de procedencia de orógeno reciclado (indicando que su gran abundancia de cuarzo-feldespatos y su relativa abundancia de fragmentos líticos cristalinos) y de margen continental pasivo (subsistencia), mientras que las Areniscas Coloradillas muestran claramente rasgos de disección de arco volcánico (subducción) con escasos clastos de orógeno, indicándonos su enriquecimiento de líticos volcánicos y su ausencia de líticos cristalinos. Aunque sin análisis detallados, esta observación de procedencia de ambos grupos de areniscas ya había sido señalada por Rivera-Ruiz (2016), sugiriendo que la Secuencia TJ-PTASP se habría depositado en un ambiente distinto y asociado a una cuenca siliciclástica que recibiría aporte de la erosión un antiguo basamento expuesto.

En relación con las edades máximas de sedimentación de ambos sistemas, se puede señalar que, con base en las relaciones de campo, las areniscas de la Secuencia TJ-PTASP representan la secuencia más antigua de la RT y subyacen a las areniscas de Coloradillas, las cuales han sido atribuidas a la transición sedimentaria de la cuenca de arco volcánica-sedimentaria. En este sentido, es oportuno señalar que por medio de los concentrados de zircones obtenidos y descritos en el apartado 6.3 de Geocronología, las edades para la Secuencia TJ-PTASP, presenta poblaciones con edades tan antiguas como el Mesoproterozoico ~1500 Ma, seguido de edades greenvillianas de ~900-1200 Ma, otro grupo de edades del Cámbrico temprano de ~500 Ma y finalmente otro grupo de edades mucho más jóvenes del Triásico temprano entre ~280-220 Ma. Esta última edad representa la edad máxima de sedimentación.

Por su parte, aunque una muestra de Coloradillas fue procesada, desafortunadamente no se obtuvieron suficientes zirrones, por lo que no se pudo obtener una edad máxima de sedimentación. Sin embargo, si consideramos que esta secuencia de areniscas pasa gradualmente a la secuencia carbonatada donde se ha reportado nannoplancton fósil (González-Fabián *et al.*, 2002), se le puede atribuir una edad relativa del Titoniano-Aptiano a las Areniscas de Coloradillas.

7.3 Relación de la secuencia Psammitas-Turbiditas (Arcosas) San Pedro (TJ-PTASP) y las Areniscas Coloradillas con el Terreno Guerrero

Se considera que la Secuencia TJ-PTASP se depositó en un ambiente de una cuenca siliciclástica de subsidencia Permo-Triásica, la cual recibía aporte de la erosión procedente de un antiguo basamento expuesto, así como después de una fase de deformación indicada por el plegamiento y las relaciones de una discordancia erosional. Posteriormente se depositaron la secuencia de Areniscas Coloradillas asociadas con un ambiente volcánico sedimentario provenientes de un arco volcánico durante el Jurásico tardío-Cretácico temprano. Por lo tanto, resulta importante proponer algunos elementos de correlación con secuencias similares con el Terreno Guerrero.

De acuerdo con trabajos de Centeno-García *et al.*, (2003; 2008), algunas secuencias psammiticas correlacionables con la Secuencia TJ-PTASP han sido reportadas en Tzitzio, Huetamo, así como también con la secuencia de arcosas de la Formación Varales del Complejo Arteaga. La Formación Varales del Complejo Arteaga ha sido bien descrita y está compuesta de areniscas de grano fino a medio depositadas por corrientes de turbidez y de acuerdo con sus composiciones modales se considera que se derivan de orógenos reciclados o de fuentes análogas como cinturón de pliegues y cabalgaduras, o bien de un cinturón de sutura por colisión, con cierta influencia de fuentes cratónicas, con una edad de depósito máxima aproximadamente de 260 Ma, obtenida a partir de fechamiento de zirrones detríticos.

En la secuencia TJ-PTASP las edades de zirrones más jóvenes pertenecen al Triásico inferior y las más antiguas al Precámbrico, aunque el mayor número de edades corresponde

al Paleozoico. Las edades más jóvenes que pertenecen al Triásico sufrieron menos transporte o un transporte moderado, lo cual esto nos indica que tienen una procedencia probablemente de fuentes locales, sin embargo, los zircones más viejos como del Paleozoico y Precámbrico sufrieron un transporte más extensivo, indicándonos un reciclamiento de granos. Por lo tanto, resulta evidente que la procedencia de los sedimentos de las arcosas y litarenitas de la secuencia TJ-PTASP sugieren la destrucción de un orógeno reciclado con edades relacionadas con la margen continental y con el depósito de deltas y abanicos submarinos formados durante la subsidencia continental y apertura de Pangea y de la región de Gondwana.

Las fuentes potenciales de los sedimentos podrían ser referidos a un microcontinente tipo Oaxaquia, ya que tiene un basamento cristalino de edad Proterozoica y afinidad greenvilliana (Ortega-Gutiérrez *et al.*, 1995; *En*: Ortega-Flores, 2017), así como al Complejo Acatlán del Terreno Mixteca que se encuentra conformado por rocas metamórficas del Paleozoico (Ortega-Gutiérrez, 1978, Ortega-Gutiérrez, 1981; *En*: Ortega-Flores, 2017). Esta interpretación fue propuesta por diversos autores (Centeno-García *et al.*, 2003; 2008; 2011; Talavera-Mendoza, 2007; Ortega-Flores, 2017) y podría encontrar cierta consistencia con los datos de este estudio.

Por su parte, la correlación de las Areniscas Coloradillas, siendo una secuencia pelítica muestra una relación estratigráfica transicional con la secuencia volcánica-sedimentaria, como se puede observar en la columna estratigráfica de la RT (Figura 21). Su textura y asociación con lutitas y calizas carbonosas nos sugieren que se habrían formado en ambientes marinos profundos y en relación con los depósitos de arco volcánico. Esta propuesta es consistente con los rasgos petrográficos, geoquímicos y de clasificación de las Areniscas Coloradillas indicando una procedencia de un arco transicional y disectado. Del mismo modo, la edad puede correlacionarse con las secuencias de arco volcánico del Terreno Guerrero, dado que cuenta con un registro del nanoplancton (Tithoniano-Aptiano) (González *et al.*, 2006; *En*: Rivera-Ruiz, 2016).

Esta secuencia muestra una fuerte correlación con las secuencias de los subterrenos Teloloapan y Guanajuato (Centeno-García *et al.*, 2008; Ortega-Flores 2017). Sin embargo, que el Terreno Guerrero hoy en día ha sido un gran foco de discusión en diversos trabajos de

investigación. Su evolución es muy compleja y puede estar relacionada a un sistema de multi-arcos que han evolucionado en tiempo y espacio con cuencas sedimentarias que podrían mostrar rasgos locales y regionales (Talavera *et al.*, 2007). Por otro lado, también han sido muy discutidos los procesos de acreción de tipo sub-continental, de arcos intra-oceánicos desarrollados a lo lejos de un continente, separados por una o varias cuencas teniendo como escenarios de procedencia al tipo alóctona o exótica y para-autóctona (Ortega-Flores, 2017)

En la Figura 47, se presenta un modelo tectónico que busca sintetizar los resultados de este trabajo, así como la interpretación realizada en trabajos previos (Talavera-Mendoza y Guerrero-Suastegui, 2000; Talavera-Mendoza *et al.*, 2007; Rivera-Ruiz, 2016).

Con base en los datos obtenidos de campo, petrografía, geoquímica y geocronología de la RT, se considera que la Secuencia de Arcosas San Pedro (TJ-PTASP), representa la unidad sedimentaria más antigua y puede ser interpretada como depósitos sedimentarios de abanicos submarinos siliciclásticos durante el Triásico inferior-medio. Estos abanicos submarinos fueron alimentados por grandes sistemas fluviales y los sedimentos transportados son de fuentes continentales (Ortega-Flores, 2017) desarrollados en el Pérmico-Triásico, a través de una margen continental pasiva.

Esta cuenca marina de tipo profunda recibiría aportes continentales y podría ser correlacionable con el abanico potosino (Centeno-García, 2005; Centeno-García *et al.*, 2008). Por lo tanto, los aportes continentales que recibiría la Secuencia TJ-PTASP provienen de la erosión de un basamento continental compuesto de rocas graníticas y metamórficas muy antiguas, las cuales posiblemente serían de fuentes pertenecientes al microcontinente Oaxaquia y al Complejo Acatlán del Terreno Mixteco, a lo largo de una margen continental asociada con la ruptura de Pangea en el Triásico inferior. Los márgenes continentales habrían permanecido como partes remanentes que se fueron erosionando con el tiempo, depositándose en una cuenca profunda por flujos turbidíticos. Una vez depositada esta secuencia de areniscas siliciclásticas, se iniciaría un proceso de subducción precoz que gradualmente habría ocasionado su acreción al continente durante el Jurásico temprano.

Posteriormente, a lo largo de una margen continental acrecional, se iniciaría un proceso de subducción que habría generado las condiciones para formar sucesivamente un ambiente de arco volcánico de tipo insular durante el Jurásico superior, donde comenzaría el proceso

de sedimentación de las areniscas de Coloradillas y por lo tanto constituiría la base de una secuencia volcánica-sedimentaria que se extendería hasta el Cretácico temprano. Este ambiente de subducción se habría mantenido y mediante una subducción de arco insular con dirección al Este se construyó un arco volcánico que podría representar la parte somital o superior de la secuencia volcánica-sedimentaria de la RT (Rivera-Ruiz, 2016). La secuencia Dos Estrellas se depositó por subsidencia de la cuenca tras-arco, además se encuentra relacionada y en algunas zonas de forma transicional con la secuencia de Tlalpujahuilla y con las areniscas de Coloradillas, indicando que se formó en condiciones profundas y no someras debido a la presencia de carbonatos carbonosos y altos contenidos de arcillas. La última secuencia que se refiere a la unidad de carbonatos Remedios se refiere al desarrollado en parches de calizas de plataforma externa con altos contenidos de margas y arcillas.

En síntesis, se propone para la RT un modelo tectónico de arco tipo insular para el Cretácico temprano, donde se involucra una placa oceánica con otra sub-continental, donde generan un magma típico de arco volcánico, dividiendo a la región en una cuenca ante-arco, macizo del arco, una cuenca post-arco y una región sub-continental. La secuencia psammítica de arcosas San Pedro constituye la base o el basamento relativo de la secuencia volcánico-sedimentaria sobre del cual se construyó el arco volcánico de la RT.

La última etapa de este modelo se encuentra relacionada con una deformación de tipo compresiva, generando un sistema de pliegues y cabalgaduras en las unidades de la RT durante el Cretácico tardío, proponiendo que la acreción de las secuencias de arco del basamento de la RT tiene una vergencia hacia el NE.

Modelo Tectónico de la Región de Tlalpujahua

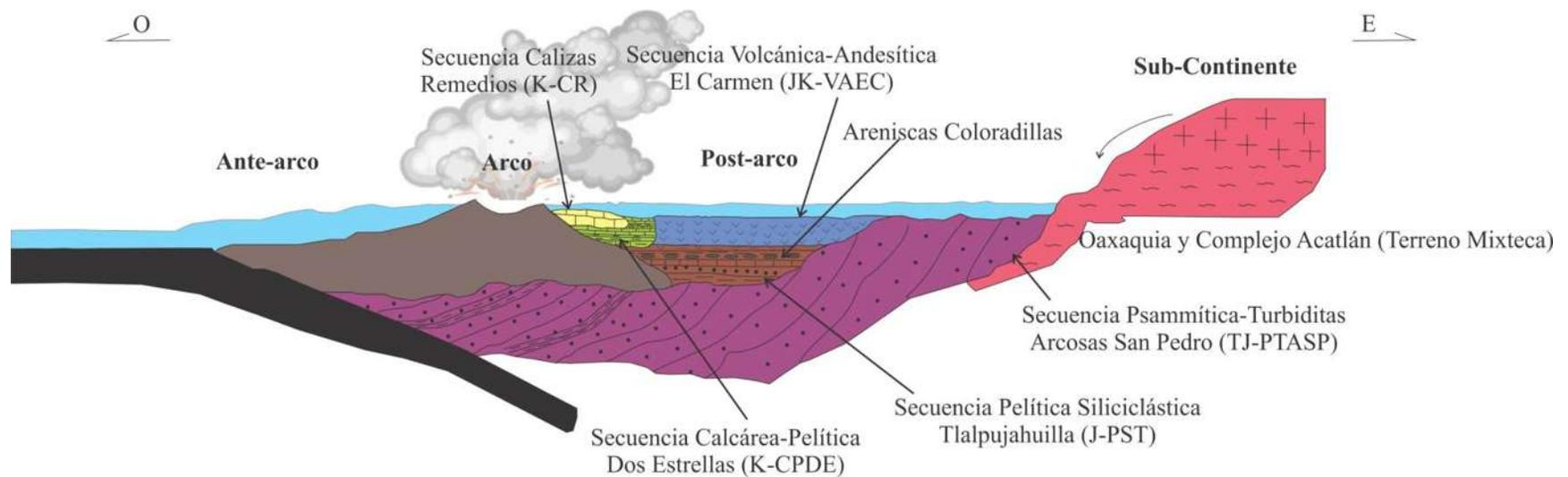


Figura 47. Modelo tectónico de arco tipo insular de la Región de Tlalpujahua desarrollado durante el Jurásico superior-Cretácico temprano (modificado de Rivera-Ruiz, 2016).

Capítulo 8

Conclusiones

1.- Con base en las descripciones de campo, petrografía, geoquímica y geocronología se concluye que la Secuencia Psammitas-Turbiditas Arcosas San Pedro (TJ-PTASP):

- a) Representan el basamento relativo y la secuencia sedimentaria más antigua de la región de Tlalpujahuá, infrayaciendo a la secuencia volcánica-sedimentaria cretácica de la RT. Aflora en los Arroyos San Pedro, San Lorenzo y Santa María, teniendo variaciones en sus estructuras primarias, siendo su localidad tipo el Arroyo San Pedro, donde presenta una estratificación rítmica y estructuras de turbidez de cuenca profunda.
- b) Con base en sus variaciones petrográficas, geoquímicas y debido a sus grandes abundancias de cuarzo-feldespatos y a su relativa abundancia de fragmentos líticos cristalinos (metamórfico y granítico), se interpreta la procedencia de un orógeno reciclado, originado en un margen continental pasiva.
- c) El ambiente de depósito puede ser interpretado como depósitos de abanicos submarinos que recibe aportes de la erosión de un antiguo basamento continental y se deposita por flujos turbidíticos en una cuenca profunda, generando estructuras primarias de turbidez y desarrollados durante el Triásico en un margen pasivo.
- d) Los zircones separados y fechados por el método U-Pb en esta secuencia, indican edades tan antiguas del Precámbrico y Paleozoico, así como una edad máxima de sedimentación del Triásico Inferior.

2.- Las Areniscas Coloradillas son grauvacas y litarenitas con influencia volcánica que están asociadas a la base de la secuencia volcánico-sedimentaria y por sus relaciones petrográficas y geoquímicas pueden ser interpretadas como originadas en un ambiente asociado a la disección de un arco volcánico con poca influencia sub-continental.

3.- Se propone un modelo tectónico de arcos de islas volcánico para esta porción del Terreno Guerrero, donde la Secuencia TJ-PTASP es correlacionable con otras secuencias siliciclásticas (Tzitzio y Complejo Arteaga) y representa una sucesión sedimentaria

acrecionada a una margen sub-continental que constituye el basamento relativo de la secuencia volcano-sedimentaria del Cretácico inferior de la RT.

Referencias

Alonso-Zarza, A.M., 2013. La Petrología Sedimentaria: desde Sorby a la globalización de la Geología Sedimentaria. *Boletín Geológico y Minero*, 124 (1), p.97-109.

Arribas-Mocoroa, J., 2010. Análisis de la procedencia en depósitos arenosos. En A. Arche (Ed.), Madrid: *Sedimentología del proceso físico a la cuenca sedimentaria* (p. 397-439). *Textos Universitarios 46*. Consejo Superior de Investigaciones.

Arche, A., y López-Gómez, J., 2010, Relaciones entre sedimentación y tectónica. En A. Arche (Ed.), Madrid: *Sedimentología del proceso físico a la cuenca sedimentaria* (p. 1183-1249). *Textos Universitarios 46*. Consejo Superior de Investigaciones.

Arche, A., 2010, Facies, sedimentología y análisis de cuencas sedimentarias. En A. Arche (Ed.), Madrid: *Sedimentología del proceso físico a la cuenca sedimentaria* (p. 15-52). *Textos Universitarios 46*. Consejo Superior de Investigaciones.

Bhatia, M.R., 1983. Plate tectonics and geochemical composition of sandstones. *Journal of Geology*, v. 91, p. 611-627.

Bhatia, M.R., Crook, K.A.W., 1986. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 92, p.181-193.

Bhatia .M.R, and Taylor S.R., 1981. Trace element geochemistry and sedimentary provinces: A study from the Tasman Geosyncline, Australia. *Chemical Geology*, 33, p.115-125.

Bissig, T., Mortensen, J.K., and Hall, B., 2003, The volcano-sedimentary setting of the Kuroko type Vhms District of Cuale, Jalisco, Mexico. *Geological Society of America Abstracts with Programs*, v. 35, no. 4, p. 61.

Bustamante-García, J, 2007. Inventario físico de los recursos minerales del municipio Tlalpujahua, estado de Michoacán. Servicio Geológico Mexicano. 103 pp. Inventario.

Campa, M.F., Ramírez, J., 1979. La Evolución Geológica y la Metalogénesis del Noroccidente de Guerrero. Universidad Autónoma de Guerrero, Serie Técnico-Científica, vol. 1, 84 pp.

- Campa, M.F., Ramírez, J., Flores R., Coney, P., 1981. Terrenos Tectonoestratigráficos de la Sierra Madre del Sur, Región Comprendida entre los Estados de Guerrero, Michoacán, México y Morelos. Universidad Autónoma de Guerrero, Serie Técnico-Científica, vol. 10, 28 pp.
- Campa, M.F. and Coney, P. J. 1983. Tectono-stratigraphic terranes and mineral resource distributions in Mexico. *Canadian Journal of Earth Sciences*, vol. 20, p.1040-1051.
- Cawood, P.A., Hawkesworth C.J., and Dhuime B., 2012, Detrital zircon record and tectonic setting. *Geology*, vol. 40, núm. 10, p. 875-878.
- Centeno-García, E., Gehrels, G., Diaz-Salgado, C., and Talavera-Mendoza, O., 2005, Zircon provenance of Triassic (Paleozoic?) turbidites from central and western Mexico: Implications for the early evolution of the Guerrero Arc. *Geological Society of America Abstracts with Programs*, v. 37, no. 4, p. 233-258.
- Centeno-García, E., Ruíz, J., Coney, P., Patchett, J.P., and Ortega, G.F., 1993, Guerrero Terrane of Mexico: Its role in the Southern Cordillera from new geochemical data. *Geology*, v. 21, p. 419–422.
- Centeno-García, E., Guerrero-Suastegui, M., and Talavera-Mendoza, O., 2008, The Guerrero Composite Terrane of western Mexico: Collision and subsequent rifting in a supra-subduction zone, in Draut, A., Clift, P.D., and Scholl, D.W., eds., *Formation and Applications of the Sedimentary Record in Arc Collision Zones*. Geological Society of America Special Paper 436, p. 279–308.
- Centeno-García, E., Busby, C., Busby, M., and Gehrels, G. 2011. Evolution of the Guerrero composite terrane along the Mexican margin, from extensional fringing arc to contractional continental arc. *Geological Society of America Bulletin*, v. 123, p.1776-1797.
- Centeno-García, E., Corona-Chavez, P., Talavera-Mendoza, O., and Iriondo, A., 2003, Geology and tectonic evolution of the Western Guerrero terrane— A transect from Puerto Vallarta to Zihuatanejo, México, in *Geologic Transects across Cordilleran México*. Guidebook for Field Trips of the 99th GSA Cordilleran Section Meeting, UNAM Instituto de Geología Publicación Especial no. 1, p. 201–228.

- Corona-Chávez, P., y Uribe Salas, J. A. 2009. “Atlas cartográfico-ambiental del Distrito Minero El Oro Tlalpujahua”. A. Consejo Estatal de Ciencia y Tecnología, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 105 pp.
- Corona-Chávez, P., Maldonado, R., Ramos-Arroyo, Y.R., Robles-Camacho, Lozano-Santa Cruz, R and Martínez-Medina, M. 2017. Geoquímica y mineralogía de los jales del distrito minero Tlalpujahua-El Oro, México y sus implicaciones de impacto ambiental. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v.34, núm. 3, p. 250-273.
- Dabrio, J.P., 2010, Playas. En A. Arche (Ed.), Madrid: *Sedimentología del proceso físico a la cuenca sedimentaria* (p. 441-501). *Textos Universitarios 46*. Consejo Superior de Investigaciones.
- Dabrio, J.P., 2010, Plataformas siliclásticas. En A. Arche (Ed.), Madrid: *Sedimentología del proceso físico a la cuenca sedimentaria* (p. 503-559). *Textos Universitarios 46*. Consejo Superior de Investigaciones.
- Davis, R.A., 1992, *DEPOSITIONAL SYSTEMS An Introduction to Sedimentology and Stratigraphy*. Prentice Hall, Second Edition, 604 pp.
- De la Teja Segura, M.A., Vergara-Martínez, A., Moctezuma- Salgado, M.D., 2000, Carta geológico-minera El Oro de Hidalgo E14-A16 escala 1: 50 000 estados de Guerrero México y Michoacán. Consejo de Recursos minerales, 50 pp. Informe
- Diaz-Zamora, R., 2017, Ventajas y Desventajas del análisis por ICP-MS de metales pesados en muestras biológicas. *Boletín Institucional, Instituto Nacional de Salud*, 23, p.54-59.
- Dickinson, W.R., 1985. Interpreting provenance relations from detrital modes of sandstone. En G.G. Zuffa, eds. *Provenance of arenitas*, p.333-361.
- Dickinson, W.R., and Lawton, T.F., 2001, Carboniferous to Cretaceous assembly and fragmentation of Mexico. *Geological Society of America Bulletin*, v. 113, p. 1142–1160.
- Flores, T. 1920. Estudio geológico minero de los distritos de El Oro y Tlalpujahua. *Boletín del Instituto de Geología (UNAM)*, No.37, 87 pp.

- Folk, R.L. (1974) *Petrology of Sedimentary Rocks*. Hemphill Publishing Company, Austin, 170 pp.
- Folk, R.L. (1980) *Petrology of Sedimentary Rocks*. Hemphill Publishing Company, Austin, 184 pp.
- Fregenal-Martínez, M.A., y Meléndez, N., 2010. Lagos y sistemas lacustres. En A. Arche (Ed.), *Madrid: Sedimentología del proceso físico a la cuenca sedimentaria* (p. 299-396). Consejo Superior de Investigaciones.
- Fries Jr C., Ross C., Obregón A. 1965 (1977). *Mezcla de Vidrios en los Derrames Cineríticos las Américas de la Región de El Oro-Tlalpujahua, Estados de México y Michoacán, Parte Centro meridional de México*. UNAM., Instituto de Geología. México D.F. 85 pp.
- Keppie, J. D., 2004, *Terranes of Mexico Revisited: A 1.3 Billion Year Odyssey*. *International Geology Review*, 46, p. 765-794.
- García-Hidalgo, J, F., Temiño, J., y Segura, M., 2010. Ambientes eólicos. En A. Arche (Ed.), *Madrid: Sedimentología del proceso físico a la cuenca sedimentaria* (p. 53-72). Consejo Superior de Investigaciones.
- Garzanti, E., 2016, *From static to Dynamic provenance análisis-Sedimentary petrology upgraded*. *Sedimentary Geology*, 336, p.3-13.
- Grajales, M., and López, M., 1984, *Estudio petrogenético de las rocas ígneas y metamórficas en el Prospecto Tomatlan-Guerrero-Jalisco*. Instituto Mexicano del Petróleo, Subdirección de Tecnología y Exploración, Proyecto C-1160 (unpublished).
- Gehrels, G., 2014. *Detrital Zircon U-Pb Geochronology Applied To Tectonics*. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 42, p.127-149.
- González-Fabián, M.C., Corona-Chávez, P. y Ornelas-Sánchez, M. (2002), *Nanoplancton y bioestratigrafía del Tithoniano-Aptiano de la secuencia metasedimentaria de Tlalpujahua, Michoacán, México: un acercamiento en base a un nuevo catálogo electrónico*. VIII Congreso Nacional de Paleontología, SOMEXPAL, Museo de Guadalajara.

- González-Fabián, M.C. Corona-Chávez, P. Ornelas M. (2006), Nanoplancton Jurásico Superior-Cretácico Inferior de la Región de Tlalpujahua, Michoacán, México. X Congreso Nacional de Paleontología, Guadalajara.
- Houghton P.D.W, Todd S.P and Morton A.C., 1991. Sedimentary provenance studies. Geological Society Special Publication, No.57, 1-11 pp.
- Krynine P, 1948, The megascopic study and field classification of sedimentary rocks. Journal of Geology, Vol. 56, No. 2, p. 130-165.
- Lapierre, H., Ortiz, L.E., Abouchami, W., Monod, O., Coulon, C., and Zimmermann, J.L., 1992, A crustal section of an intra-oceanic island arc: The Late Jurassic–Early Cretaceous Guanajuato magmatic sequence, central Mexico. Earth and Planetary Science Letters, v. 108, p. 61–77.
- McBride, E.G., 1963, A classification of common sandstones. Journal of sedimentary petrology, vol. 33, núm. 3, p.664-669.
- McLennan, S.M., Hemming, S., McDaniel, D.K., and Hanson G.N., 1993, Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics. Geological Society of America Special Paper 284, p. 21-40.
- McLennan, S.M., and Taylor, S.R., 1991. Sedimentary rocks and crustal evolution: Tectonic setting and secular trends. The Journal of Geology, vol. 99, num.1, p. 1-21.
- Ortega-Flores, B., 2017. Caracterización del límite Este de Terreno Guerrero mediante isotopía de Hf y geocronología U-Pb en zircones detríticos. UNAM-Centro de Geociencias, 255 pp. Tesis de doctorado.
- Ortega-Gutiérrez, F., 1978. Estratigrafía del Complejo Acatlán en la Mixteca Baja, estados de Puebla y Oaxaca. Revista del Instituto de Geología. Universidad Nacional Autónoma de México, v.2, p.112-131.
- Ortega-Gutiérrez, F., 1981. Metamorphic belts of southern Mexico and their tectonic significance. Geofísica Internacional, v.20, p.177-202.

- Ortega-Gutiérrez, F., Ruiz, J., and Centeno-García, E., 1995. Oaxaquia, a Proterozoico microcontinent accreted to North America during the late Paleozoic. *Geology*, v. 23, p. 1127-1130.
- Pantoja A. J. 1994. Formación Las Américas, Tlalpujahua, Michoacán, México- una reinterpretación de los datos petrográficos, petroquímicos, tectónicos y de los mecanismos de erupción. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. Vol. 11 número 2, p. 168-181.
- Pérez-Consuegra, N., y Cala-Pérez, A, F., 2016. Rocas sedimentarias: ¿cómo se forman y qué nos cuentan sobre el pasado?. *Hipótesis, apuntes científicos andinos*, núm. 20, p. 78-85.
- Pettijohn, F.J., and Potter, P.E., 1964, Atlas and glossary of primary sedimentary structures. Springer-Verlag-First Edition, 382 pp.
- Pettijohn, F.J., Potter, P.E., and Siever, R. (1987) Sand and Sandstone. Springer-Verlag, Second Edition, 618 pp.
- Prothero, R. Donald & Schwab, F., 2004, Sedimentary Geology: An introduction to sedimentary rocks and stratigraphy. W. H. Freeman and Company New York. Second edition, 557 pp.
- Pupin, J.P., 1980. Zircon and Granite Petrology. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 73, p. 207-220.
- Ramírez-Espinosa, J., Campa, M.F., Talavera, O., and Guerrero, M., 1991, Caracterización de los arcos insulares de la Sierra Madre del Sur y sus implicaciones tectónicas. *Convención sobre la evolución Geológica Mexicana, 1er Congreso Mexicano de Mineralogía, Pachuca, Memoir*, p. 163–166
- Rey, D., Vilas, F., Bernabéu A., and Rubio, B., 2010. Estuarios, rías y llanuras intermareales. En A. Arche (Ed.), Madrid: *Sedimentología del proceso físico a la cuenca sedimentaria* (p. 614-673). Consejo Superior de Investigaciones.
- Rivera- Ruiz, R.C., 2016. Estudio Petrográfico de la Secuencia Volcánico-Sedimentaria Mesozoica de la Región de Tlalpujahua, Michoacán. UAG-UACT, Tesis de Licenciatura, 93 pp.

- Rodríguez- López, J.P., y Arche, A., 2010. Deltas. En A. Arche (Ed.), Madrid: Sedimentología del proceso físico a la cuenca sedimentaria (p. 561-618). Consejo Superior de Investigaciones.
- Schaaf, P., Böhnell, H., and Pérez-Venzor, P.A., 2000, Pre-Miocene palaeogeography of the Los Cabos Block, Baja California Sur: Geochronological and palaeomagnetic constraints. *Tectonophysics*, v. 318, p. 53–69
- Sánchez-Zavala, J.L. & Centeno-García, E. (2005): Técnicas y aplicaciones al estudio de los sedimentos terrígenos de grano fino: procedencia y tectónica. 18 pp. (<http://www.geologia.unam.mx:8080/igl/index.php/difusion-y-divulgacion/temas-selectos/572-tecnicas-y-aplicaciones-del-estudio-de-los-sedimentos-terrigenos-de-grano-fino-procedencia-y-tectonica>; última consulta 29/05/2019).
- Sedlock, R., F. Ortega-Gutiérrez., and R.S. Speed, 1993, Tectonostratigraphic terranes and tectonic evolution of Mexico. Geological Society of America, Special Paper, 278, 153 pp.
- Silva, Ortiz I. y Salgado Soto, Z. 1988. Estudio estratigráfico estructural en la región de Tlalpujahuá-El Oro, edos de Michoacán y México. IPN-ESIA, Tesis de Licenciatura, 75 pp.
- Sopeña, A., y Sánchez-Moya, Y., 2010. Los sistemas aluviales. En A. Arche (Ed.), Madrid: Sedimentología del proceso físico a la cuenca sedimentaria (p. 73-83). Consejo Superior de Investigaciones.
- Spencer, C.J., Kirkland, C.L., and Taylor R.J.M., 2016, Strategies towards statistically robust interpretations of *in situ* U-Pb zircon geochronology. *Geoscience Frontiers*, 7, p. 581-589.
- Suárez, M., Cristián Ramirez, Ramiro Cortes, Felipe Llona, Christina Creixell, Adán Ramirez, César Vasques. 1993. Desarrollo de una nueva técnica de separación de circones mediante la incorporación de fluorescencia en estudios de datación U-Pb.
- Talavera-Mendoza, O., Ruiz, J., Gehrels, G.E., Valencia, V.A., y Centeno-García, E., 2007, Detrital zircon U/Pb geochronology of southern Guerrero and western Mixteca arc successions (southern Mexico): New insights for the tectonic evolution of the southwestern North America during the late Mesozoic. *GSA Bulletin*, v. 119, p. 1052-1065.

- Talavera-Mendoza, O., and Guerrero-Suastegui, M., 2000. Geochemistry and isotopic composition of the Guerrero Terrane (western México): Implications for the tectonomagmatic evolution of southwestern North America during the Late Mesozoic. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 13, p. 297–324
- Talavera, O., Ramírez, J., and Guerrero, M., 1995, Petrology and geochemistry of the Teloloapan subterrane: A Lower Cretaceous evolved intra-oceanic island arc. *Geofísica Internacional*, v. 34, p. 3–22.
- Tarbuck, E. J., & Lutgens, F. K. (2005). *Ciencias de la tierra: Una introducción a la geología física*. Madrid: Prentice Hall, Octava Edición, 712 pp.
- Tardy, M., Lapierre, H., Freydier, C., Coulon, C., Gill, J.B., Mercier de Lepinay, B., Beck, C., Martinez, J., Talavera, M., Ortiz, E., Stein, G., Bourdier, J.L., and Yta, M., 1994, The Guerrero suspect terrane (western Mexico) and coeval arc terranes (the Greater Antilles and the Western Cordillera of Colombia): A late Mesozoic intra-oceanic arc accreted to cratonal America during the Cretaceous. *Tectonophysics*, v. 234, p. 49–73.
- Tucker, M.E., 2003. *PETROLOGÍA SEDIMENTARIA Una Introducción al Origen de las Rocas Sedimentarias*. Blackwell Science, Tercera Edición, 288 pp.
- Weltje G.J., & Eyanatten, H.V., 2004, Quantitative provenance analysis of sediments: review and Outlook. *Sedimentary Geology* 171, p.1-11.
- Wetherill, G.W., 1956, Discordant Uranium-Lead Ages, I, *Transactions, American Geophysical Union*, vol.37, núm. 3, p.320-326.

Recursos web

Universidad de Alicante. Espectrometría de masas por plasma de acoplamiento inductivo. Consultado: 29 de junio de 2019. Recuperado de <https://ssti.ua.es/es/instrumentacion-cientifica/unidad-de-analisis/espectrometria-de-masas-por-plasma-de-acoplamiento-inductivo.html>

El clima típico de cualquier lugar del mundo. El clima promedio en Tlalpujahua de Rayón, México. Consultado: 07 de julio de 2019. Recuperado de <https://es.weatherspark.com>

Geología activa. Rocas sedimentarias. Consultado: 24 de octubre de 2019. Recuperado de <https://www.geologiaactiva.com>

Laboratorio de Estudios Isotópicos-Centro de Geociencias UNAM. Consultado: 10 de abril de 2020. Recuperado de http://terra.geociencias.unam.mx/~solar/index_files/LEI/Quienes_somos.html