



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

***CARACTERIZACIÓN PETROGRÁFICA Y  
GEOQUÍMICA DE CUERPOS ÍGNEOS  
COMPENDIDOS EN LA REGIÓN DE  
TEZIUTLÁN-CUETZALAN, PUEBLA***

**TESIS**

Que para obtener el título de

Ingeniera Geóloga

**P R E S E N T A**

NAIVY DENNISE RODAL MORALES

**DIRECTOR DE TESIS**

DR. ENRIQUE ALEJANDRO GONZÁLEZ  
TORRES



Ciudad Universitaria, Cd. Mx a agosto de 2019



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

## ÍNDICE

<b>1.</b>	<b>Generalidades</b> -----	<b>10</b>
	1.1. Introducción -----	10
	1.2. Objetivos -----	10
	1.3. Metodología -----	11
	1.4. Área de estudio -----	13
<b>2.</b>	<b>Marco Geológico General del Estado de Puebla</b> -----	<b>15</b>
	2.1. Contexto Tectónico Regional -----	16
<b>3.</b>	<b>Estratigrafía</b> -----	<b>19</b>
	3.1. Estratigrafía del noreste de Puebla de Teziutlán a Cuetzalan -----	19
<b>4.</b>	<b>Resultados</b> -----	<b>28</b>
	4.1. Descripción Petrográfica -----	28
	4.2. Geoquímica -----	52
	4.2.1. Elementos Mayores -----	52
	4.2.2. Elementos traza -----	56
<b>5.</b>	<b>Discusión</b> -----	<b>62</b>
<b>6.</b>	<b>Conclusiones y Recomendaciones</b> -----	<b>67</b>
<b>7.</b>	<b>Referencias</b> -----	<b>68</b>

## TABLA DE CONTENIDO

### FIGURAS

- **Fig. 1.** Metodología para los análisis geoquímicos
- **Fig. 2.** Ubicación geográfica del área de estudio
- **Fig. 3.** Mapa del área de estudio
- **Fig. 4.** Provincias fisiográficas en Puebla
- **Fig. 5.** Contexto tectónico regional de México
- **Fig. 6.** Evolución tectónica por la apertura del Golfo de México
- **Fig. 7.** Extensión del Arco Nazas
- **Fig. 8.** Columna estratigráfica general propuesta según las descripciones de trabajos previos de región: Nieto-Bender (2013), Ochoa Camarillo, et.al., (1998,1999), López-Palomino et al. (2005), Hernández Aguilar y Sarmiento Altamirano (1998), Moreno y Sánchez (2002) y Esquivel-Macías, et al. (2014)
- **Fig. 9.** Columnas estratigráficas propuestas después de haber realizado el trabajo de campo las cuales se separan por su ubicación, Cañada del Río Tecolutla y Teziutlán
- **Fig. 10.** Muestra de mano de la roca TNX-005
- **Fig. 11.** Imágenes en lámina delgada de la roca TNX-005
- **Fig. 12.** Muestra de mano de la roca TNX-008
- **Fig. 13.** Imagen lámina delgada de la roca TNX-008
- **Fig. 14.** Imagen en lámina delgada con y sin nícoles cruzados de la roca TNX-008
- **Fig. 15.** Muestra de mano de la roca TNX-011
- **Fig. 16.** Imagen lámina delgada de la roca TNX-011
- **Fig. 17.** Imagen lámina delgada de la roca TNX-012
- **Fig. 18.** Muestra con mayor aumento de la roca TNX-012
- **Fig. 19.** Imagen lámina delgada de la roca TNX-012
- **Fig. 20.** Acercamiento en lámina delgada de la roca TNX-012
- **Fig. 21.** Muestra de mano de la roca TNX-013
- **Fig. 22.** Muestra de mano de la roca TNX-014

- **Fig. 23.** Imagen en lámina delgada de la roca TNX-014
- **Fig. 24.** Muestra de mano de la roca TNX-015
- **Fig. 25.** Imagen en lámina delgada de la roca TNX-015
- **Fig. 26.** Muestra de mano de la roca OTNX-04
- **Fig. 27.** Imagen en lámina delgada de la roca OTNX-04
- **Fig. 28.** Diagrama TAS
- **Fig. 29.** Diagrama TAS de las rocas de la zona de Teziutlán-Cuetzalan, norte de Puebla
- **Fig. 30.** Representación del diagrama sílice contra potasio de Peccerillo y Taylor (1976)
- **Fig. 31.** Diagrama AFM de Kuno, 1968
- **Fig. 32.** Diagrama que muestra el comportamiento del Ni con respecto a la variación de sílice en las distintas rocas muestreadas
- **Fig. 33.** Diagrama que muestra el comportamiento del Rb con respecto a la variación de sílice en las distintas rocas muestreadas
- **Fig. 34.** Diagrama que muestra el comportamiento del Th con respecto a la variación de sílice en las distintas rocas muestreadas
- **Fig. 35.** Diagrama que muestra el comportamiento del Pb con respecto a la variación de sílice en las distintas rocas muestreadas
- **Fig. 36.** Diagrama que muestra el comportamiento del Sr con respecto a la variación de sílice en las distintas rocas muestreadas
- **Fig. 37.** Diagrama que muestra el comportamiento del Y con respecto a la variación de sílice en las distintas rocas muestreadas
- **Fig. 38.** Configuración aproximada del Arco Nazas en México
- **Fig. 39.** Correlación Triásica-Jurásica de las rocas relacionadas con el magmatismo del Arco Nazas en la región centro-norte y noreste de México

## TABLAS

- **Tabla 1.** Muestra las rocas laminadas y analizadas petrográficamente
- **Tabla 2.** Muestras estudiadas y su ubicación
- **Tabla 3.** Descripción de muestra de mano TNX-005
- **Tabla 4.** Descripción en lámina delgada TNX-005
- **Tabla 5.** Descripción en muestra de mano TNX-008
- **Tabla 6.** Porcentajes en lámina delgada de la roca TNX-008
- **Tabla 7.** Porcentajes en lámina delgada de la roca TNX-011
- **Tabla 8.** Descripción en lámina delgada de la roca TNX-012
- **Tabla 9.** Porcentajes en lámina delgada de la roca TNX-014
- **Tabla 10.** Descripción en muestra de mano de la roca TNX-015
- **Tabla 11.** Porcentajes en lámina delgada de la roca TNX-015
- **Tabla 12.** Descripción en muestra de mano de la roca OTNX-04
- **Tabla 13.** Descripción en lámina delgada de la roca OTNX-04
- **Tabla 14.** Análisis químicos de elementos mayores con su corrección de acuerdo con el contenido de volátiles de la zona noreste de Puebla (Teziutlán a Cuetzalan).
- **Tabla 15.** Análisis químicos de elementos traza de la zona noreste de Puebla de Teziutlán a Cuetzalan
- **Tabla 16.** Resumen de resultados de las rocas ígneas estudiadas de Teziutlán a Cuetzalan, Puebla.

*La presente tesis de licenciatura es una investigación realizada en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), como parte del proyecto PAPIIT-DGAPA-UNAM y el proyecto IN-118819 “Evolución tectono-sedimentaria de la región sur de la Sierra Madre Oriental durante el Jurásico”.*

*Agradezco a la DGAPA-UNAM por la beca recibida.*

## AGRADECIMIENTOS

*La siguiente tesis fue posible gracias a la participación y apoyo de numerosas personas e instituciones, entre ellas el Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía (LANGEM) del Instituto de Geología, UNAM por el trabajo realizado en la preparación y análisis de las muestras el cual está dirigido por la Quím. María Patricia Girón García a quien le ofrezco mi gratitud por la ayuda que me brindó durante la preparación de muestras; así como mi agradecimiento a la Mtra. María Del Consuelo Macías Romo por su buena disposición y apoyo para poder realizar la molienda de las rocas en el Laboratorio de Geoquímica del Instituto de Geología, UNAM.*

*Al Dr. Enrique Alejandro González Torres, mi director de tesis, por pensar en mí para hacer esta investigación, y que con su dirección, conocimiento y experiencia fue posible realizar este trabajo, encontrando en él una persona amiga con gran calidad humana y un guía que me motivaba a seguir investigando y creciendo.*

*Al Dr. Gilberto Silva Romo, por su experiencia y orientación durante la realización de la tesis, así como apoyo y guía durante el trabajo en campo, mostrando siempre sus valores y enriqueciendo el trabajo con sus ideas.*

*A la Dra. Laura Mori, por sus comentarios y consejos durante la realización de mi tesis y a lo largo de mi formación escolar.*

*A la Dra. Claudia C. Mendoza Rosales por la ayuda y guía durante el trabajo en campo, así como, sus valiosos comentarios que enriquecieron esta tesis.*

*Finalmente, al Mtro. Emiliano Campos por enriquecer la tesis con sus comentarios y siempre tener una buena actitud que me motivaba a trabajar durante el día.*

*De la misma manera, el esfuerzo realizado para la creación de esta tesis no es sólo de quien la firma, sino de un conjunto de personas que moral, material y de manera desinteresada, salvo el llegar a titularme, participaron con sus comentarios, opiniones y guía en el desarrollo y buen fin de esta. Las personas a las que me refiero son, entre otras, al Dr. Aldo Ramos Rosique por el tiempo, guía y comentarios que me brindó durante el análisis de las láminas delgadas; a la Mtra. Isabel Domínguez Trejo por todo su apoyo y consejos durante todo este proceso, y al Ing. Orestes Antonio de la Mora, gracias por tomarte el tiempo de explicarme el funcionamiento de QGIS para la realización del mapa de tesis.*

*A mi familia, por nunca dejarme sola, por confiar en mí siempre y darme ánimos para salir adelante, por enseñarme que trabajando duro y constante se*

*logran los sueños y metas. En especial, gracias a mis padres, Irma y Gustavo, por su amor y compañía. A mis tíos Nenán y Efraín por sus enseñanzas y por compartirme su pasión por la lectura y la investigación. A mi tía, Amelia (mi hermana), por su cariño y apoyo. Y a mis primos, Osqui y Efrainsito, por siempre estar para mí, no importa la hora ni el motivo, y por todas las risas que hemos pasado. Finalmente, quiero dedicar esta tesis a mi abuelita “Mamá Martha” porque, aunque ya no estás con nosotros, sé lo orgullosa y lo emocionada que estarías de mí por concluir esta etapa en mi vida.*

*A mis amigos, por su ayuda y apoyo siempre, por todos esos momentos de risas y trabajo que pasamos a lo largo de la carrera, y en especial, por todos esos momentos que vivimos durante las prácticas de campo donde crecimos como Ingenieros Geólogos.*

*Por último, quiero agradecer a la UNAM por la oportunidad que me brindó de estudiar en esta gran casa de estudios y a todos los profesores que tuve durante toda mi etapa estudiantil, por sus enseñanzas y sobre todo por las grandes experiencias y aprendizajes vividos tanto en las clases como en las prácticas de campo.*

**Una vez más, ¡Gracias a todos!**

## RESUMEN

El área de estudio de este trabajo se encuentra al noreste del estado de Puebla, entre Teziutlán y Cuetzalan, y forma parte de la Subprovincia de Carso Huasteco casi al límite entre las provincias geológicas Sierra Madre Oriental y Faja Volcánica Transmexicana. En esta región afloran sucesiones clásticas con componentes volcánicos y depósitos de flujos piroclásticos asignados al Jurásico Medio, conforme a sus relaciones estratigráficas.

Con base en estudios petrográficos y geoquímicos de ocho rocas ígneas de la zona citada, se identificaron litologías que, asociadas a los resultados geoquímicos obtenidos de algunas muestras, me permitieron realizar una breve inferencia tectónica que deja abierta la discusión sobre el posible origen tectónico de las sucesiones volcánicas de la región, a fin de valorar su afinidad con el Arco Nazas o, por el contrario, asociado al proceso de *rifting* desarrollado durante la apertura del Golfo de México.

De acuerdo con los resultados geoquímicos realizados en el presente trabajo, se reconocieron dos grupos de rocas clasificadas con diferentes afinidades tectónicas: 1) El conjunto Teziutlán, posiblemente relacionado con la apertura del Golfo de México, cuyas rocas afloran en las cercanías de Teziutlán, Puebla, y que incluye a la toba cristalina, basalto de olivino y una andesita de la serie alcalina (traquidacita), y 2) El conjunto Cuetzalan, posiblemente relacionado con el magmatismo del Arco Nazas, expuesto en las cercanías de Cuetzalan, que consiste en rocas piroclásticas, ignimbritas de composición riolítica, altamente alteradas y silicificadas con bandeamiento marcado, las cuales son muy semejantes a las reportadas previamente por otros autores en la sección del Arroyo de San Antonio en Charcas, San Luis Potosí, asociadas al Arco Nazas. Además, el conjunto que aquí se reporta, incluye una brecha volcánica con fragmentos de ignimbrita. Por otra parte, las firmas geoquímicas de algunas rocas del basamento (reportadas previamente en la región) igualmente presentan la dualidad geoquímica mencionada.

## 1. GENERALIDADES

### 1.1 Introducción

La Sierra Madre Oriental (SMO) está constituida predominantemente por una amplia variedad de rocas sedimentarias marinas clásticas y calcáreas del Mesozoico (*Fitz et al., 2018*), las cuales en algunos sectores sobreyacen a rocas ígneas del Triásico y Jurásico Inferior-Medio (*Padilla y Sánchez, 1982; Barboza-Gudiño et al., 2014; Bartolini et al., 2003*).

Dichas sucesiones de rocas volcánicas del Jurásico Temprano y Medio han sido estudiadas en los años recientes, y se les ha asociado con el Arco Nazas, principalmente en el sector norte del país (*Bartolini, Barboza et al., 2003, Lawton y Molina, 2014; Zavala et al., 2012, entre otros*). Sin embargo, en el área de estudio, las relaciones estratigráficas que las rocas volcánicas y volcanoclásticas presentan con la Formación Huayacocotla, no descartan la posibilidad de que el origen de algunas de estas rocas se encuentre vinculado al proceso de *rifting*, desarrollado durante la apertura del Golfo de México (*Zavala et al., 2012; Martini y Ortega, 2018*). De tal forma, que esta región constituye una zona de confluencia de dos dominios tectónicos, en la que es necesario caracterizar a mayor detalle los cuerpos ígneos presentes.

El área que se investigó en esta tesis se ubica al noreste del estado de Puebla, y forma parte de la SMO; está descrita en trabajos anteriores (*Hernández-De la Fuente, R.A., 1996*) como una región donde afloran, entre otras litologías, rocas de la Formación Tenexcate la cual ha sido caracterizada en forma limitada, además de que no se detalla el origen de las rocas volcánicas que la conforman (*Hernández-De la Fuente, R.A., 1996*). Debido a su contexto estratigráfico, las sucesiones clásticas con componentes volcánicos y los depósitos de flujos piroclásticos que constituyen a la Formación Tenexcate, expuesta en el área de estudio, representan una oportunidad para valorar sus afinidades tectónicas.

### 1.2 Objetivos

Realizar la caracterización petrográfica y estudios de geoquímica de elementos mayores y traza en algunas muestras de roca que constituyen la Formación Tenexcate, y analizar los resultados obtenidos, a fin de efectuar inferencias sobre su afinidad tectónica. Esta información contribuirá al entendimiento de la evolución tectónica de la región durante el Jurásico Medio.

### 1.3 Metodología

Se integró la información de los trabajos previos del área de estudio para seleccionar la ruta y las localidades a visitar. El trabajo de campo consistió en la visita a las localidades en donde se hubiese reportado, en estudios previos, afloramientos de rocas ígneas que fueran parte de la Formación Tenexcate, con la finalidad de corroborar sus litologías constituyentes, así como sus relaciones estratigráficas. De la misma manera, se tomaron muestras para realizar estudios petrográficos (lámina delgada) y geoquímicos (elementos mayores y elementos traza).

La preparación para la petrografía consistió en el secado de muestras y toma de fotografías para posteriormente seleccionar las rocas que iban a ser enviadas a laminación (por parte de la empresa Petroanálisis). Las láminas recibidas fueron dos por cada una de las siete rocas enviadas (*Tabla 1.*), las cuales fueron descritas petrográficamente utilizando dos microscopios ZEISS-Primotech, uno a cargo del Ing. Alfredo Victoria Morales y el segundo, a cargo del Dr. Aldo Ramos Rosique.

La realización de los estudios geoquímicos requirió la preparación de las muestras en el Laboratorio de Separación de Minerales del Instituto de Geología, UNAM, donde fueron trituradas y posteriormente molidas. Se realizaron los análisis de Fluorescencia de Rayos X (siguiendo el método de *Lozano-Santa Cruz, et.al., 1995*) en el Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía (LANGEM) del Instituto de Geología, UNAM donde se obtuvieron los elementos mayores y elementos traza básicos (*Fig.1.*).

Tabla 1. Muestra las rocas que fueron enviadas a Petroanálisis para laminación y posterior análisis petrográfico.

	TNX-005
	TNX-011
	TNX-008
	OTNX-04
	TNX-014
	TNX-015
	TNX-012

El análisis de los elementos traza se realizó con esta técnica como una primera aproximación a la geoquímica de las rocas, donde se obtuvieron los elementos Rb, Sr, Ba, Y, Zr, Nb, V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Th y Pb (*Tabla 15.*), debido a que la mayoría de las rocas se encontraban en contacto directo con agua, además de presentar una edad Jurásica Media, por lo que las alteraciones y meteorización a lo largo del tiempo eran muy evidentes, sugiriéndonos una geoquímica posiblemente afectada por estos factores.

Los resultados geoquímicos se analizaron con la realización de diagramas de composición (TAS), sílice contra potasio, diagrama de Kuno, 1968 y diagramas de variación de los elementos traza con respecto al sílice. Finalmente, se interpretó la información obtenida para poder explicar una clasificación de las rocas con su posible implicación tectónica regional cumpliendo con los objetivos de la tesis previamente establecidos.

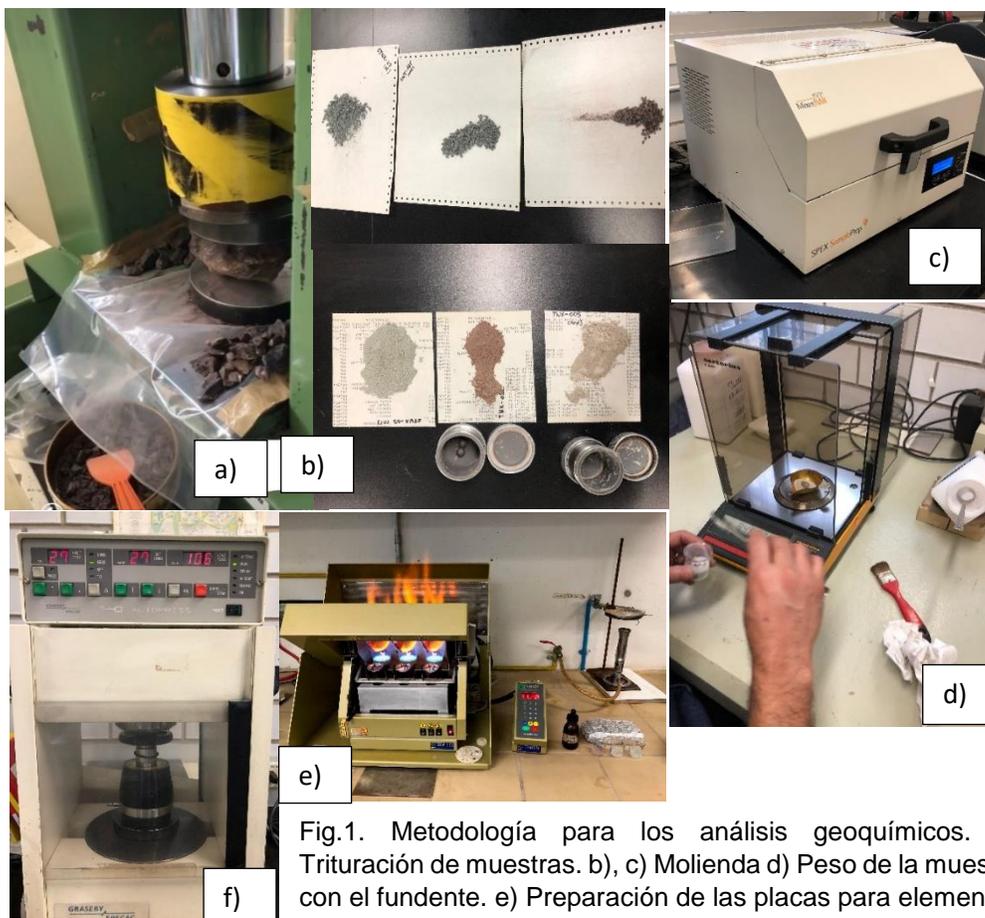


Fig.1. Metodología para los análisis geoquímicos. a) Trituración de muestras. b), c) Molienda d) Peso de la muestra con el fundente. e) Preparación de las placas para elementos mayores. f) Preparación de las placas para elementos traza.

## 1.4 Área de Estudio

El área de estudio está localizada al noreste del estado de Puebla, en la cañada del Río Tecolutla (cerca de Cuetzalan); en los alrededores de la Presa La Soledad; en los alrededores del poblado de Buenavista, y en la carretera rumbo a Mazatepec, cerca del poblado de Teziutlán (*Fig.3.*)

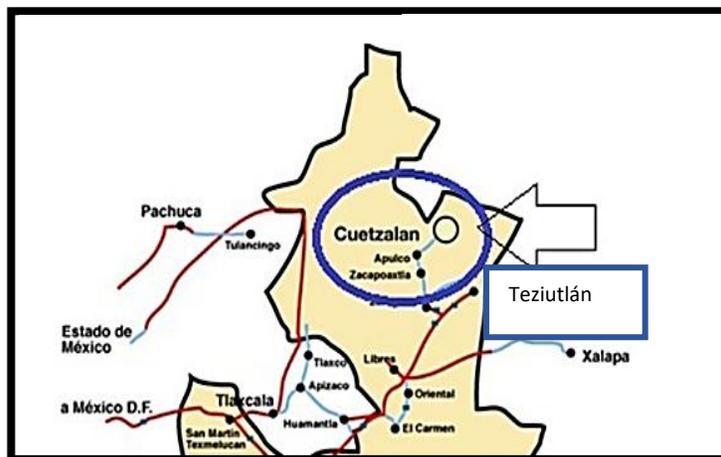


Fig.2. Ubicación geográfica del área de estudio. Modificada de WordPress.com

Cuetzalan se encuentra a dos horas de distancia de la ciudad de Puebla y colinda con Jonotla, que está a 210 km de la capital (*Fig.2.*). Para llegar a la cañada del río Tecolutla, donde se recolectó la mayor cantidad de muestras, se toma la carretera número 150 México-Puebla en dirección a Amozoc; posteriormente, se toma la desviación a Perote (antes de la caseta de Amozoc, que conecta con la autopista Oriental a Teziutlán). Al entrar a Zaragoza se sigue por la dirección Apulco incorporándose a la carretera federal número 129 hacia Zacapoaxtla. Pasando el poblado de Apulco existe una desviación a Jonotla, antes de llegar a la población de Cuetzalan, tomando la carretera estatal 575, llegando finalmente al punto deseado.

El trabajo de campo y la recolecta de muestras para los análisis geoquímicos y descripciones petrográficas se encuentran resumidos en la siguiente tabla (*Tabla 2.*):

LOCALIDADES	COORDENADAS UTM	MUESTRAS DE MANO
1) Poblado de Jaltepec, cañada del Río Tecolutla	14Q0651718mE, 2217445mN, altitud 326m	TNX-011 TNX-012 TNX-013- TNX-014
2) Carretera a Teziutlán	14Q0669896mE, 2193047mN, altitud 1938m.	TNX-008
3) Carretera a Mazatepec	14Q0658775mE, 2196535mN, altitud 1835m	TNX-005
4) Presa La Soledad	14Q0662204mE, 2208440mN, altitud 749m	TNX-015
5) Buenavista	14Q0595018mE, 2103268mN, altitud 1938m.	OTNX-04

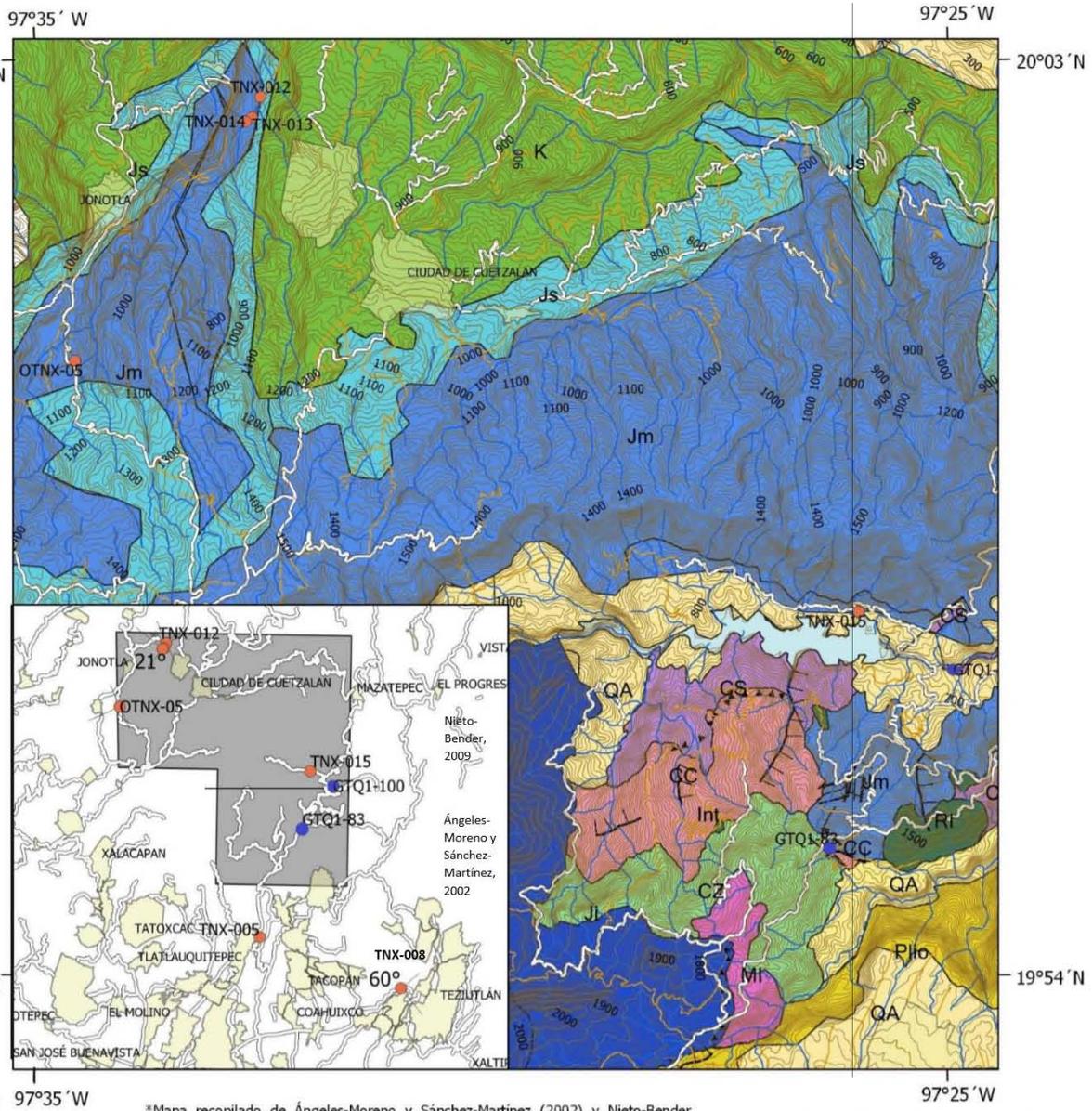
Tabla.2. Muestras estudiadas y su ubicación (WGS84).



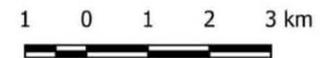
**SIMBOLOGÍA**

- Curvas de Nivel
- Secundarias
  - Maestras
  - Localidades
  - Área Urbana
  - Caminos
  - Carreteras
  - Cuerpos de Agua
  - ⊥ Falla Normal
  - ▲▲▲ Falla Inversa
  - ⇄ Falla Lateral
- Quaternario (QA)- Ignimbrita Xaltipan
- Plioceno (Plio)- Fm. Teziutlán
- Cretácico (K)- Fm. Tamaulipas/Agua Nueva
- Jurásico Superior (Js)- Fm. San Andrés
- Jurásico Medio (Jm)- Fm. Tenexcate
- Jurásico Inferior (Ji)- Fm. Huayacocotla
- Intrusivo Riolítico (RI)
- El Mirador (MI)
- Complejo La Soledad (CS)
- Cozolexco (CZ)
- Chicuaco (CC)
- Carbonífero - Permiano (Car-Per)
- Localidades Tesis Moreno E. y Sánchez S. (2002)

RODAL MORALES NAIVY DENNISE  
Tesis de Licenciatura UNAM Facultad de Ingeniería 2019



\*Mapa recopilado de Ángeles-Moreno y Sánchez-Martínez (2002) y Nieto-Bender (2009) UTM 14N, datum NAD83 (2011).  
La base topográfica fue tomada de las cartas topográficas de INEGI, Teziutlán (2018) E14B15 y Cuetzalan (1999) F14D85, escala 1:50000.



**Fig.3. Mapa Geológico del Área de Cuetzalan-Teziutlán, Puebla donde se ubica la localización de las muestras estudiadas.**

## 2. MARCO GEOLÓGICO GENERAL DEL ESTADO DE PUEBLA

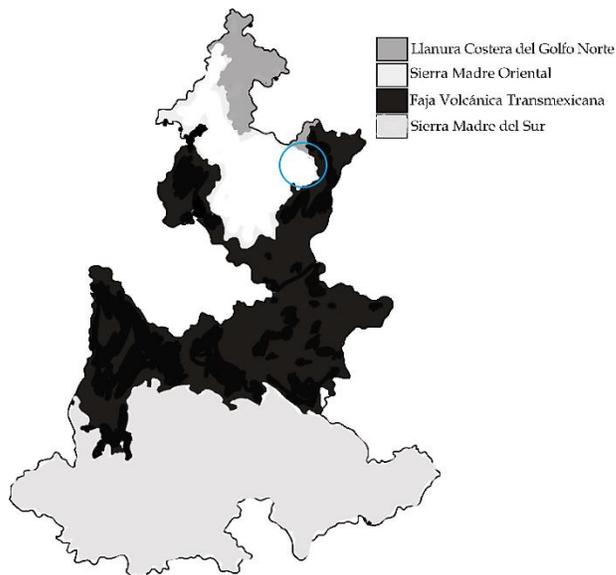


Fig. 4. Provincias Fisiográficas en Puebla. Círculo azul marca la región estudiada. (INEGI, 1987)

El área de estudio se ubica al noreste del estado de Puebla, casi al límite de la Provincia Fisiográfica Sierra Madre Oriental, frontera con el Faja Volcánica Transmexicana, en la Subprovincia de Carso Huasteco (regionalización fisiográfica de la DGG, 1981) (Fig.4.), que corresponde al cinturón de pliegues y cabalgaduras de la Sierra Madre Oriental con orientación NW-SE en el centro de México y E-W en el noreste del país, con alturas de casi 3000 msnm (Fitz-Díaz, et.al., 2018).

En la región de Cuetzalan, principalmente se reconoce el relieve representativo de las rocas carbonatadas (de la Formación San Andrés) como lo son los sistemas kársticos y las pequeñas dolinas (Espinosa, 1994 in Nieto-Bender, 2013, p.13). El relieve volcánico en la zona, que es mucho más joven, está conformado por rocas piroclásticas silíceas altamente meteorizadas con drenaje denso que llega a cubrir las rocas continentales y marinas, junto con los derrames de basaltos. Por otro lado, el relieve acumulativo de origen fluvial se encuentra en el valle del Río Tecolutla (Nieto-Bender, 2013).

Geológicamente, el territorio de Puebla está constituido por rocas con edades que varían desde el Precámbrico hasta el Cuaternario. Su unidad más antigua, con un pequeño afloramiento al sureste del estado, está conformada por rocas metamórficas (900-1100Ma) las cuales pertenecen al Complejo Oaxaqueño y conforman el basamento (Fitz-Díaz, et.al., 2018); sin embargo, gran parte del estado muestra rocas del Triásico-Jurásico con sedimentación de capas rojas, y secuencias de calizas del Cretácico, que forman parte del sector sur, de la Sierra Madre Oriental. (Padilla y Sánchez, R.J., 2007; Barboza-Gudiño, et al., 2014)

La parte noroeste de Puebla comprende los municipios de Huayacocotla, Cuetzalan y Tlatlauquitepec donde aflora la Formación de Huyacocotla, siendo la unidad más antigua del Anticlinorio de Huayacocotla (Ochoa-Camarillo, et.al., 1998), que es la mayor estructura constituyente de la Sierra Madre Oriental, la cual está conformada por una secuencia de areniscas y limolitas deformadas del Jurásico Inferior. Por otro lado, la parte centro-sur de Puebla presenta afloramientos de la

era Mesozoica y una alternancia de depósitos marinos y continentales del Jurásico Medio. (Esquivel-Macías et.al., 2014)

## 2.1. Contexto Tectónico Regional

Trabajos anteriores (Hernández-Madriral, et al., 2007 y Hernández-De la Fuente, R.A., 1996) sitúan a la Formación Tenexcate con edades del Jurásico Medio (Bathoniano). Durante esta etapa, y debido a su ubicación, las sucesiones del norte de México pueden ser agrupadas en dos diferentes escenarios tectono-stratigráficos: 1) el este de México influenciado por el rompimiento del sector centro-occidental de Pangea, que se vincula a la apertura del Golfo de México, la cual tuvo una duración de aproximadamente 46 Ma, desde el Triásico Tardío (210Ma) hasta el Jurásico Medio Tardío (169Ma) (Padilla y Sánchez, 2007; Pindell et al., 2016; Martini y Ortega-Gutiérrez, 2018); y 2) el magmatismo controlado por la subducción de la placa Farallón (en el oeste de México) que depositó rocas volcanoclásticas e ígneas intermedias a félsicas en el norte del país (Martini y Ortega-Gutiérrez, 2018) (Fig.5.)

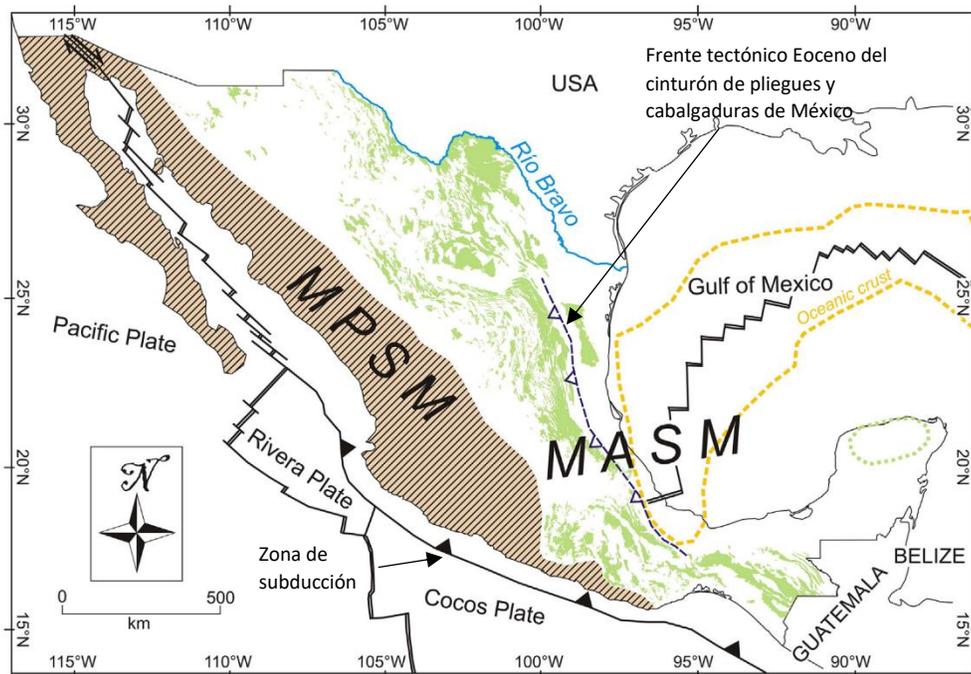


Fig.5. Contexto tectónico regional de México. Tomada de Martini y Ortega-Gutiérrez, 2018. \*MASM= Sistema Mesozoico Atlántico de México y MPSM=Sistema Pacífico Mesozoico de México. Área de color verde representa las rocas expuestas del MASM, mientras que la punteada son las caracterizadas mediante pozos petroleros.

El primer escenario muestra un cambio general de deposición de sedimentos fluviales (siliciclásticos, carbonatos superficiales y evaporitas), durante el Jurásico, a las sucesiones marinas marginales del Cretácico (carbonatos de plataforma,

lutitas marinas profundas y carbonatos pelágicos), lo cual fue tomado como evidencia de que el registro geológico del Sistema Mesozoico Atlántico de México (MASM) se depositó durante un aumento eustático global de primer orden, relacionado con la expansión del fondo marino en el océano Atlántico y el Golfo de México (Martini y Ortega-Gutiérrez, 2018; Padilla y Sánchez, 2007).

El rompimiento de Pangea generó estadios de rift y drift (Fig.6.) representados en forma de fallas que definen los altos y bajos topográficos (horst y graben) que posteriormente fueron rellenados con las sucesiones clásticas marginales-marinas mencionadas; sin embargo, en ciertas zonas se tienen problemas para encontrar a las fallas responsables del adelgazamiento de la corteza (Martini y Ortega-Gutiérrez, 2018). Así mismo, la presencia de lechos rojos depositados en las depresiones continentales, cuya geometría estuvo controlada por los grabenes estrechos, con direcciones aproximadamente paralelas a la actual línea de costa, (Padilla y Sánchez, 2007), es otra evidencia de los cambios eustáticos debido al rompimiento de Pangea.

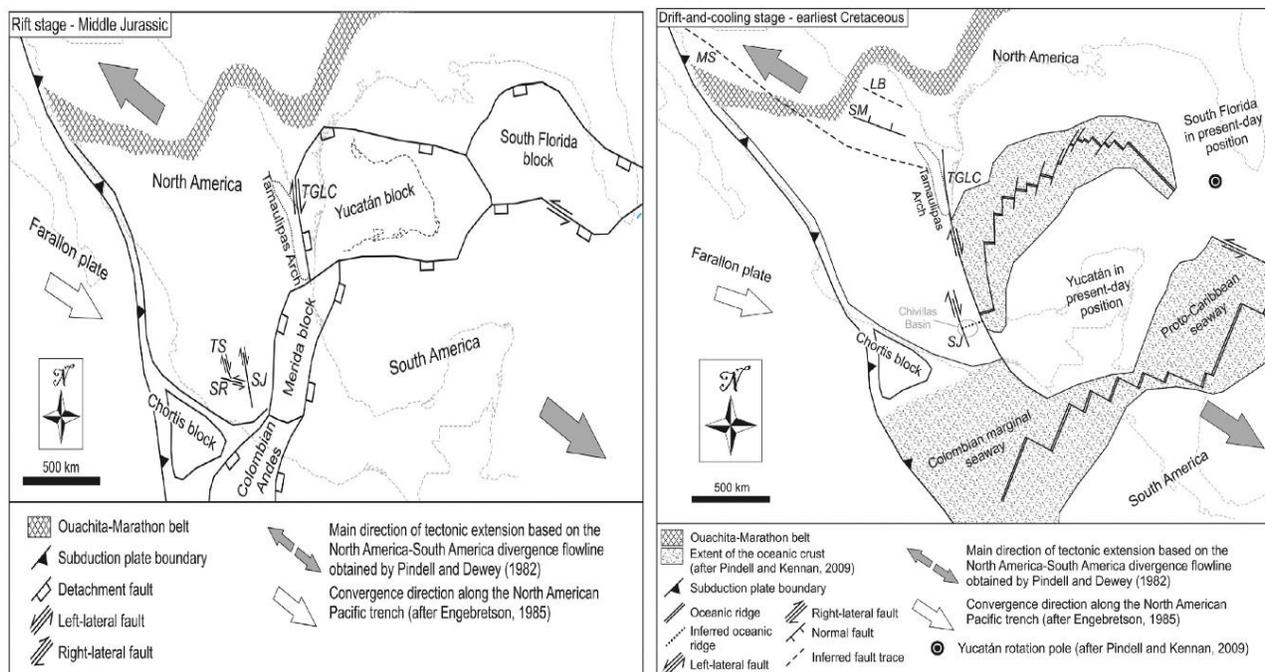


Fig.6. Evolución tectónica por la apertura del Golfo de México. Tomada de M. Martini, F. Ortega-Gutiérrez, 2018.

De la misma manera, el segundo escenario tectonoestratigráfico de México, es el magmatismo atribuido al Arco Nazas (López-Infanzón, 1986; Bartolini, et.al., 2003; Rubio-Cisneros, et.al., 2011 y Lawton y Molina-Garza, 2014) definido por Bartolini (2003), como un arco discontinuo de secuencias de rocas volcánicas, volcanosedimentarias y plutones graníticos que se extiende por Sonora, Baja

California, Chihuahua, Coahuila, Durango, Zacatecas y San Luis Potosí, hasta Chiapas y Guatemala, siendo la continuación sur del arco magmático continental Jurásico del oeste de EUA (Fig.7.).

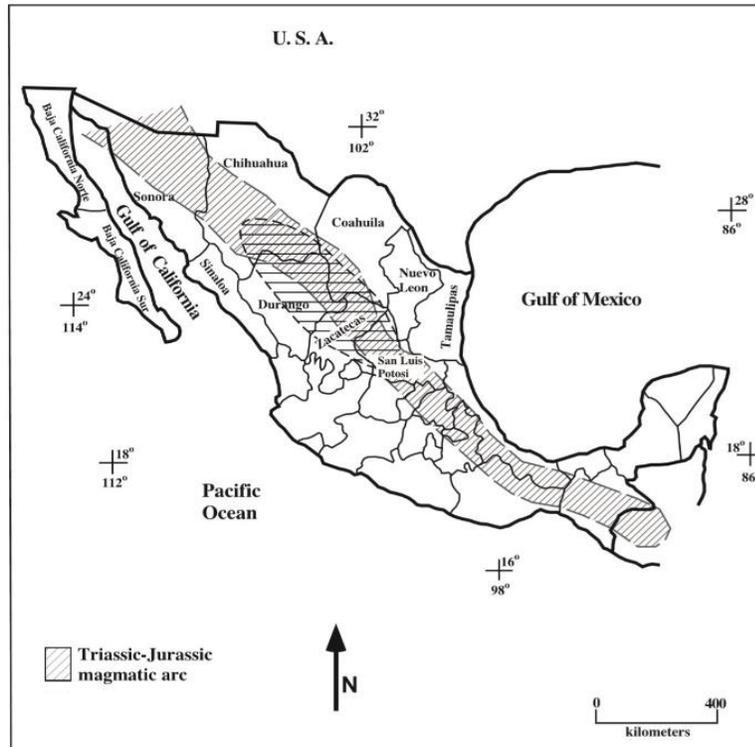


Fig.7. Extensión del Arco Nazas, Bartolini, et.al., 2003.

El Arco presenta como litología predominante riolitas, andesitas y dacitas, las cuales se clasifican, principalmente, como rocas calcoalcalinas de edades Triásicas Tardías a Jurásicas Medias; aunque también presenta algunas rocas alcalinas como las traquitas y traquiandesitas (*Pantoja-Alor, 1972 y Barboza-Gudiño, et.al., 2014*). Principalmente en Durango y el norte del país es donde se encuentran las riolitas y riolitas ignimbríticas que rondan en un porcentaje de 70-77% en contenido de sílice. En cambio, las rocas piroclásticas, que incluyen brechas y tobas de composición félsica a intermedia, se ubican más al centro del país. Por lo tanto, en general, se observan rocas con un rango de sílice que va desde el 35% al 80%, con un alto contenido de potasio, entre 7% y 8%. Además, en cuanto a rasgos geoquímicos de elementos traza, el Rb es consistentemente bajo, pero variable con respecto al Sr (*Bartolini, et.al., 2003*).

### 3. ESTRATIGRAFÍA

#### 3.1 Estratigrafía del Noreste de Puebla De Teziutlán-Cuetzalan

Las investigaciones geológicas que se han realizado en el noreste del estado de Puebla, desde los trabajos por parte de PEMEX (1967) hasta las tesis más recientes de Ángeles-Moreno y Sánchez-Martínez (2002) y Gutiérrez-Trejo (2019), establecen la presencia de las siguientes formaciones en el área de estudio que se describirán a continuación (Fig.8):

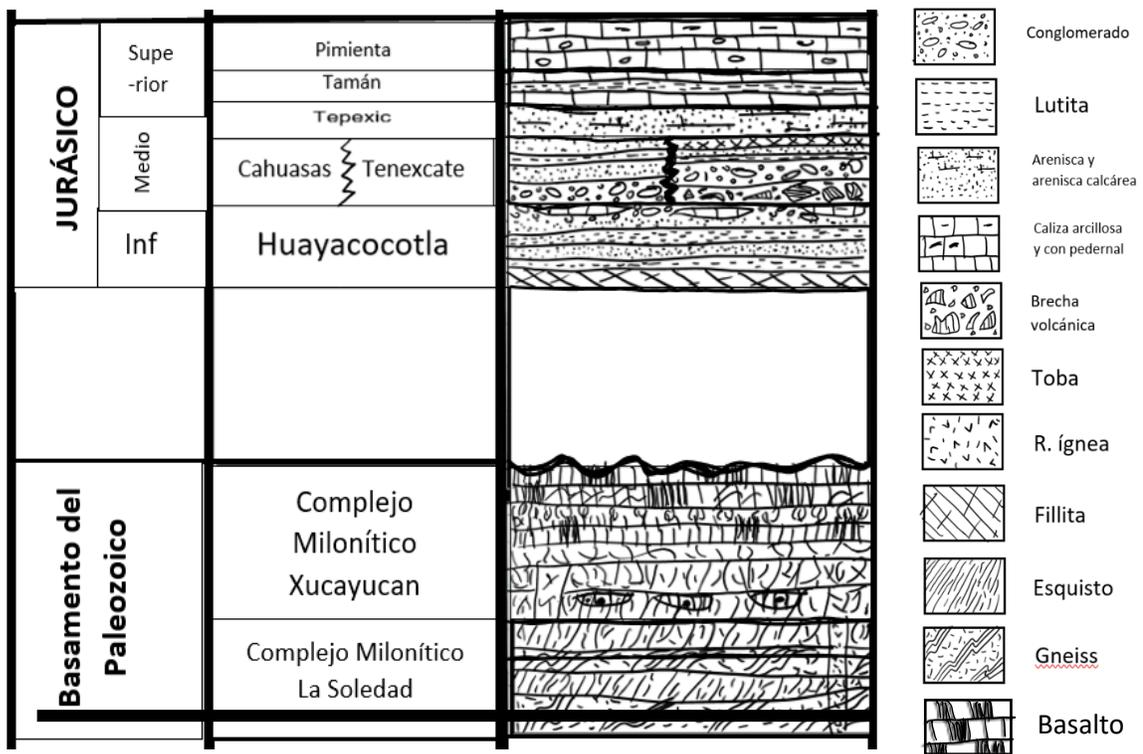


Fig.8. Columna estratigráfica general propuesta según descripciones de Carrillo-Bravo, J., 1965; Carrillo-Bravo, 1971; Ochoa-Camarillo, et. al., 1998; Ángeles-Moreno y Sánchez-Martínez, 2002; López-Palomino et al., 2005; Nieto-Bender, 2013; Esquivel-Macias et al., 2014 y Gutiérrez-Trejo, 2019.

#### Paleozoico

##### I. Basamento

- **Complejo Milonítico La Soledad**

Edad:  $298.9 \pm 0.15\text{Ma}$  (Gutiérrez-Trejo, 2019)

Ángeles-Moreno y Sánchez-Martínez (2002) describen al complejo como gneises miloníticos cuarzo-feldespáticos bandeados (como litología predominante)

intercalados por paquetes de esquistos de biotita, epidota y cuarzo. También, describen mármoles miloníticos y metagabros.

El área de estudio fue la zona del macizo de Teziutlán, hacia la margen norte y sur del Río Apualco; en la zona de la Presa la Soledad y en la región noreste de Atotocoyan (*Gutiérrez-Trejo, 2019*). Aguas abajo de la Presa, se aprecian los relictos de un posible protolito granítico, y en el Río Xocoyoalco y Cozolexco se describen diques félsicos dentro de los gneises miloníticos cuarzo-feldespáticos de grano más fino (*Ángeles-Moreno y Sánchez-Martínez, 2002*).

Las rocas se encuentran en contacto tectónico con el complejo milonítico Xuyucan. Así mismo, los gneises cuarzo-feldespáticos son cubiertos discordantemente por la ignimbrita Xaltipan, según lo observado en el Río Apulco y en Chalchihuapan (*Ángeles-Moreno y Sánchez-Martínez, 2002; Gutiérrez-Trejo, 2019*).

- **Complejo Milonítico Xucayucan** (*Ángeles-Moreno y Sánchez-Martínez, 2002*)

Está compuesto por tres unidades litodémicas: Chicauco, Cozolexco y El Mirador.

-Unidad Chicauco, edad:  $298.9 \pm 0.15\text{Ma}$  (*Gutiérrez-Trejo, 2019*)

Unidad metamórfica compuesta por bandas de esquistos miloníticos de clorita, muscovita, albita y cuarzo con menor cantidad de bandas de esquistos de cuarzo, muscovita, feldespato potásico, plagioclasa, epidota y clorita en paquetes intercalados de cuarcitas, y ocasionalmente, la presencia de diques de actinolita, albita y clorita, y bandas de cuarzo con *boudinage*. En el río Cozolexco se aprecia esta unidad aflorando con fuerte oxidación en tonalidades rosa-rojizo. (*Ángeles-Moreno y Sánchez-Martínez, 2002*).

La unidad se encuentra sobreyaciendo estructuralmente a los gneises miloníticos cuarzo-feldespáticos del Complejo La Soledad y se ha clasificado en facies de esquistos verde. Los resultados se interpretaron como protolitos volcanosedimentarios marinos, por la intercalación con pedernal, la laminación fina y una intercalación con cuarcitas. (*Ángeles-Moreno y Sánchez-Martínez, 2002; Gutiérrez-Trejo, 2019*).

-Unidad Cozolexco, edad:  $298.9 \pm 0.15\text{Ma}$  (*Gutiérrez-Trejo, 2019*)

Otra unidad metamórfica constituida por metabasaltos con actinolita y clorita, con texturas relictas de almohadillas (*Ángeles-Moreno y Sánchez-Martínez, 2002*); lavas y diques metabasálticos que van de protomilonitas a ultramilonitas. En algunas zonas, según la tesis de Ángeles-Moreno y Sánchez-Martínez (2002), se observa el desarrollo de bandas de esquistos miloníticos de serpentina y epidota. Así mismo,

encontraron pedernal intercalado con los metabasaltos por lo que como protolito establecieron rocas basálticas y andesíticas.

Estratigráficamente, esta unidad se encuentra subyaciendo discordantemente a la secuencia de la Formación Tenexcate; sin embargo, hay ocasiones que el contacto se esconde por fallamiento lateral o por diques riolíticos. En otras zonas, el complejo se encuentra subyaciendo a la Formación Huayacocotla, oculta por el emplazamiento de sills riolíticos. Se menciona, que en Ocotepéc la unidad Cozolexco se encuentra sobreyacida discordantemente por la ignimbrita Xaltípan (*Ángeles-Moreno y Sánchez-Martínez, 2002; Gutiérrez-Trejo, 2019*).

-Unidad El Mirador, edad:  $298.9 \pm 0.15\text{Ma}$  (*Gutiérrez-Trejo, 2019*)

La unidad se encuentra más al sur de la zona, con respecto a la Presa La Soledad; está constituida por elementos vulcanoclásticos y rocas basálticas deformadas a milonitas-ultramilonitas de color verdoso, las cuales se distinguen de la unidad Chicuaco por no tener cuarcitas ni pedernal, y, de la unidad Cozolexco por no presentar tanta proporción de elementos vulcanoclásticos. Las facies metamórficas corresponden a esquisto verde por la presencia de clorita, epidota y cuarzo, con posible protolito de rocas vulcanosedimentarias o tobas (*Ángeles-Moreno y Sánchez-Martínez, 2002*).

Los contactos estratigráficos muestran una transición gradual con respecto a la unidad Cozolexco, por lo que la unidad El Mirador se encuentra sobre esta unidad y cabalgando a la Formación Huayacocotla; sin embargo, no se aprecia el plano de falla por la presencia de un dique riolítico. La unidad El Mirador está cortada por estos diques riolíticos y dacíticos en la zona de Buenavista y la Unión, en Puebla (*Ángeles-Moreno y Sánchez-Martínez, 2002; Gutiérrez-Trejo, 2019*).

## **Jurásico Inferior**

### **II. Formación Huayacocotla**

La Formación Huayacocotla fue depositada durante las fases previas a la apertura del Golfo de México, en el oeste del Estado de Hidalgo y este del Estado de Veracruz; su localidad tipo se localiza a lo largo del Río Vinasco y fue identificada por Imlay, et. al, (1948) quienes la describen como una secuencia de areniscas y limolitas en estratos masivos y delgados que presentan una ligera filitización y clivaje de fracturamiento oblicuo a la estratificación. Además, contiene fósiles de bivalvos y cefalópodos de diversos géneros, deformados por esfuerzos tectónicos regionales dando una edad del Jurásico inferior (*Ochoa-Camarillo, et.al., 1998*).

También podemos encontrar lutita oscura intercalada con arenisca y conglomerado y escasos lentes de caliza, además de considerable materia vegetal y carbón en la cima con restos de plantas, amonites y pelecípodos cuyo espesor varía entre los 500-1000m, con un adelgazamiento hacia el sur (*Carrillo-Bravo, J., 1965*).

Sus contactos estratigráficos son en general discordantes con las formaciones Huizachal, Cahuascal y Tepexic (*Ochoa-Camarillo, 1996*). La descripción petrográfica establece un ambiente de depósito cercano a la costa, en una cuenca intrarco, somera y semirestringida con una lenta sedimentación. La fauna es homogénea y las estructuras sedimentarias muestran una secuencia en la sedimentación de ciclos transgresivos y regresivos. (*Esquivel-Macías, et al, 2014*).

## **Jurásico Medio**

### **III. Formación Tenexcate**

Debido a que esta unidad es el objeto central de estudio, se consideró conveniente proporcionar varios detalles sobre la misma. Las primeras investigaciones que realizó PEMEX (1967) en el área de Poza Rica y Puebla-Veracruz por parte del Departamento de Geología del Subsuelo descubrieron, al hacer la perforación de los pozos Tenexcate-1, Tecoantepec-1, Gachupinate-1, Ayotoxco-1, Manigua-1, Carolina-1 y Entablado-2, una litología llamada "Conglomerado Tenexcate" a un conglomerado de matriz tobácea que se encuentra alternado con limolitas de color gris verdoso y café rojizo de 700m de espesor aproximado (*Manjarrez-Hernández, Hernández-De la Fuente, 1989 in Léxico Estratigráfico de México, Servicio Geológico de México, 2014*), el cual fue posteriormente nombrado como Formación Tenexcate y presenta una distribución geográfica, aunque sin localidad tipo, principalmente en Puebla, al norte y oeste de Tlatlauquitepec, al occidente de Teziutlán, cercano a la Presa de la Soledad, en el Río Apulco, en la carretera hacia Mazatepec, en Jonotla, y en Cuetzalan. También se encuentra en Veracruz en el poblado de Zapotitlán y Cuauhtémoc (*Hernández-De la Fuente, 1996*).

La Formación es descrita por Hernández-De la Fuente (1996) como un cuerpo de conglomerados polimícticos bien cementados en estratos de uno a tres metros de espesor, constituido por fragmentos volcánicos de vidrio, andesita, dacita, toba lítica y toba cristalina (subredondeados a angulosos) de color verde en una matriz tobácea de color gris verdoso que aflora en la región sur de Cuetzalan (pozo Tenexcate-1, el cual marcó un espesor de 295m) (*Manjarrez-Hernández, Hernández-De la Fuente, 1989 in Léxico Estratigráfico de México, Servicio Geológico de México, 2014*). También se menciona una intercalación de grauvaca

lítica y litarenita de color gris con tonos rojizos por meteorización con fragmentos de cuarzo, plagioclasa y líticos (andesita) en una matriz arcillosa y cementada con sílice (Aguilar-Hernández y Sarmiento-Altamirano, 1998). Así mismo, Aguilar-Hernández y Sarmiento-Altamirano (1998) describen en la base de la unidad (en los cauces de los arroyos Tozán y Amalias) cuerpos vítreos de color blanco verdoso con rasgos de flujo, y abundantes esferulitas de color rosa, que, hacia su cima afloran litoarenitas cementadas con sílice de color gris, intemperizadas a coloraciones amarillezcas.

La Formación Tenexcate ha sido interpretada en un ambiente continental con actividad volcánica efusiva y explosiva que dieron origen a domos riolíticos, flujos piroclásticos y lahares. Posteriormente, existió un retrabajo de los componentes generando conglomerados con matriz epiclástica acumulados como depósitos de talud o abanicos aluviales cuyo transporte fue escaso (Silva-Romo, Mendoza-Rosales y Morales-Barrera, 2014, p.29). Estratigráficamente la Formación Tenexcate subyace a la Formación San Andrés y sobreyace al esquisto Chilis (Xalostoc-1 y Tenampulco-1) mostrando una edad del Jurásico Medio, de acuerdo con sus relaciones estratigráficas (Manjarrez-Hernández, Hernández-De la Fuente, 1989 in *Léxico Estratigráfico de México, Servicio Geológico de México, 2014*). Finalmente, se le correlaciona con la Formación Cahuwasas ya que se establece que corresponden al mismo ambiente de depósito continental mostrando solo un cambio de facies, presentando mayor contenido de componentes volcánicos la Formación Tenexcate (Hernández-De la Fuente, 1996).

En el área de estudio, esta Formación aflora principalmente cerca de la población Buenavista, en dirección del camino a Chicuaco y sobre la carretera Tlatlauquitepec-Mazatepec, mostrando conglomerados, areniscas, grauvacas y lutitas. Los conglomerados polimícticos se encuentran bien cementados y soportados por clastos bien redondeados hasta subangulosos, de color verde, que muestran fragmentos de riolita, granito, cuarzo, rocas metamórficas (esquisto de clorita, muscovita), pedernal verde, lutita, limolita y areniscas, con lentes de areniscas y lutitas (Aguilar-Hernández y Sarmiento Altamirano, 1998). Las areniscas (cuarzo-arenitas a subarcosas) están compuestas de feldespatos, cuarzo, pedernal y micas; mientras que las litoarenitas se encuentran en tonos rojizos por meteorización presentando líticos de andesita y cristales de plagioclasa en matriz arcillosa y cementada por sílice, las cuales presentan intercalaciones con limolitas de color pardo rojizo de edad Bajociano-Batoniano (Ángeles-Moreno y Sánchez-Martínez, 2002).

En la carretera a Tlatlauquitepec-Mazatepec, la unidad se encuentra en discordancia sobre el complejo Milonítico Xucayucan parcialmente cortada por un dique riolítico. También se encuentra una falla lateral como contacto entre el mismo

complejo. Durante toda la carretera se ve la intrusión de diques riolíticos y dacíticos con falla normal (*Ángeles-Moreno y Sánchez-Martínez, 2002*).

#### **IV. Formación Cahuwasas**

La formación Cahuwasas cuenta con su localidad tipo en el valle del Río Amajac, Puebla (*Aguilar-Hernández y Sarmiento Altamirano, 1998*). También se describe a esta formación en Huayacocotla; al norte y este de Tianguistengo, Hgo.; y en la región de Huehuetla. Así mismo, aflora en la porción central de la Sierra Madre Oriental en el subsuelo de la cuenca de Tampico-Misantla, y en la Cuenca de Veracruz, de acuerdo con la información recabada por PEMEX (*Carrillo-Bravo, 1971*). Carrillo-Bravo en 1965 describe a esta formación como una unidad de areniscas, conglomerados y limolitas de color rojo. Años más tarde, *Segura (2010 in Ángeles-Moreno y Sánchez-Martínez, 2002)* reportó una secuencia del Jurásico Medio constituida por conglomerados, areniscas, grauvacas y lutitas a lo largo de la carretera a Tlatlauquitepec-Mazatepec, en contacto discordante con una secuencia metamórfica

Así mismo, los clastos del conglomerado y brecha presentan un tamaño de 5-95cm de diámetro y están incluidos en una matriz arenosa roja. En la parte intermedia se encuentra un intervalo de lavas de composición riolítica. También se aprecian limolitas-lutitas de color rojo con horizontes de arenisca de la misma coloración de grano grueso. Hacia el arroyo Chacalapa se encuentra un intervalo de tobas de 80 m de espesor de color amarillo verdoso que descansa sobre areniscas bien estratificadas de aproximadamente 65cm. En la parte inferior, aflora un conglomerado y brecha con clastos de arenisca, roca volcánica (félsica) y gneis, dentro de una matriz arenosa de color rojo (*Ochoa-Camarillo, 1998*). Del mismo modo, se encuentran como estructuras sedimentarias estratificación cruzada en las areniscas y conglomerados; y en las limolitas, laminillas de mica blanca. Por la ausencia de fósiles, sus cambios abruptos de espesor (0 - 300m) y su coloración (rojiza, púrpura verde y en menor ocasión gris), se cree que estos depósitos fueron acumulados como abanicos aluviales y/o como depósitos fluviales/lacustres (*Ochoa-Camarillo et. al., 1999*).

Con base en su posición estratigráfica se le asigna la edad del Jurásico Medio y puede abarcar el intervalo del Toarciano y *Bathoniano* (*Carrillo-Bravo, 1965*). Alrededor de Tianguistengo, Hgo., la formación Cahuwasas subyace a la Formación Tamán y cubre con discordancia angular a la formación Huayacocotla. En Veracruz descansa sobre capas del Jurásico Inferior y está cubierta discordantemente por calizas del Jurásico Superior. Finalmente, *Salvador (1991)* correlaciona a la Formación Cahuwasas con la Formación La Joya en Huizachal debido a la similitud litológica y por las relaciones estratigráficas que presentan (*Ochoa-Camarillo, et.al., 1998*).

## V. Formación Tepéxic

La unidad descrita como “calcarenita Tepéxic” por Erben en 1956, tiene su localidad tipo en el río Necaxa, *Puebla (Ochoa Camarillo, et.al., 1998)*; está constituida por calizas impuras de color gris a gris oscuro, con bastantes granos de cuarzo con estratificación marcada de espesor de 30-50cm intercalada con una secuencia de caliza conglomerática. Se alterna con lutita gris oscura en capas de 5-10cm de espesor y lutita calcárea negra en estratos de hasta 60cm de espesor. Presenta cortoides, ooides, pellets y como bioclastos dominantes gasterópodos, bivalvos y braquiópodos. (López-Palomino et al., 2005).

El ambiente de formación representa depósitos marinos de transgresión por el cambio de sedimentación a carbonatos depositados en la cercanía de la costa (plataforma somera) evidenciada por la presencia de horizontes oncolíticos y estratificación ondulada; o en las partes profundas del litoral por la presencia de ostraes y gryphaes en sustratos duros, con edades que van del Batoniano al Calloviano posiblemente relacionado con la apertura del Golfo de México (*Ochoa Camarillo, et.al., 1998*).

Estratigráficamente, el límite inferior de la Formación Tepéxic es concordante con la Formación Cahuizas, mientras que el límite superior generalmente es concordante con la Formación Santiago; sin embargo, se ha documentado que en algunas áreas esta unidad subyace a la Formación Tamán (*Ochoa Camarillo, et.al., 1998*).

## Jurásico Superior

## VI. Formación Tamán

La localidad tipo de esta formación se encuentra cercana al poblado de Tamán y presenta una sucesión de calizas negras, microcristalinas, bien estratificadas intercaladas con lutitas negras, las cuales presentan estratos con espesores de 3-25cm con abundante micrita y contenido fósiles (foraminíferos). La lutita contiene también gran de materia orgánica con vetillas irregulares de calcita (*Ochoa-Camarillo, et.al., 1998; Aguilar-Hernández y Sarmiento-Altamirano, 1998*).

Estratigráficamente la Formación Tamán superyace en forma concordante y transicional a las formaciones Santiago y Pimienta. Se cree que la unidad se acumuló en una plataforma subsidente poco oxigenada (*López-Palomino, et.al., 2005*). La formación corresponde a la edad Kimeridgiense Inferior- Thitoniense gracias a los fósiles encontrados (*Ochoa-Camarillo, et.al., 1998*).

## VII. Formación Pimienta

La localidad tipo se localiza en el Valle del Río Moctezuma en el Rancho Pimienta y nos muestra una sucesión de calizas densas de color negro y gris oscuro en estratos delgados con horizontes de pedernal negro con gran contenido de fósiles, foraminíferos (*Aguilar-Hernández y Sarmiento-Altamirano, 1998*). También se compone de calizas arcillosas en la parte superior, de color negro con tonos rojizos y verdosos, con microfósiles (*Ochoa-Camarillo et.al., 1998*). Los estratos de caliza tienen un espesor de 14-60cm, mientras que las calizas arcillosas presentan uno de 10-20cm y la lutita-calcárea de 10-30cm (*Aguilar-Hernández y Sarmiento-Altamirano, 1998*). Además, los fósiles que se pueden encontrar entre la sucesión muestran un ambiente de mar abierto, con aporte de terrígenos finos en condiciones batimétricas someras y de baja energía, por lo que las estructuras sedimentarias que se ven entre sus estratos son láminas de lutita con lentes delgados de caliza junto con bandas de pedernal (*Nieto-Bender, 2013*).

Se correlaciona con la Formación San Andrés en el borde la de cañada del Río Zempoala, al sur de Jonotla (*Ochoa-Camarillo, et.al., 1998*). El contacto es concordante y transicional con la Formación Tamaulipas Inferior (*Nieto-Bender, 2013*).

El caminamiento y trabajo de campo que se realizó para la obtención de las muestras analizadas en esta tesis me permite proponer la siguiente columna estratigráfica, la cual se divide en dos secciones, la sucesión de rocas que afloran hacia el poblado de Cuetzalan, y las litologías observadas en los alrededores del poblado de Teziutlán, columna que se presenta a continuación (Fig.9.):

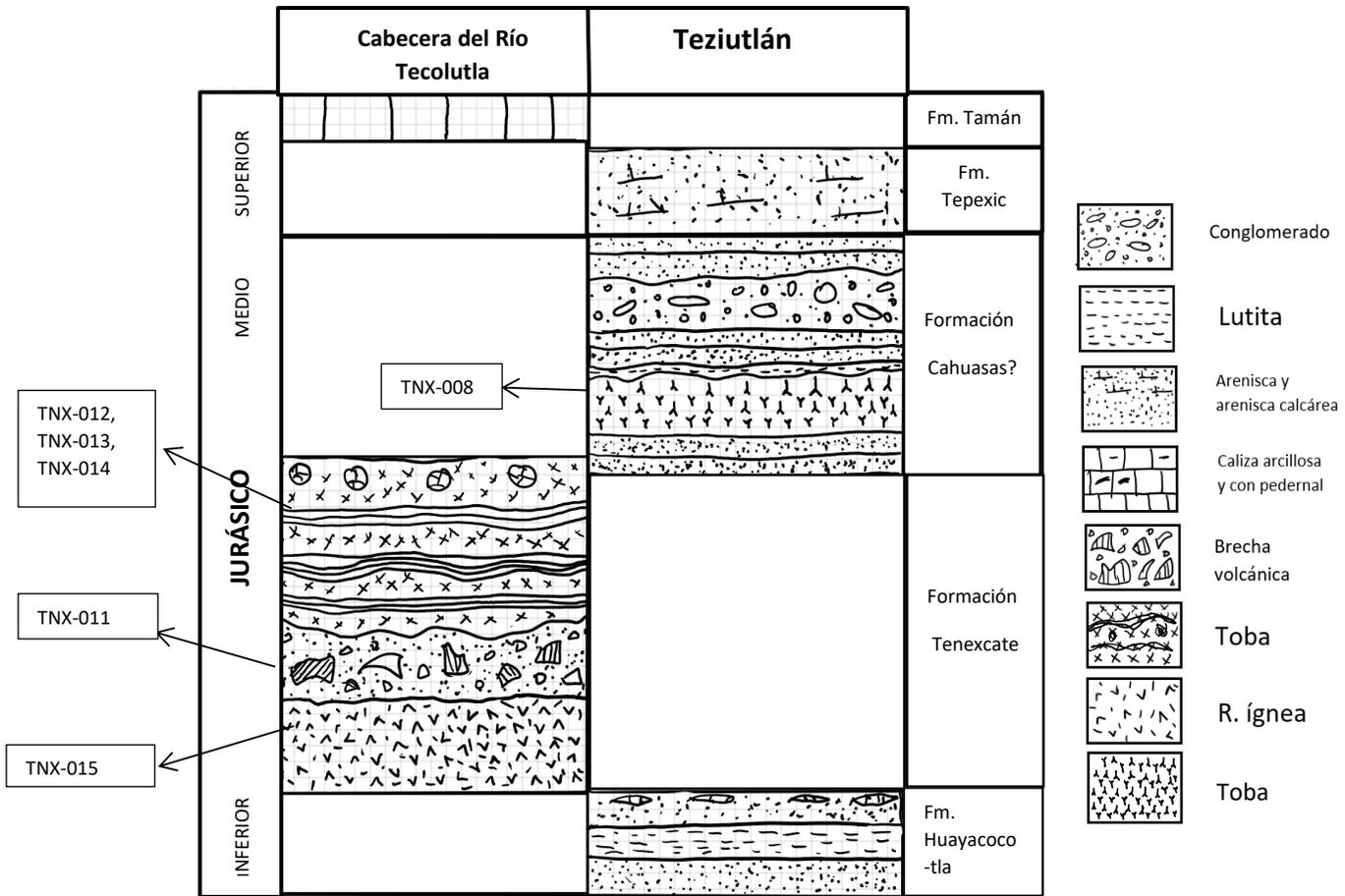


Fig.9. Columnas estratigráficas propuestas después de haber realizado el trabajo de campo las cuales se separan por su ubicación. La columna de la izquierda muestra las litologías observadas en la cabecera del Río Tecolutla y Presa La Soledad, depósitos de ignimbritas intercalados con una brecha volcánica. Mientras que la columna de la derecha es la interpretación que se hizo del caminamiento desde la carretera Tlatlauquitepec-Mazatepec, a la carretera rumbo a Teziutlán, observándose la Formación Huayacocotla, Cahuasas y Tepéxic.

## 4. RESULTADOS

### 4.1 DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA

- **TNX-005** (*Carretera Tlatlauquitepec-Mazatepec kilómetro 7, Fm. Tenexcate??*)

#### MUESTRA DE MANO



Fig.10. Muestra de mano de la roca TNX-005

rojiza.

**Matriz: 55%**

**Minerales: 45%**

Roca ígnea extrusiva melanocrática de color gris verdoso con tonalidades pardas en los bordes por alteración. Presenta una textura porfídica ya que se aprecian fenocristales de plagioclasa (3mm) y anfíbol (2mm), respectivamente. Por su color se clasifica como una roca intermedia, por lo que se infiere un rango de porcentaje de sílice de aproximadamente de 52-63% (Fig,10.).

**Observaciones:** la roca se encontraba en un área rodeada por agua por lo que está altamente alterada, presenta una costra de meteorización lisa de color gris; además de una ligera coloración blancuzca y parda

MINERALOGÍA	COLOR	PORCENTAJE	DESCRIPCIÓN
Plagioclasa (y posibles feldespatos)	Blanco	30%	Tabular
Anfíbol	Negro brillante	15%	Prismático, alargado, romboide

Tabla 3. Descripción de muestra de mano TNX-005

**NOMBRE: Andesita**

## LÁMINA DELGADA

Roca ígnea de textura porfídica con una matriz microcristalina estimada de (71%) constituida de plagioclasa prismática y óxidos. Los fenocristales (29%) son de diversos tamaños que se encuentra alterándose a óxidos y sericita (*Fig, 11.*).

### Fenocristales:

- Plagioclasa: se observan de dos tipos principales: labradorita y andesina. Fenocristales con textura esquelética (bahías y bordes corroídos) alterándose a sericita. Presentan maclas - polisintéticas (de Albita) en cristales prismáticos euedrales y textura seriada que varía de 3-15mm. Glomero-cristales 5mm. Reemplazamiento de plagioclasas por el centro del mineral a sericita. Extinción oscilante en las plagioclasas que presentan en el centro una alteración por óxidos. En ciertas zonas se aprecia a las plagioclasas alineadas en dos direcciones preferenciales (textura traquítica).

También se observan feldspatos que se reconocen por la macla simple de Carlsbad. Se encuentran cercanos a las plagioclasas mostrando formas prismáticas prácticamente euedrales.

- Hornblenda (anfíbol): Mineral máfico el cual presenta pleocroísmo de color verdoso y está reemplazado por los bordes por óxidos generando formas subedrales, pero donde la forma relicta aún se aprecia; ya sea prismática o de rombos.
- Augita (piroxeno): Mineral máfico no pleocroico de 1.5mm alterado por óxidos en los bordes del mineral de forma prismática con ciertos bordes (subedral-anedral) corroídos. También se aprecia a los piroxenos rodeados por plagioclasas los cuales en los bordes comienzan a transformarse a anfíboles.

	TIPO	TEXTURAS	TAMAÑO	FORMA
<b>Minerales esenciales</b>	Plagioclasa- 12%	Esquelética, Tamiz, Seriada	3-15mm	Tabular y glomero-cristales (euedral a subedral)
	Augita- 8%	Esquelética	2mm	Subedral (pseudoprismático)
<b>Minerales tipo</b>	Hornblenda- 2%	Bordes corroídos	1-2mm	Prismático alargado y en rombos.
	Sanidino-5%	Bordes corroídos	4-6mm	

				Subedral (pseudoprismático)
<b>Minerales Accesorios</b>	Opacos- 2%	Rellenando la matriz	0.5-1mm	Rellenan los espacios de la matriz de plagioclasa
<b>Minerales Secundarios</b>	Sericita			En la matriz y en los bordes del feldespato y en el centro de las plagioclasas.
	Óxidos de hierro			Principalmente en las fracturas y en los bordes de los minerales máficos y en pocas plagioclasas en los bordes y fracturas.
	Clorita			Altera, principalmente, uno de los bordes de los cristales máficos, reemplazándolos.
Tabla 4. Descripción en lámina delgada TNX-005				

**Observaciones:** La roca presenta vetillas posteriores a su formación, las cuales se encuentran rellenas por cuarzo y calcita.

## **NOMBRE: Andesita**

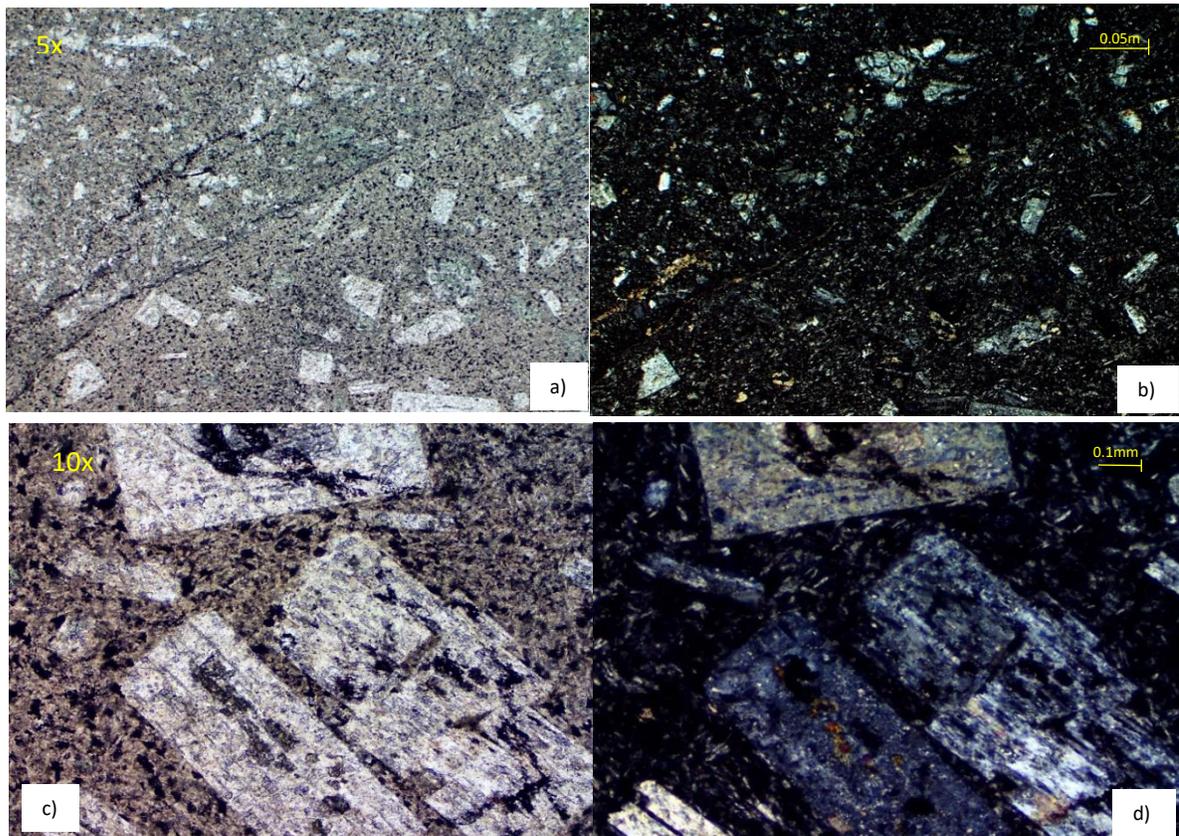


Fig.11. a) y b) Muestran a la roca sin/con nícoles cruzados donde se aprecia la matriz microcristalina de plagioclasa, cristales de plagioclases tabulares de mayor tamaño y minerales máficos cloritizados. c) y d) Misma roca con objetivo 10x donde se aprecia a los cristales de plagioclasa con textura esquelética donde se aprecian las maclas múltiples. Los cristales están seritizados y alterándose a óxidos.

## **INTERPRETACIÓN**

La roca clasificada como andesita presenta diversas texturas que nos hablan sobre su evolución. La textura porfídica nos establece las dos historias de enfriamiento que sufrió la roca, una lenta en la que se produjeron los fenocristales de mayor tamaño y, la segunda, que fue mucho más rápida, y que generó a la matriz de microfenocristales tabulares de plagioclasa (cuando la erupción fue inducida generando una alta tasa de nucleación). Además, las formas de los cristales también nos dan detalle del grado de enfriamiento que sufrió el magma. Los fenocristales que se observan en la lámina delgada presentan formas subedrales que nos indican un desequilibrio entre la tasa de crecimiento del cristal y el grado de sobrenfriamiento impuesto en el magma por las condiciones ambientales (Castro-Dorado, 2015).

Por ejemplo, tenemos cristales de plagioclasa de grano grueso, y de augita, que presentan texturas esqueléticas, esta textura se forma por un rápido enfriamiento, que se ve reflejado en un marcado crecimiento que conlleva a un rápido empobrecimiento del líquido residual. Basta con variar 100°C la temperatura para generarla en estos minerales (*Castro-Dorado, 2015*). La textura de tamiz también se encuentra relacionada con las texturas esqueléticas; el líquido residual, cuando el cristal esquelético se va formando puede quedar atrapado, por lo que solidifica como vidrio, si tiene un hábito dendrítico se le puede llamar textura tamiz, y si se queda en forma de caja se les conoce como inclusiones de vidrio. Esta reabsorción del mineral sucede debido a que el cristal se encuentra en desequilibrio con su medio, por ejemplo, con una mezcla de magmas o por un sobreenfriamiento (*Castro-Dorado, 2015*).

La textura seriada (fenocristales de un mismo mineral con diferente tamaño, en este caso de las plagioclasas) indica que la cristalización de dicho mineral no tuvo lugar a una misma profundidad, sino que fue un proceso dinámico durante el ascenso. Aquí la textura glomeroporfídica que encontramos en una parte de la lámina delgada puede ser explicada, la tasa de nucleación es heterogénea porque ya tenemos cristales formados, al mismo tiempo que la de la tasa de crecimiento es alta (*Castro-Dorado, 2015*).

- **TNX-008** (*Carretera rumbo a Teziutlán, Fm. Tenexcate-Cahuasas???*)

#### **MUESTRA DE MANO**



Fig.12. Muestra de mano de la roca TNX-008

Roca ígnea vulcanoclástica con coloraciones verdosas en una matriz de ceniza (15%) con clastos en tonalidades rojizas-pardas de 0.5 mm hasta 3cm, como se aprecia en la imagen, por lo tanto, de acuerdo con la clasificación de Fisher (1996) se le nombraría Toba de lapilli.

Los clastos son de composición ígnea, principalmente andesitas y fragmentos pequeños que aparentan ser basaltos.

Sin embargo, presenta fragmentos de minerales como cuarzo, feldespato y anfíbol (*Fig, 12.*).

**Observaciones:** la toba en conjunto está altamente consolidada. Además, presenta una coloración general verdosa con tonos naranja-pardos por meteorización.

Algunos minerales comienzan a tener coloraciones blancas como muestra de alteración.

**Matriz: 15% ;**

**Cristales: 50% ;**

**Líticos: 35%**

COMPONENTES	COLOR	PORCENTAJE	DESCRIPCIÓN
Cuarzo	Rosa/morado	25%	Mineral de cuarzo subanguloso a subredondeado de tamaño variados (0.5mm a 6cm)
Feldespatos	blanco	10%	Mineral semitabular blanco a transparente de 2mm
Anfíbol	negro	15%	Mineral prismático y en forma de rombo de 2mm
Líticos: -basalto	negro	10%	Fragmento anguloso a subanguloso de máximo 0.5mm.
-andesita	rosa	25%	Fragmento subredondeado a subanguloso con pequeños cristales de plagioclasa y principalmente anfíbol en su interior. Tamaño: 0.5mm-2cm

Tabla 5. Descripción en muestra de mano TNX-008

***NOMBRE: Toba cristalina***

## LÁMINA DELGADA

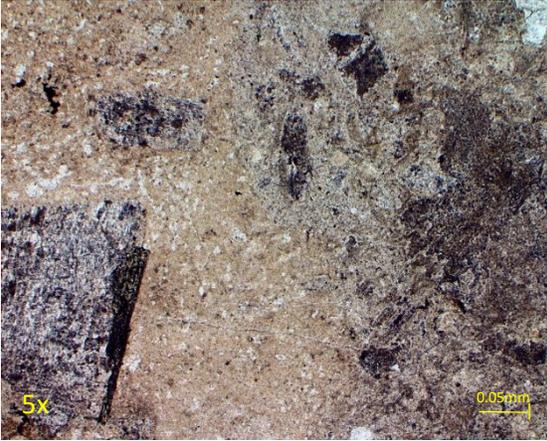


Fig.13. Roca vulcanoclástica sin nícoles cruzados donde se ve la matriz de ceniza y dos líticos en donde se aprecia adentro de ellos minerales subangulosos con la forma relictiva de minerales máficos.

Roca ígnea vulcanoclástica con matriz de ceniza alterándose a arcillas que contiene líticos subredondeados a subangulosos que alcanzan hasta ~3cm de composición andesítica, basalto; pómez, y fragmentos de cristales de plagioclasa, feldespato, cuarzo, anfíbol y piroxeno de diversos tamaños y de mayor abundancia en la roca (Fig,13, 14.). La roca en general presenta alteración a clorita, sericita y óxidos de Fe (probablemente hematita por coloración rojiza). Los minerales máficos presentan una textura esqueletal y precipitación de óxidos en los bordes del cristal.

- Pómez: presenta bordes irregulares de forma semialargada a redondeada, de color gris, alterándose a sericita. Tamaño 12mm las más grandes.
- Espículas de vidrio presentes en la matriz
- Anfíbol: Mineral pleocroico verdoso, que se encuentra reemplazado por óxidos y clorita, donde se aprecia el vestigio del mineral (subedral) y tiene textura esqueletal (bahías). Algunos minerales se encuentran alterados por los bordes por clorita. Su tamaño va de los 6-12mm.
- Cuarzo en pequeños fragmentos formando un “glomerocristal”. Así mismo, se aprecia cuarzo semiradial con lamelas. Los cuarzos por separado son de 4mm formando el glomerocristal de 20mm. Cuarzo de grano fino disperso en la matriz.
- Plagioclasa: se encuentra de forma tabular, presenta extinción oscilante con maclas múltiples de albita. Así mismo, se observa plagioclasas zoneadas en forma tabular y textura traquítica. Dos: andesina y oligoclasa, y en tamaños que van de 2-10mm.
- El feldespato más reconocible es el sanidino por su macla simple de forma tabular y tamaño similar a las plagioclasas, 6mm.
- Andesita: se presentan de forma subangulosa a subredondeada con microcristales de plagioclasa en su interior mostrando una textura porfídica de 4-6mm. Se encuentran alterados por clorita y óxidos lo que les da una coloración parda verdosa.
- Fragmentos líticos de color gris a negro que por su textura parecen basaltos de tamaño 3mm.

Líticos 6%	Cristales 23%	Matriz 67%	Pómez- 4%
Andesita- 5%	Cuarzo- 5%	Ceniza- 50%	
Basalto- 1%	Anfíbol- 5%	Cuarzo- 10%	
	Plagioclasa/feldespatos-10% Óxidos- 3%	Feldespatos- 7%	
Tabla 6. Porcentajes en lámina delgada de la roca TNX-008			

**NOMBRE: Toba cristalina (ignimbrita)**

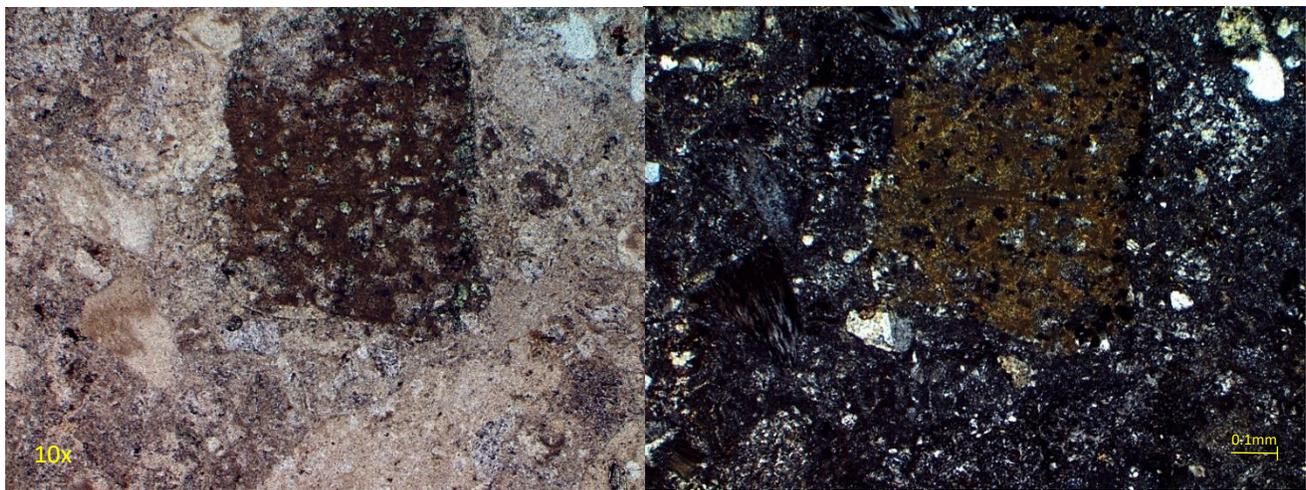


Fig.14. Roca sin y con nicoles cruzados (derecha/izquierda) donde se puede apreciar un cristal de cuarzo, feldespatos, pómez recristalizadas con microcristales de cuarzo y un lítico marrón de gran tamaño cuyos minerales fueron cloritizados. Así mismo, se observa las sombras de lo que fueron posibles líticos y cristales alterados a sericita o reemplazados por cuarzo.

**INTERPRETACIÓN**

La matriz de la roca presenta una ligera alineación lo que nos indica que la roca fue producto de un flujo piroclástico, además de que sus componentes se encuentran mal clasificados, siendo otra característica de este tipo de depósitos piroclásticos (Corrientes de Densidad Piroclástica). Presenta componentes vulcanoclásticos juveniles como pómez, que provienen directamente de la erupción cuando el magma viscoso expulsó y fragmentó el material; así como líticos incorporados durante esta, como lo son los líticos volcánicos encontrados, y cristales que se encuentran entre la matriz. Las pómez nos permiten argumentar que la roca no se encuentra muy soldada ya que se no se aprecian aplastadas, pero sí alargadas. Finalmente, la composición del flujo es félsico, por los cristales que encontramos de cuarzo, feldespatos y anfíbol.

- **TNX-011** (*Cañada del Río Tecolutla, Fm. Tenexcate*)

## MUESTRA DE MANO



Fig.15. Muestra de mano de la roca TNX-011

La roca tiene una textura de brecha en la que se observan dos tonalidades, una rojizas-violeta y la otra gris oscuro, cubierta por una costra de meteorización negra y lisa (*Fig.15.*). La matriz esta oxidada y los fragmentos aparentan ser de una roca volcánica. Los fragmentos de roca tienen en el interior como cristales con apariencia tabular de color blanco que podrían ser plagioclasas de aproximadamente 2mm. Así mismo, la matriz de la roca presenta fragmentos más pequeños

que aparentan ser de la misma composición a los clastos de roca ígnea.

**Observaciones:** La roca presenta una alta densidad. En la superficie de la roca se aprecian precipitaciones de óxidos de color rojo (hematita) y de calcita. Presenta un alto grado de meteorización, lo cual es probable que se deba a que la roca forma parte de la cañada del Río Tecolutla y está en contacto constante con agua.

**NOMBRE: Brecha volcánica**

## LÁMINA DELGADA

La roca está conformada por fragmentos angulosos de roca ígnea que están rodeados por una matriz rojiza de óxidos la cual también presenta espículas alterándose a sericita y pequeños fragmentos de los clastos ígneos angulosos que son rodeados por la matriz, además de plagioclasas y cuarzos distribuidos heterogéneamente. Los fragmentos de roca ígnea son de coloración grisácea con matriz de ceniza y espículas de forma irregular de vidrio que presentan una alineación, y los fenocristales, de máximo 15mm, son de forma tabular con maclas múltiples y de crecimiento sin orientación. También se encuentran minerales máficos altamente alterados a óxidos. Podemos clasificarla por sus componentes como una ignimbrita cristalina (*Fig.16.*).

- Plagioclasa de composición andesina y labradorita según el método con maclas de albita (ángulos de extinción). Las plagioclasas presentan

alteración por sericita en el centro y por óxidos en las fracturas, así como extinción oscilante. También se observan glomerocristales.

- Minerales máficos, principalmente anfíboles (hornblenda) subedrales de tamaño máximo 8mm y unos más pequeños de 4mm que se encuentran totalmente reemplazados por óxidos pero que conservan su forma relictas, gracias a ello se pudo identificar que era un anfíbol.
- Espículas de menor tamaño que los cristales casi aciculares presentando bahías, con formas irregulares.
- Pómez alargadas alteradas a sericita y recristalizadas con cuarzo muy fino e irregular de tamaño constante.

<b>Matriz:77%</b>	<b>Clastos de ignimbrita: 23%</b>	
Espículas y pómez- 22%	Plagioclasa: 5-15mm	4%
Fragmentos de ignimbrita- 10%	Feldespato: 4mm-6mm	2%
Óxidos- 45%	Cuarzo: 5mm	2%
	Hornblenda: 4-8mm	3%
	Espículas:	10%
	Pómez:	2%

Tabla 7. Porcentajes en lámina delgada de la roca TNX-011

***NOMBRE: Brecha volcánica con líticos de ignimbrita***

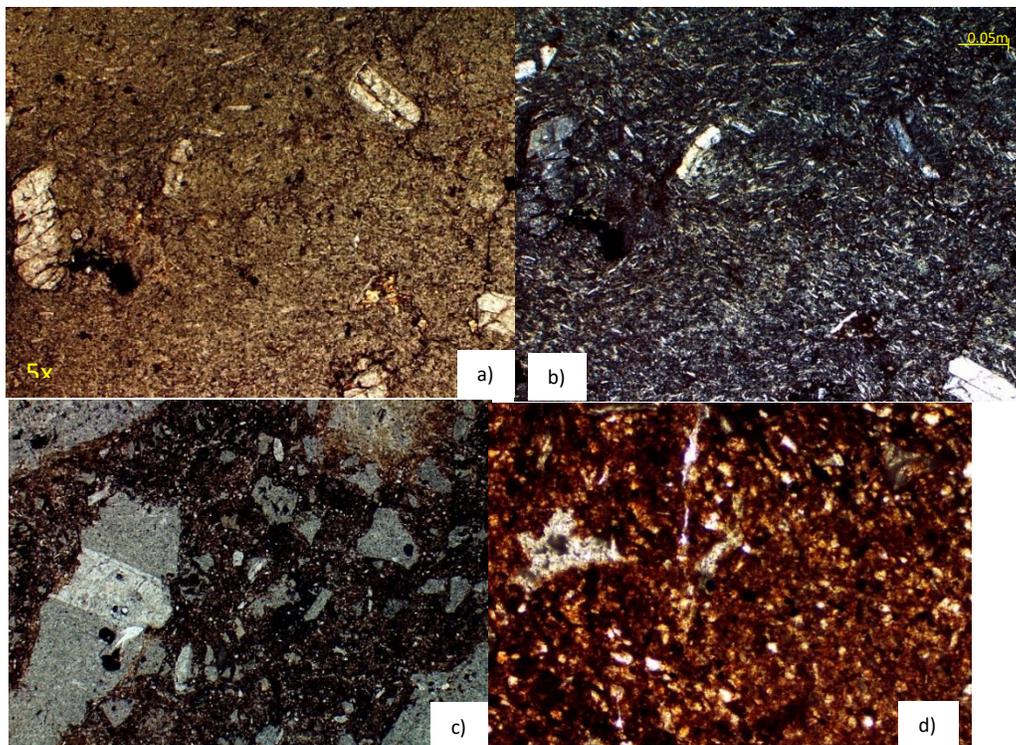


Fig.16. a) y b) Clastos de ignimbrita donde se aprecian las espículas, microcristales de cuarzo, feldespato y plagioclasa, cristal de cuarzo y sanidino de mayor tamaño. c) Contacto de clastos de ignimbrita con matriz de óxidos, se aprecian los pequeños clastos de roca en la matriz y las espículas, objetivo 5x. d) Acercamiento a la matriz sin nicoles cruzados con objetivo 10x.

## INTERPRETACIÓN

La roca está constituida por bloques de ignimbrita cristalina, con alta densidad de espículas de vidrio, probablemente la misma roca que se aprecia más adelante en la cañada del río Tecolutla. Se puede inferir que, al inicio de la erupción, hubo un evento muy explosivo, lo que originó a la brecha volcánica; por lo tanto, sería la zona más cercana al volcán. Posteriormente, se generaron los flujos piroclásticos en forma de corrientes de densidad piroclástica que dieron origen a los semiestratos de espesor variable que conforman a las ignimbritas. Finalmente, la brecha volcánica consolidó con la precipitación de óxidos de hierro que por su coloración rojiza podemos asumir es hematita.

- **TNX-012** (*Cañada del Río Tecolutla, Fm. Tenexcate*)

## MUESTRA DE MANO



Fig. 17. Muestra de mano de la roca TNX-012

Roca ígnea piroclástica félsica (leucocrática) de color miel (pardo claro) compuesta de ceniza y vidrio volcánico la cual presenta un flujo que se aprecia a simple vista por el bandeamiento. Las bandas son de color gris de un material que aparenta ser sílice. Así mismo, este mismo material (cuarzo) se aprecian en formas lenticulares de color rosa-gris. Además de posibles esferulitas y pómez alargadas donde cristalizó cuarzo (Fig.18.).



Fig.18. Muestra con mayor aumento de la roca. Se aprecia el bandeamiento (izquierda) y las esferulitas, pómez (derecha).

**Observaciones:** la roca se encontró en la cañada del río Tecolutla por lo que se aprecia un grado alto de meteorización; presenta una costra de intemperismo color café (con sensación terrosa) donde comenzó a desarrollarse vegetación. Así mismo, algunas bandas y zonas de la roca tienen coloraciones pardas-naranjas producto de la alteración por presencia de óxidos (*Fig.17.*).

**NOMBRE: Ignimbrita**

**LÁMINA DELGADA**

Roca ígnea de composición ácida y de origen piroclástica completamente silicificada la cual presenta fracturas rellenas de calcita. Se aprecia una textura fluidal en la matriz de vidrio con fantasmas de cristales, clorita, óxidos, y espículas. Sin embargo, hay ciertas zonas en donde la textura fluidal no es tan obvia (*Fig.19.*).

Los cristales que se aprecian son principalmente feldespatos alcalinos con maclas en dos direcciones y plagioclasas con maclas múltiples, ambos con alteración argílica. Además de minerales máficos, probablemente anfíboles reemplazados por óxidos. Finalmente, en la matriz se aprecian espículas de vidrio alterándose a sericita y óxidos que nos confirman se trata de una roca piroclástica (*Fig.20.*).

**Matriz 82%; Componentes 18%**

COMPONENTE	FORMA	DESCRIPCIÓN
Cuarzo 10%	Forma anedral redondeado, relleno pómez	Alterado a sericita Tamaño: 4mm
Lítico 2%	Anedral (redondeado)	Cuarzo formándose en los bordes reemplazados por óxidos
Feldespato y plagioclasas 6%	euedral de 1-2mm	Reemplazadas por óxidos a penas se aprecian sus maclas, en forma de agregados cristalinos.

Tabla 8. Descripción en lámina delgada de la roca TNX-012

**NOMBRE: Ignimbrita cristalina**

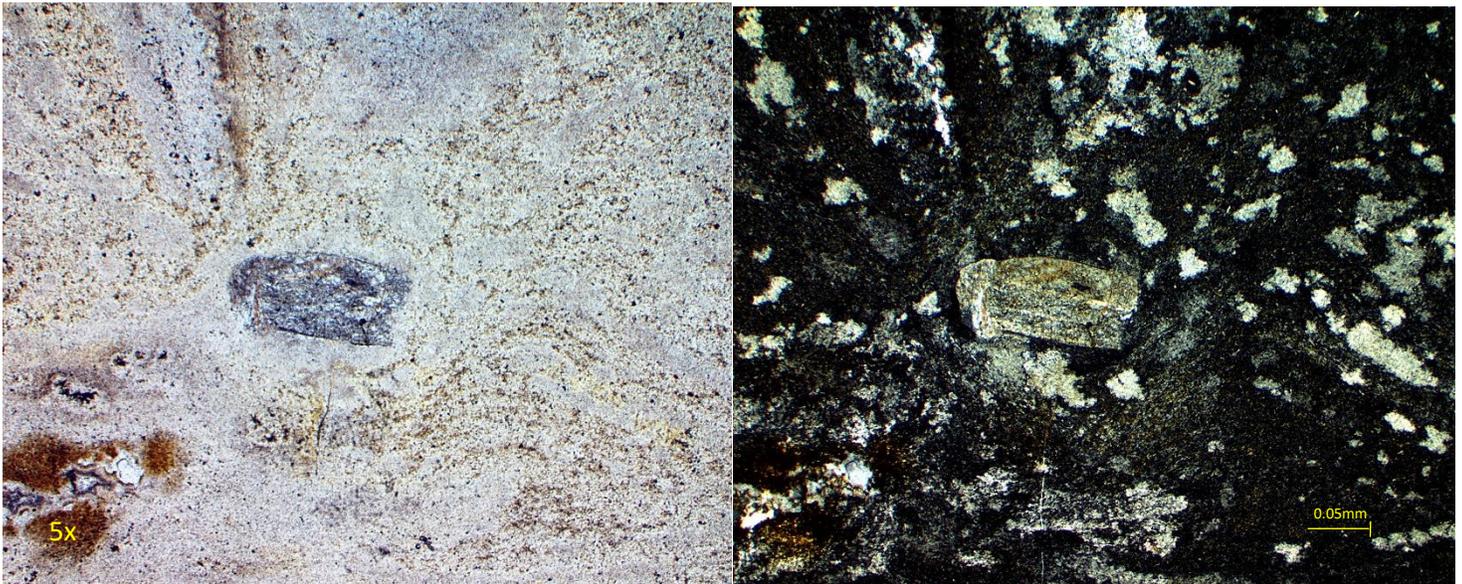


Fig.19. Roca piroclástica silicificada donde se aprecia el flujo de la roca junto con lo que aparentan ser pómez alargadas recrystalizadas a cuarzo y alteradas a sericita intercaladas con “bandas” oxidadas. En el centro se tiene un cristal probablemente de piroxeno por su crucero alterado a clorita y sericita de forma subedral y subredondeado.

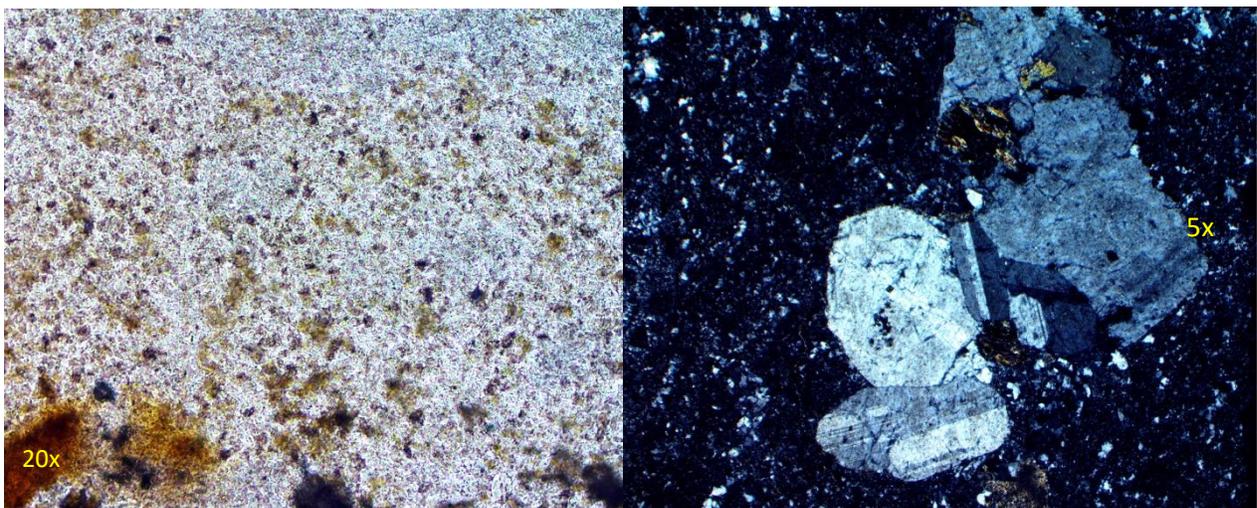


Fig.20. La imagen de la izquierda es un acercamiento con objetivo 20x de las espículas que tiene la roca con alteración a sericita y ciertas partes oxidadas. La figura de la derecha en nícoles cruzados nos muestra un glomerocristal de cuarzo y plagioclasas en la matriz silicificada sin un flujo aparente. También se aprecia una bahía por disolución donde existió un mineral máfico hoy alterado a clorita, ya no se aprecia una forma o crucero para identificarlo, 10x.

## INTERPRETACIÓN

La roca desde la escala de muestra de mano presenta un bandeamiento muy notorio que refleja que la roca fue generada a partir de un flujo piroclástico. Presenta componentes juveniles como las pómez alargadas en textura eutaxítica que demuestran un alto grado de soldamiento. Así mismo, su composición es riolítica ya que presenta cristales de cuarzo, feldespato, por lo que muestra un alto contenido en sílice y por el vidrio presente en la roca una alta explosividad. El vidrio al ser un material metaestable es susceptible a la devitrificación; en este caso, la roca se encuentra totalmente silicificadas. También tenemos glomero-cristales que nos pueden indicar un estancamiento del magma en donde evolucionó (Castro-Dorado, 2015). Finalmente, entre sus líticos encontramos materiales volcánicos que pueden ser remanentes de erupciones anteriores.

- **TNX-013** (*Cañada del Río Tecolutla, Fm. Tenexcate*)

## MUESTRA DE MANO



Fig.21. Muestra de mano de la roca TNX-013

Roca ígnea piroclástica de composición félsica y leucocrática de color al fresco es amarillo claro (crema) con matriz de ceniza con bandeamiento. Las bandas y lentes son de cuarzo agregado de color gris y amarillo. Así mismo, se ven cristales entre el bandeamiento de color blanco y se aprecian los huecos alterados de posibles esferulitas y pómez recristalizadas con nuevos minerales como cuarzo. La roca es terrosa y deleznable (Fig.21.).

**Observaciones:** la roca forma parte de un afloramiento en la cañada del río Tecolutla, de ahí su alto grado de meteorización, presenta una costra de meteorización de color café oscuro y varias fracturas rellenas de sílice y calcita.

**NOMBRE: Ignimbrita**

- **TNX-014** (*Cañada del Río Tecolutla, Fm. Tenexcate*)

## MUESTRA DE MANO



Fig.22. Muestra de mano de la roca TNX-014

Roca félsica piroclástica de coloraciones amarilla y naranja pálida por meteorización con matriz de ceniza. Presenta reemplazamiento de sílice en las esferulitas, además se aprecia un bandeamiento alternado y grueso, de aproximadamente 1cm de ancho, de bandas en color rosa y gris de un material que por su dureza y brillo clasifico como sílice. La roca se encuentra altamente soldada y presenta características de flujo como lo es el bandeamiento y en su conjunto podemos ver pequeños pliegues que nos muestran la viscosidad del material. Se puede observar desde la muestra de mano que la roca se encuentra altamente soldada (*Fig.22.*).

**Observaciones:** se encuentra en el mismo afloramiento que las dos rocas descritas anteriormente, pero unos metros más adelante cada una. Se puede apreciar el aumento de tamaño de las esferulitas y del grosor del bandeamiento, además de la alternancia en las coloraciones conforme caminamos.

**NOMBRE:** *Ignimbrita con bandas de sílice y esferulitas*

## LÁMINA DELGADA

La roca está conformada por una matriz de vidrio (ceniza) bandeada y pómez alargadas, la cual se encuentra alterándose a arcillas (sericita) y óxidos de Fe, altamente silicificada, presentando una coloración miel con tonos pardos por alteración de los óxidos (hematita, probablemente por la coloración) (*Fig.23.*).

- Posiblemente pómez alargadas (*fiamme*) siendo reemplazadas por cuarzo (generando un mosaico) con los bordes oxidados. Actualmente, se aprecian

bandas de aglomeración de cuarzo intercaladas con óxidos. Posiblemente *fiamme* reemplazadas por óxidos se encuentran casi perpendiculares al flujo.

- El cuarzo es de forma irregular a subredondeado de tamaño fino y homogéneo y está dispuesto en forma de bandas o lentes que concuerdan con el flujo de la roca, posiblemente en pómez antiguas recristalizadas. Dentro de los mosaicos de cuarzo se encuentran pequeñas esferulitas (radiales). El cuarzo presenta dos tamaños al reemplazar a las pómez, más fino en las bandas, y en los lentes el mosaico es un poco más grueso.
- También se aprecian fracturas posteriores con minerales precipitados cercano a estas áreas de la lámina delgada.
- Relleno de cavidades con óxidos de posibles pómez antiguas.
- Anfíboles reemplazados por óxidos donde se aprecia su crucero. Los cristales se ven rodeados en efecto de bola de nieve con respecto al flujo y conservan su textura relictas, por lo que fue posible reconocerlos. Algunos se ven rodeados por cristales de cuarzo.
- Plagioclasa alineada en forma subedral donde las maclas polisintéticas aún se aprecian, sin embargo, no es posible identificar el tipo de plagioclasa por el método de maclas de albita. Además, hay minerales más pequeños (feldespatos y cuarzo) que se encuentran agregados en glomerocristales con cuarzo y feldespato.
- Esferulitas son prueba de la existencia de la devitrificación a sílice y oxidadas. Precipitaron óxidos en el centro de la esferulita y alteradas a sericita en ciertos bordes. Se aprecia la recristalización de cuarzo en el centro de algunas de ellas.
- Espículas en forma de gusano, alargadas entre las esferulitas formando parte de la matriz de ceniza

<b>Matriz 75%</b>	<b>Minerales 8%</b>		<b>Líticos 2%</b>
Pómez 25% Ceniza 50%	Plagioclasa 2-5mm	3%	<b>Pómez 15%</b>
	Cuarzo 6mm	4%	
	Feldespato 4mm	1%	
	Anfíbol 4-10mm	7%	
Tabla 9. Porcentajes en lámina delgada de la roca TNX-014			

**NOMBRE: Ignimbrita riomórfica**

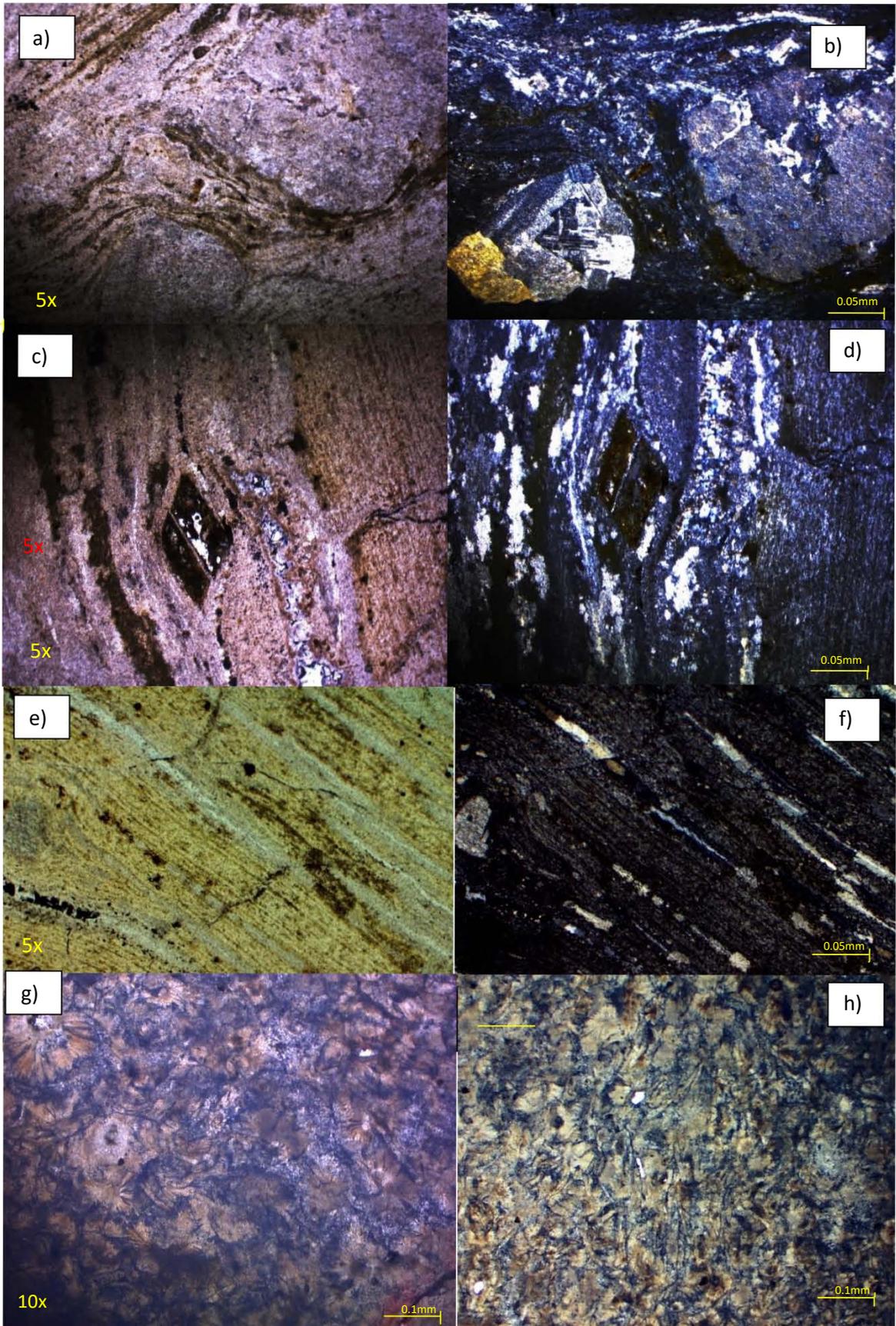


Fig.23. a) y b) Muestra a la roca sin y con nícoles cruzados (imagen de la izquierda y derecha respectivamente). Se aprecia el flujo de la roca y el efecto de bola de nieve que rodea los cristales. En la parte inferior izquierda podemos ver un glomerocristal de plagioclasas y en la zona superior derecha un lítico altamente alterado a sericita y óxidos. c) y d) Se aprecia en el centro la forma de un anfíbol completamente oxidado rodeado por el flujo de la roca (sin y con nícoles cruzados). Así mismo, se ven bandas de óxido y de cuarzo, grueso (relleno de cavidad). e) y f) Imagen sin/con nícoles cruzados donde se aprecia el bandeamiento (flujo de la roca), posibles pómez alargadas entre este flujo donde algunas son reemplazadas por un mosaico de cuarzo más grueso que el resto de la roca que se encuentra silicificada con cuarzo más fino. También se aprecia un cristal de posible cuarzo con el efecto de bola de nieve con el flujo bordeándolo alterado a sericita. g) Esferulitas con su forma radial/ovalada bien marcada alteradas a sericita y óxidos, con el centro oxidado o con un cristal de cuarzo en él (lámina delgada OTNX-05). h) En otra área de la lámina la forma de las esferulitas se pierde y se aprecian gusanitos entre estas formas que representan posibles espículas (lámina delgada OTNX-06).

## INTERPRETACIÓN

Por la presencia de ceniza (vidrio) y el bandeamiento podemos decir que se trata de una roca generada a partir de un flujo piroclástico (corriente de densidad piroclástica) en el que el depósito se encuentra alejado de la fuente por el tamaño fino del material cuyo magma presentaba una alta cantidad de volátiles por lo que sufrió una fragmentación magmática que generó la ceniza. La pómez (componente juvenil) presentan una textura eutaxítica paralela al flujo y está siendo intercalada con bandas de óxidos, lo que representa un alto grado de soldamiento en la roca ya que se aprecian aplastadas y se puede continuar por varios centímetros.

La composición de la roca en general es félsica, lo que indica que entre sus componentes los cristales son de cuarzo, feldespato-plagioclasa y tiene un poco de anfíboles. Su alto contenido en vidrio indica un enfriamiento súbito y un alto grado de explosividad y viscosidad en el flujo aparentando ser una erupción efusiva por ello se ve tan bandeada, clasificándola como reomórfica.

El vidrio es un material metaestable por lo que la devitrificación es un proceso muy probable, prueba de ello es el alto grado de silicificación de la roca y la presencia de esferulitas con cristalización de sílice. Dado que en este proceso la nucleación es retardada, la tendencia a formar cristales dendríticos en haces radiales es lo común; sin embargo, la presencia de una fase fluida es crítica para favorecer la devitrificación (*Castro-Dorado, 2015*). Así mismo, se tiene la formación de espículas entre estas esferulitas que en vez de tener formas picudas parecen gusanos. La alteración es tan alta en la roca que la precipitación de óxidos de hierro reemplazó a los pocos minerales máficos, precipitó en los bordes de los líticos y glomerocristales, y se intercalan con las pómez alargadas reemplazadas. Podemos interpretar a los glomerocristales como una fase de estancamiento de magma previa a la erupción explosiva.

- **TNX-015** (*Presa La Soledad, Fm. Tenexcate*)

### MUESTRA DE MANO

Roca ígnea félsica y leucocrática posiblemente piroclástica de color gris azulado con tonalidades pardas amarillentas por alteración de óxidos. Los cristales que se aprecian tienen un tamaño de un milímetro a un centímetro y son de cuarzo, feldespato, micas y muy pocos anfíboles en una matriz de coloración azul-verdosa que aparenta ser de vidrio (*Fig.24.*).

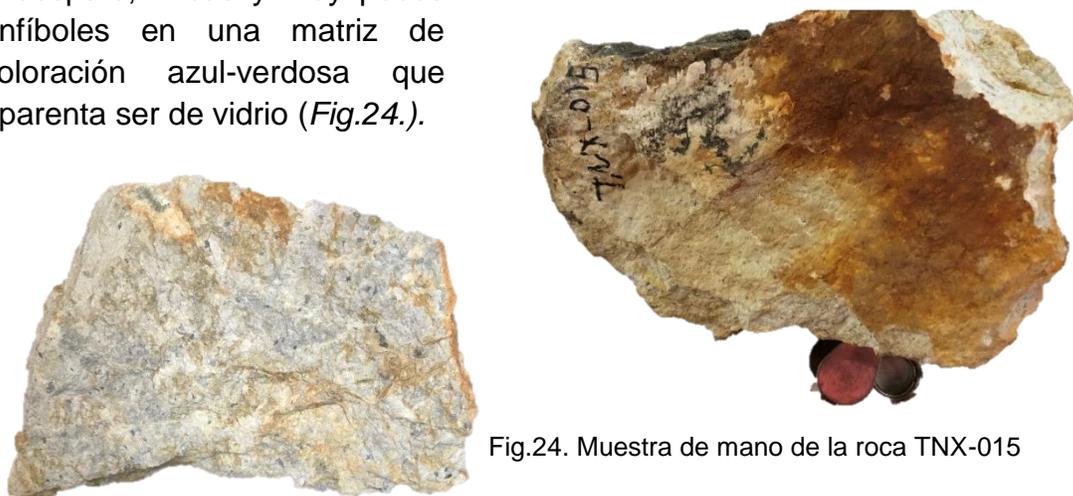


Fig.24. Muestra de mano de la roca TNX-015

**Observaciones:** la roca se encontró como parte de la pared de una cascada, por lo que presenta una costra de meteorización en su superficie de color pardo oscuro y tonalidades naranja, lo que significa que en lámina delgada su mineralogía se va a encontrar altamente alterada.

MINERAL	COLOR	PORCENTAJE	DESCRIPCIÓN
Cuarzo	gris-transparente	38%	Mineral de forma irregular de máximo 3mm
Feldespato	blanco	45%	Mineral euedral tabular alargado de 5mm
Anfíbol	negro	10%	Mineral prismático alargado de 3mm y fragmentos subedrales que dejan ver la figura de rombo de 2-4mm
Mica (biotita)	gris-pardo brillante	7%	Mineral planar de máximo 4mm

Tabla 10. Descripción en muestra de mano de la roca TNX-015

**NOMBRE:** *Composición riolítica, posible riolita/ignimbrita a justificar con lámina delgada.*

## LÁMINA DELGADA

Roca ígnea de composición ácida con matriz de ceniza y espículas alterada a sericita (arcillas) y altamente silicificada. Presenta cristales como feldespatos, micas y anfíboles alterados a sericita y óxidos (*Fig.25.*).

- Pómez aplastada, cloritizada, reemplazada por cuarzo de mayor tamaño formando un mosaico de forma subedral a irregular del mismo tamaño.
- Feldespato: sanidino con macla simple de forma tabular subedral.
- Plagioclasas con maclas múltiples de forma tabular. Presentan maclas de crecimiento (intercrecimiento). Presentan los bordes de los cristales silicificados con cuarzos de 1mm de forma anedral, al igual que en los feldespatos.
- Cuarzo en forma de cristal de 4mm presentan extinción oblicua. También presenta textura esqueletal con bahías de disolución donde precipitó cuarzo en tamaño fino.
- Anfíbol reemplazado por óxidos con los bordes cloritizados de forma subedral en corte transversal. Otros posibles anfíboles de forma prismática están siendo reemplazados por biotita.
- Biotita se encuentra rodeada por cuarzo ligeramente más grande que el de la matriz. Biotita intercrecida entre feldespato (identificable con las maclas simples el cual presenta extinción oscilante). Reemplazado por clorita.

<b>COMPONENTES 20%</b>	<b>MATRIZ 80%</b>
Cuarzo 3%	Espículas 20%
Feldespato/plagioclasa 5%	Pómez 20%
Anfíbol 3%	Ceniza 10%
Biotita 3%	Sílice 30%
Pómez 6%	
Tabla 11. Porcentajes en lámina delgada de la roca TNX-015	

**NOMBRE: Ignimbrita cristalina**

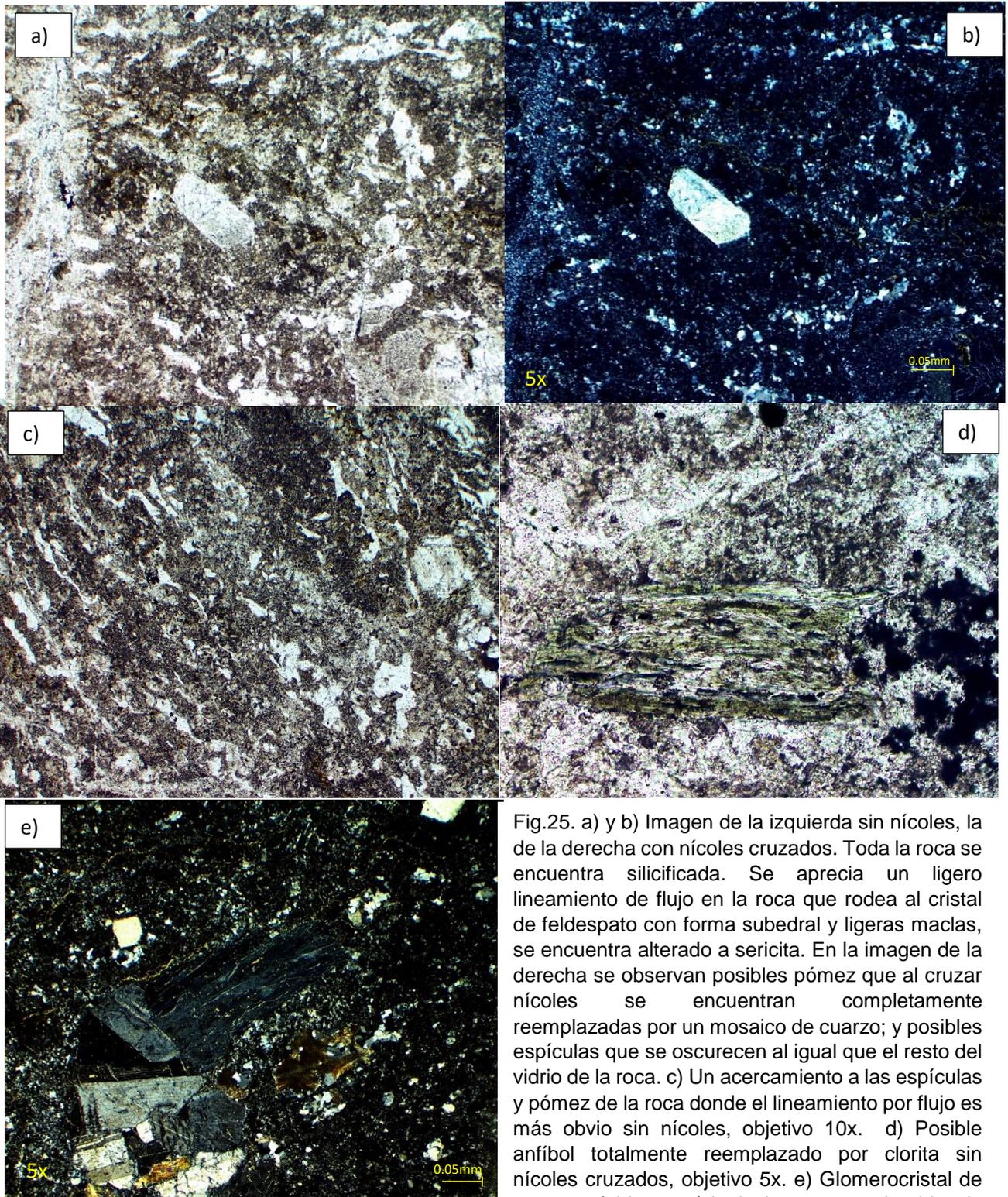


Fig.25. a) y b) Imagen de la izquierda sin n icos, la de la derecha con n icos cruzados. Toda la roca se encuentra silicificada. Se aprecia un ligero lineamiento de flujo en la roca que rodea al cristal de feldespato con forma subedral y ligeras maclas, se encuentra alterado a sericita. En la imagen de la derecha se observan posibles pómez que al cruzar n icos se encuentran completamente reemplazadas por un mosaico de cuarzo; y posibles espículas que se oscurecen al igual que el resto del vidrio de la roca. c) Un acercamiento a las espículas y pómez de la roca donde el lineamiento por flujo es más obvio sin n icos, objetivo 10x. d) Posible anfíbol totalmente reemplazado por clorita sin n icos cruzados, objetivo 5x. e) Glomerocrystal de cuarzo y feldespato/plagioclasas con todo el borde de micro cuarzo, alteración a sericita, clorita y óxidos.

## INTERPRETACIÓN

La presencia de ceniza (vidrio) y un ligero bandeamiento en lámina delgada nos indican que la roca se generó a partir de un flujo piroclástico cuyo magma presentaba una alta cantidad de volátiles por lo que sufrió una fragmentación magmática que generó la ceniza. La roca se encuentra altamente soldada, prueba de ello son las pómez con textura eutaxítica intercaladas con las espículas con formas irregulares y picudas.

Como se mencionó en muestra de mano, la composición de la roca es félsica, sin embargo, la presencia de líticos y componentes juveniles nos indican su origen piroclástico. Su alto contenido en vidrio indica un enfriamiento súbito y un alto grado de explosividad. El vidrio es un material metaestable por lo que la devitrificación es un proceso probable que afectó la roca, prueba de ello es el alto grado de silicificación que muestra.

- **OTNX-04** (Buenavista)

### MUESTRA DE MANO

Roca ígnea máfica, mesocrática de color gris verdoso y textura porfídica donde los cristales de olivino se aprecian a simple vista con coloración verdosa (Fig.26.). Por sus características mencionadas anteriormente suponemos que la roca debe de presentar un bajo contenido de sílice de alrededor de 50%.



Fig.26. Muestra de mano de la roca OTNX-04

**Matriz: 45%**

**Fenocristales: 55%**

FENOCRISTALES	COLOR	PORCENTAJE	DESCRIPCIÓN
<b>Olivino</b>	Verde	35%	Cristales pequeños de 2mm-0.5cm de forma subedral
<b>Plagioclasa</b>	Blanco-transparente	13%	Cristales alargados de 4mm
<b>Biotita</b>	Negro brillante	7%	Cristales de mayor tamaño de 1cm

Tabla 12. Descripción en muestra de mano de la roca OTNX-04 (porcentaje sobre el total de fenocristales)

**Nombre: Basalto de olivino**

**LÁMINA DELGADA**

Roca ígnea con textura porfídica con fenocristales de plagioclasa, piroxenos y olivinos. con texturas esqueletales. La matriz es microcristalina conformada por plagioclasas alargadas, prácticamente aciculares, y piroxenos pseudoprismáticos (subedrales) alargados intercrecidos sin orientación alguna. En el espacio que existe entre estos cristales se encuentran los óxidos. Se alcanzan a apreciar texturas esqueletales en las plagioclasas y su alteración a sericita. La mayoría de los minerales máficos se encuentran alterándose a óxidos de Fe por la coloración marrón y el olivino alterándose a clorita por la coloración verdosa (Fig.27.).

- Plagioclasa tabular largada (casi aciculares) con maclas de albita, con extinción oscilante y con bordes de disolución (subedrales) alterándose a sericita y óxidos. Se encuentran, principalmente labradorita y bitownita de 2-8mm. Las plagioclasas aciculares se encuentran rodeadas entre piroxenos (conformando la matriz). Algunos cristales se encuentran en aglomeración, cada uno de 2mm, aproximadamente (fenocristales).
- Piroxeno (augita) con forma irregular y algunos pseudoprismática de 0.3mm hasta 6mm en textura seriada (grano fino de 2-3mm y gran grueso, mayor a 5mm). Así mismo, los piroxenos tienen los bordes corroídos e intercrecimiento de piroxeno en olivino. Los piroxenos de tamaño más fino conforman la matriz.
- La mayoría de los olivinos presentan textura esqueletal con bahías. Textura poikilitica de olivino en piroxeno. También se encuentra en glomerocristales de 5-10mm

- **Matriz: 30%**                      **Fenocristales: 70%**

	MINERALOGÍA	PORCENTAJE	DESCRIPCIÓN	TEXTURA
<b>Minerales esenciales</b>	Plagioclasa	40%	Subedrales (tabulares) a anedrales de 2-4mm	Esqueletal, poikilítica de piroxeno en plagioclasa. Seriada
	Augita	18%	Prismático (subedral) a irregular 2-8mm	Esqueletal. Seriada
<b>Minerales tipo</b>	Olivino	10%	Irregular y en glomerocristales de 3-8mm	Intercrecimiento de olivino y piroxeno.

<b>Minerales Accesorios</b>	Óxidos	2%	Irregular	Rellenando la matriz (entre los cristales)
<b>Minerales Secundarios</b>	Sericita Clorita		En las plagioclasas En los olivinos dando una coloración verdosa-amarillenta.	Alteración

Tabla 13. Descripción en lámina delgada de la roca OTNX-04

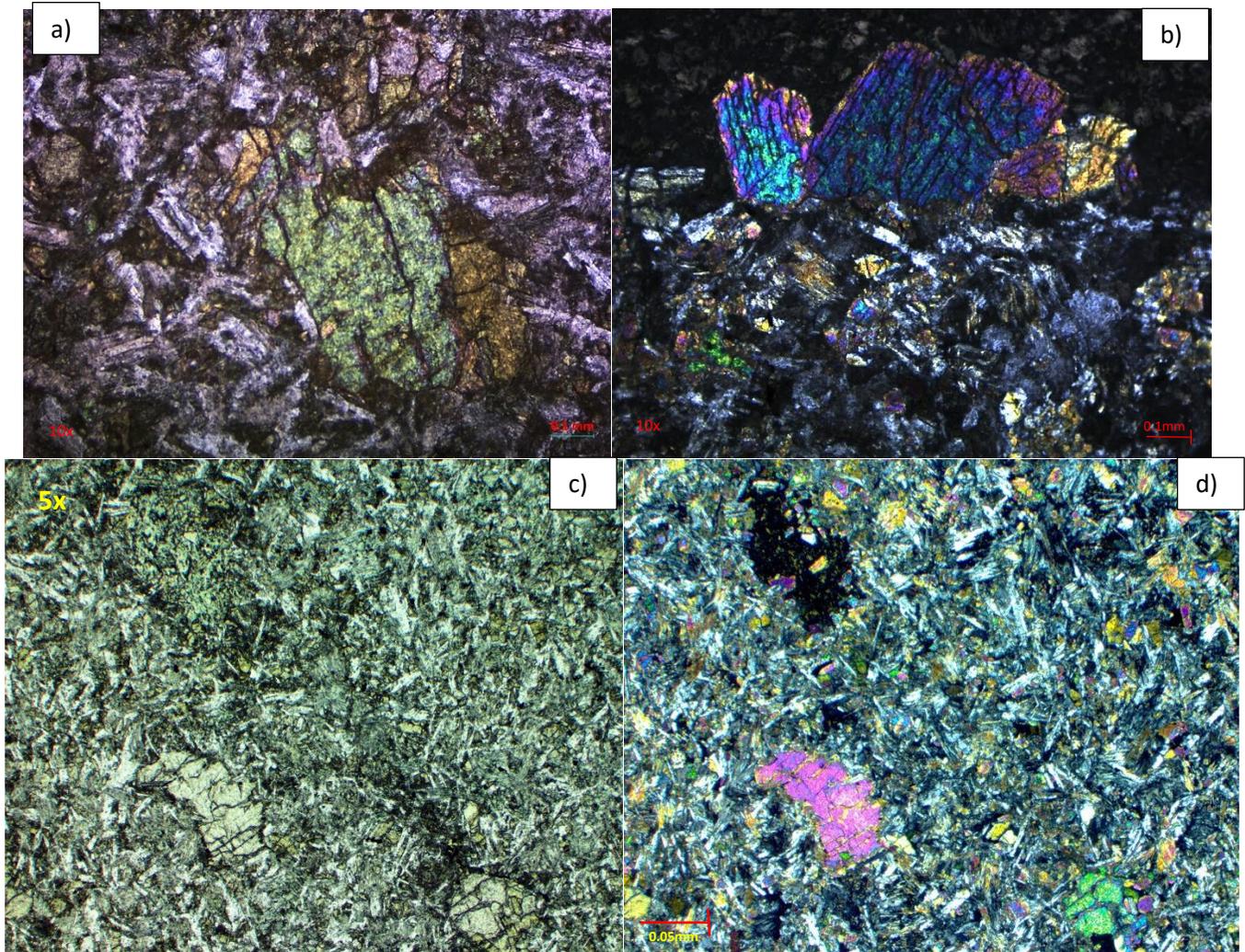


Fig.27. a) y b) Roca sin/con nicoles cruzados. Basalto con cristales tabulares y alargados de plagioclasas (blanco) entre cristales de tamaño fino de piroxeno (coloración miel) y unos olivinos de mayor tamaño con relieve marcado. Finalmente se observa una vesícula de tamaño similar a los olivinos. c) Acercamiento de un olivino con nicoles cruzados anedral rodeado de plagioclasas tabulares alargadas con textura esqueletal. d) Acercamiento a la augita (piroxeno) con nicoles cruzados donde se aprecia su crucero en dos direcciones y una birrefringencia en tonalidades rosas que nos pueden indicar un posible contenido alto en Ti. El mineral está rodeado de plagioclasas tabulares de tamaño fino y piroxenos de tamaño más fino con colores de birrefringencia de un orden más bajo.

**NOMBRE: Basalto**

## INTERPRETACIÓN

La roca presenta una textura porfídica la cual indica dos historias de enfriamiento, una lenta en la que se produjeron los fenocristales de mayor tamaño y, la segunda, mucho más rápida, que generó la matriz de plagioclasas con formas tabulares alargadas con textura esquelética. Los piroxenos presentan dos tamaños principales, textura seriada, uno como fenocristal y la otra relleno algunos espacios entre plagioclasas. El olivino se encuentra como macrocristal con formas esqueléticas. La textura esquelética se genera por la sobresaturación magmática debido a un rápido enfriamiento, que se ve reflejado en un marcado crecimiento que conlleva a un rápido empobrecimiento del líquido residual. Según estudios hechos en laboratorios si se modifica la temperatura unos 50°C, de manera abrupta, se genera esta textura en el olivino. En cambio, en la plagioclasa y los piroxenos, la diferencia tiene que ser de aproximadamente 100-200°C (Castro-Dorado, 2015). Así mismo, la textura seriada, que nos da un cambio gradual en el tamaño de la augita, nos indica un desequilibrio entre la tasa de crecimiento del cristal y el grado de sobrenfriamiento impuesto en el magma por las condiciones ambientales.

## 4.2 GEOQUÍMICA

El estudio de la geoquímica se realiza a partir del análisis de seis muestras de roca obtenidas en la región de Puebla entre Teziutlán a Cuetzalan, unidades que pertenecen, según trabajos previos, a la formación Tenexcate. Tres de las muestras, TNX-011, TNX-012, TNX-013, fueron tomadas en la cañada del río Tecolutla (cerca de Cuetzalan); mientras que TNX-005 y OTNX-04 provienen de la región de Teziutlán, mientras que la roca TNX-015 se encontró en la Presa La Soledad, sobre la carretera en la margen derecha.

Los resultados se presentan en una tabla que muestra su composición en elementos mayores en forma de óxidos (*Tabla 19*) y elementos traza (*Tabla 20*). Además, se incluyen los resultados de análisis geoquímicos de dos rocas GTQ1-83 y GTQ1-100, tomadas de la Tesis de Moreno y Sánchez (2002), cercanas a la zona de estudio (en la región de la Presa La Soledad), a fin de comparar las rocas y contar con más datos para dar una mejor interpretación.

### 4.2.1 ELEMENTOS MAYORES

Las muestras se analizaron por óxidos mayores y elementos traza en el Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía del Instituto de Geología, UNAM. A partir de los resultados (*Tabla 14.*) se obtuvo un diagrama tipo TAS, con la línea de discriminación de alcalino-subalcalino con base al contenido de  $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$

(según Le Bas et al., 1986 e Irving y Baragar 1971). Para definir el contenido potásico de las rocas se usó el diagrama  $\text{SiO}_2$  vs  $\text{K}_2\text{O}$  de Peccerillo y Taylor (1976) y modificado por Le Maitre et al. (1989). Las interpretaciones se llevaron a cabo en una base anhidra calculada a partir de los análisis geoquímicos.

### Diagrama TAS

Las rocas ígneas se clasifican por su abundancia en especies minerales (que se relacionan con el color de la roca) en félsicas o máficas, ya sean extrusivas o intrusivas, y en la abundancia de sus elementos químicos (mineralogía); para esta última se utiliza el diagrama TAS (Total Alkali Silica) (Fig.28.) propuesto por Irvine y Baragar (1971). Este diagrama sirve para calcular los porcentajes de minerales alcalinos (potasio y sodio) en relación con el sílice que se hallan en las rocas, eliminando el contenido de  $\text{CO}_2$  y agua que puedan presentar. Dependiendo del porcentaje de álcalis y de sílice se generan tres diferentes series, la serie fuertemente alcalina, alcalina y la subalcalina, para clasificar a las rocas.

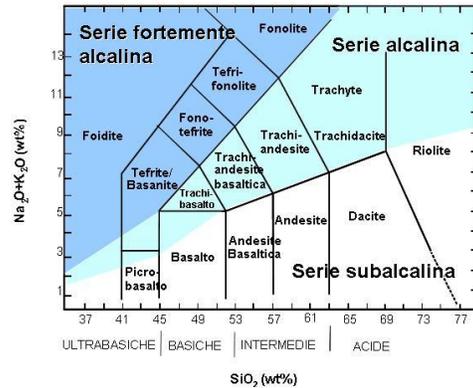


Fig.28. Diagrama TAS

### Diagrama TAS

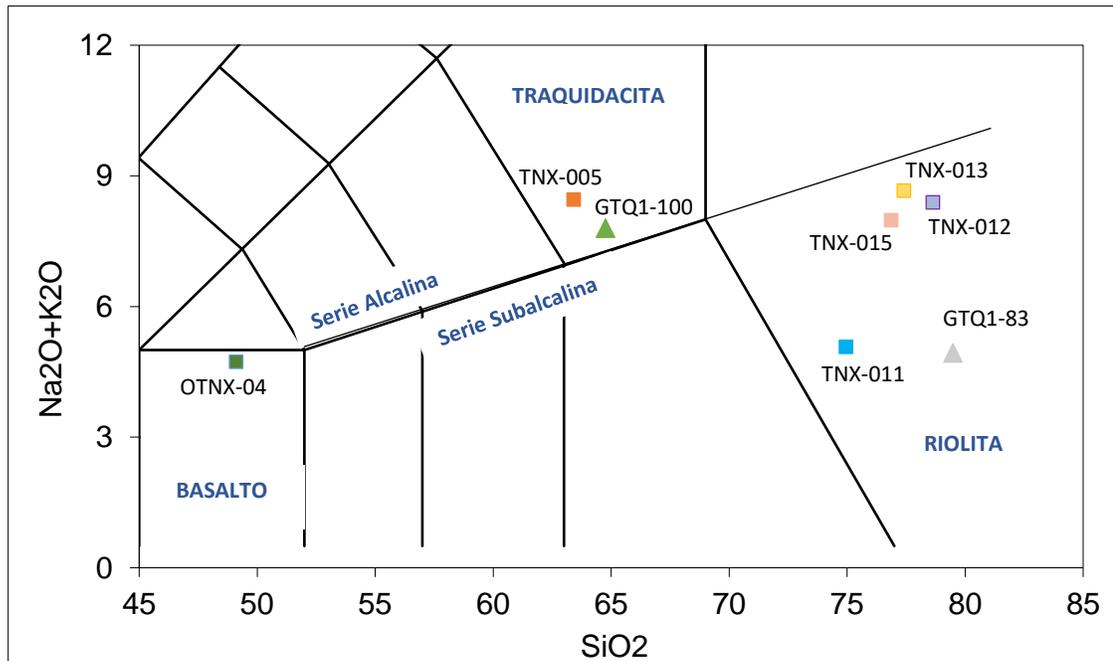


Fig.29. Diagrama TAS de las rocas de la zona de Teziutlán-Cuetzalan, norte de Puebla. Se presentan cuatro tipos de rocas, dos Traquidacitas: TNX-005 y QTQ1-100; cinco riolitas: TNX-011, TNX-012, TNX-013, TNX-015 y GTQ1-83; más un basalto: OTNX-04. Los datos geoquímicos de las rocas GTQ1-83 y GTQ1-100 fueron tomados de la Tesis de Licenciatura de Moreno, E. y Sánchez, S. (2002)

En la zona estudiada, las rocas clasificaron principalmente en una composición félsica, sin embargo, tenemos una roca máfica y una intermedia, por lo que el contenido en sílice varía de 47% hasta 60-76%, y tienen de 4 a casi 9 en porcentaje en peso de Na<sub>2</sub>O y K<sub>2</sub>O (con mayor cantidad de sodio que potasio). La roca OTNX-04 clasificó como un Basalto subcalcalino, la roca TNX-005 como una Traquidacita de la serie alcalina, y se tienen cuatro Riolitas de la serie subcalcalina (TNX-011, TNX-012, TNX-013 y TNX-015). De la misma manera, podemos observar que la roca GTQ1-100 clasificó como Traquidacita, al igual que la TNX-005, y finalmente, la GTQ1-83 clasificó en el campo de las riolitas subcalcalinas como la mayoría de nuestras muestras (*Fig.29.*).

### Sílice Vs. Potasio

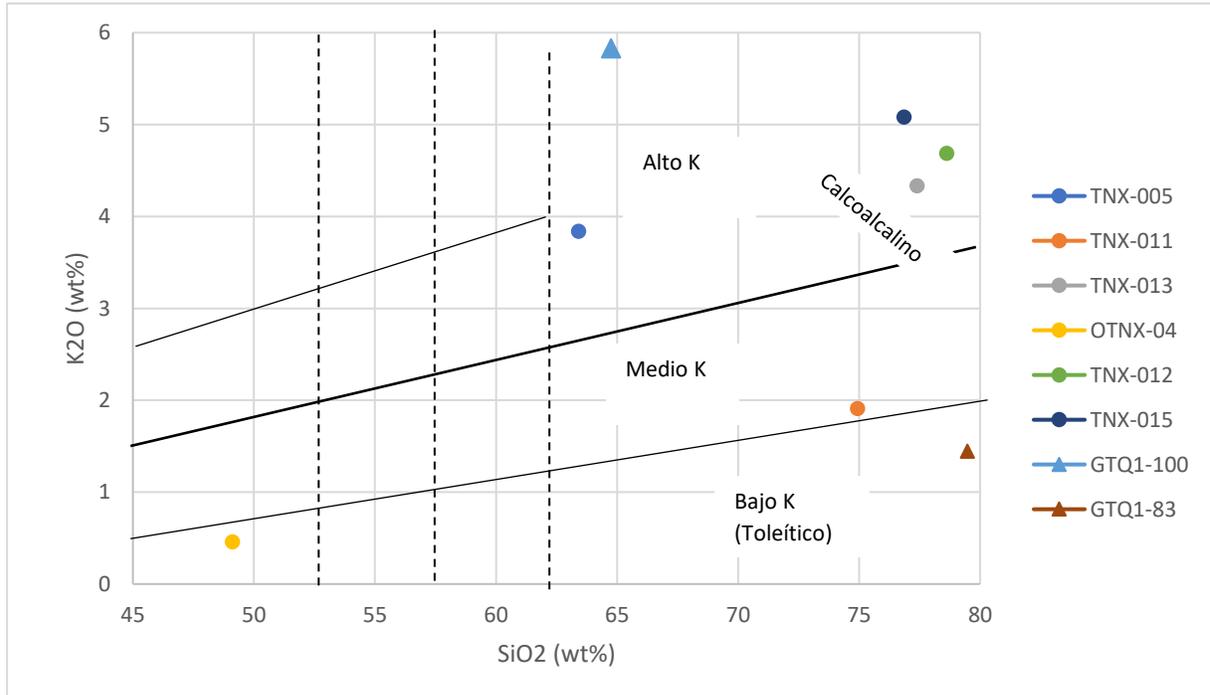


Fig.30. Representación del diagrama sílice contra potasio de Peccerillo y Taylor (1976) y modificado por Le Maitre et al. (1989). GTQ1-83 y GTQ1-100, tomadas de la Tesis de Licenciatura de Moreno y Sánchez (2002)

De la misma manera, podemos clasificar a las rocas por su contenido de potasio y sílice en: toleíticas, bajo potasio, y calcalcalinas de medio a alto K (*Fig.30.*). Las muestras OTNX-04 y GTQ1-83 clasifican en la zona de rocas toleíticas, es decir, tienen bajo potasio. La roca TNX-011 está casi en el límite de rocas toleíticas, sin embargo, ya clasifica en las rocas calcalcalinas de medio potasio. Mientras que las

rocas TNX-015, 012 y 013, clasificadas como riolitas en el diagrama TAS, caen juntas en el rango de rocas calcialcalinas de alto K, junto con la roca TNX.005 la cual solo modifica su contenido de sílice (más bajo), pero sigue en la misma clasificación. Finalmente, la roca que tuvo un resultado totalmente diferente a las demás fue la roca GTQ1-100 cuyo contenido de potasio resultó ser sumamente alto, llegando casi al valor de 6 wt%.

### Diagrama AFM

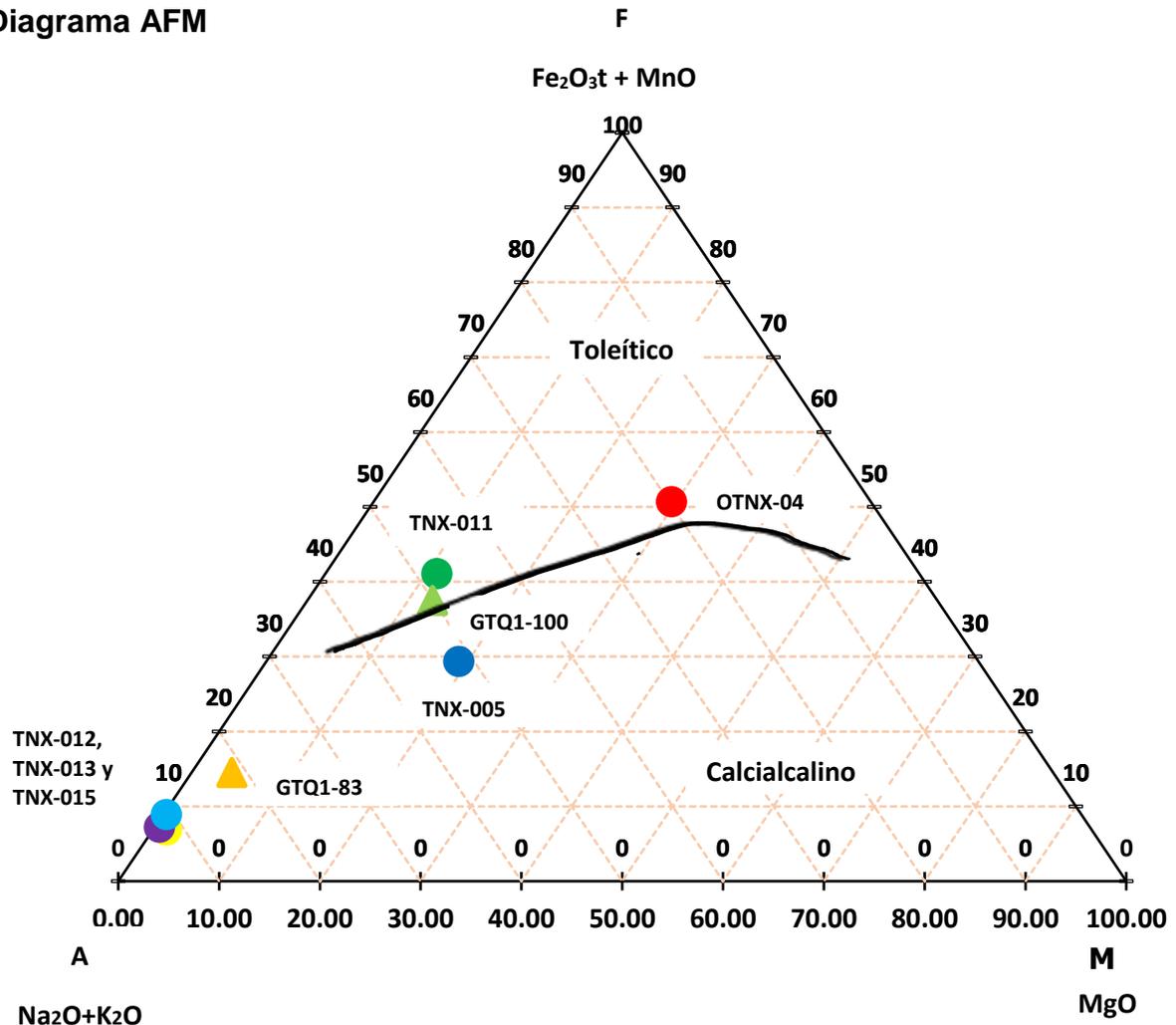


Fig.31. Diagrama AFM de Kuno, 1968. GTQ1-83 y GTQ1-100, tomadas de la Tesis de Licenciatura de Moreno y Sánchez (2002)

El diagrama AFM, realizado por Kuno (1968), nos permite conocer la posible trayectoria que siguieron las rocas en su evolución magmática al dividir el triángulo en dos series, la calcoalcalina, que sigue la cristalización de Bowen, y la serie toleítica que tiene un enriquecimiento en minerales con  $\text{FeO}$  en la primera etapa de la diferenciación. La trayectoria tradicional o calcoalcalina sigue la cristalización de minerales de rocas basálticas hasta tener minerales enriquecidos en sílice, las

cuales se relacionan con las rocas que se desarrollan en una zona cercana a un arco magmático por lo que el magma es hidratado, lo que retrasa la formación de plagioclasa, pero favorece la formación de óxidos de Fe (por esto la disminución de Fe desde las primeras etapas de la diferenciación). La segunda trayectoria, llamada toleítica, nos indica que las rocas que siguen esta serie se generaron de magmas anhidros donde no cristalizan óxidos de Fe. Así mismo, este tipo de magmas se caracterizan por la cristalización de forma temprana de plagioclasa en las condiciones anhidras.

En este caso las rocas de la zona presentan las dos trayectorias, las rocas OTNX-05, TNX-011 y la GTQ1-100 pertenecen a la serie toleítica debido a que se encuentran prácticamente sobre la línea (siguiendo la forma de la trayectoria). Mientras que las rocas TNX-005, TNX-012, TNX-013 y TNX-015, junto con la GTQ1-83, pertenecen a la serie calcoalcalina ya que se encuentran por debajo y alejadas de la línea de discriminación de Kuno (*Fig.31*).

#### **4.2.2 ELEMENTOS TRAZA**

Se realizó un primer acercamiento a la geoquímica analizando sólo los elementos traza que se obtienen con los estudios de Fluorescencia de rayos X debido a que las rocas presentan una edad Jurásica Media (según las relaciones estratigráficas de la zona y la información recabada en trabajos anteriores, como ya se mencionó en los capítulos anteriores), además, de encontrarse en zonas con contacto de agua, por lo que las alteraciones y la meteorización a lo largo del tiempo son muy evidentes, sugiriéndonos una geoquímica posiblemente afectada por estos factores; no obstante, los valores de las LOI no resultaron demasiado altos como se esperaba.

Normalmente, los elementos traza se analizan en diagramas conocidos como spider en donde se interpreta la tendencia completa del comportamiento de elementos móviles e inmóviles de las rocas; sin embargo, al no tener los valores en ppm de todos los elementos traza que los conforman, no fue posible la realización de estos diagramas, por lo que para la interpretación de los datos se realizaron diagramas de variación para ver el comportamiento de algunos elementos LILE y HFSE con respecto al sílice (*Tabla 15*).

## Diagramas De Variación

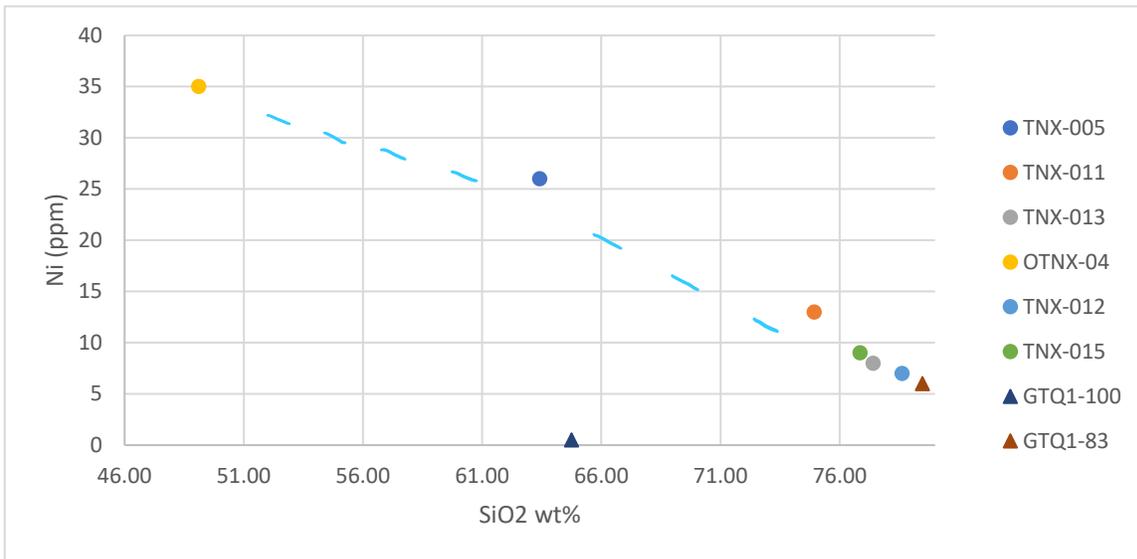


Fig.32. Diagrama que muestra el comportamiento del Ni con respecto a la variación de sílice en las distintas rocas muestreadas. GTQ1-83 y GTQ1-100, tomadas de la Tesis de Licenciatura de Moreno y Sánchez (2002).

El diagrama (Fig.32.) presenta la relación que existe entre el contenido de Ni conforme se incrementa la sílice de las rocas. Se puede observar una disminución de este elemento a partir de la roca basáltica OTNX-04 de 35ppm a aproximadamente 8ppm de la ignimbrita riolítica. Como sabemos, el Ni disminuye conforme el contenido de sílice aumenta ya que se va perdiendo en la precipitación de minerales máficos, especialmente en el olivino. La disminución da un un fraccionamiento prácticamente lineal para las rocas, exceptuando la GTQ1-100, quien casi no presenta concentración de Ni.

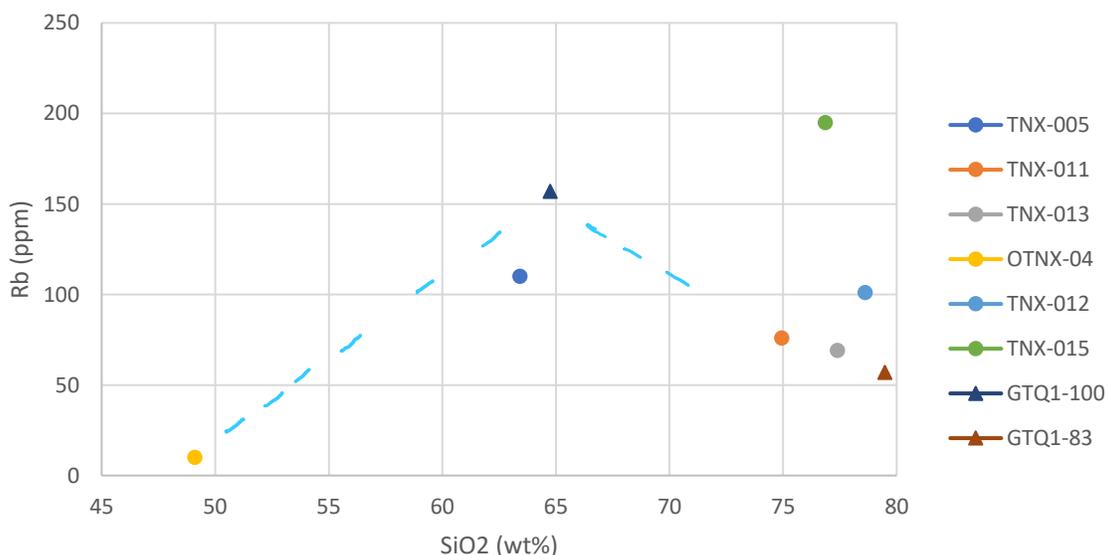


Fig.33. Diagrama que muestra el comportamiento del Rb con respecto a la variación de sílice en las distintas rocas muestreadas. GTQ1-83 y GTQ1-100, tomadas de la Tesis de Licenciatura de Moreno y Sánchez (2002)

El siguiente diagrama (*Fig.33.*) muestra el comportamiento del Rubidio conforme aumenta el SiO<sub>2</sub> de las rocas. En este caso se aprecia que la roca básica OTNX-04 tiene el valor más bajo de Rb con 10ppm, valor que parece se va incrementando generando un pico positivo hacia los valores intermedios, como la dacita TNX-005, para finalmente mostrar un fraccionamiento negativo llegando al valor de 69ppm en las rocas más félsicas TNX-011,012, 013 y GTQ1-83. A excepción de la roca TNX-015 cuyo valor es el más alto de todo el conjunto de rocas (~200ppm) a pesar de haber clasificado como riolita.

Este comportamiento de incremento (fraccionamiento positivo) a decremento de la concentración (fraccionamiento negativo) de Rb en las rocas se debe a que es un elemento incompatible que tiende a permanecer en el fluido y no cristaliza con los minerales más máficos, por eso parece incrementar la cantidad de Rb hacia las rocas félsicas; sin embargo, cuando la roca llega a la clasificación intermedia con alrededor de 65wt% de sílice, el contenido de Rb tiende a decrecer, como se aprecia en el diagrama, posiblemente en relación con la cristalización de feldespatos.

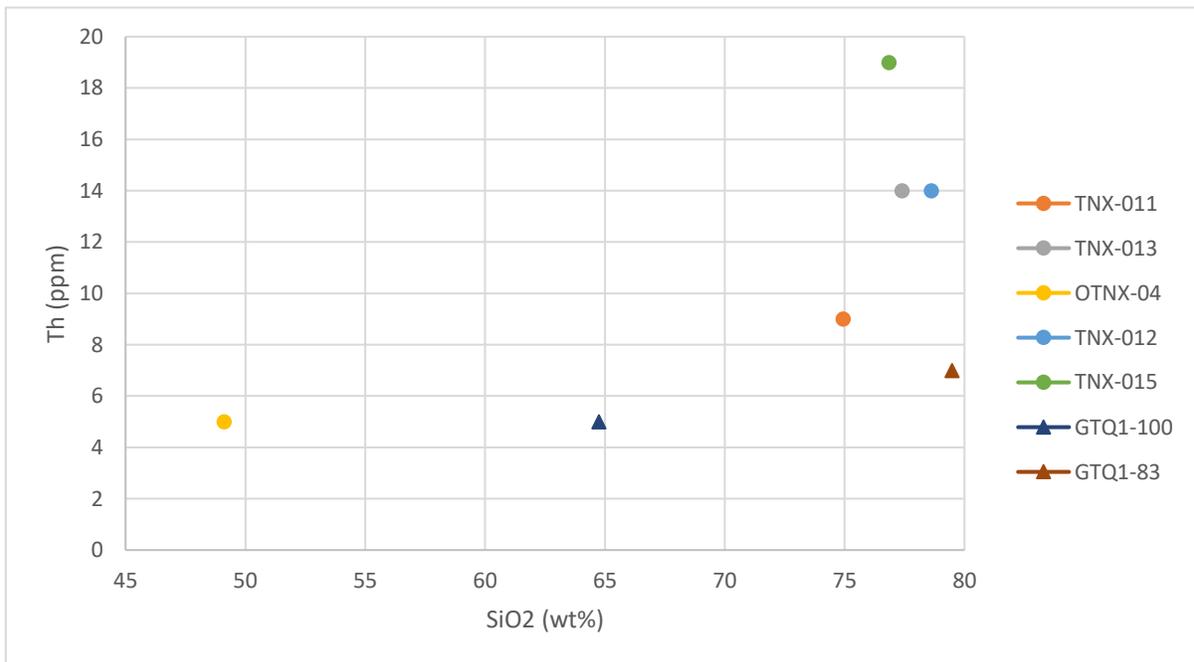


Fig.34. Diagrama que muestra el comportamiento del Th con respecto a la variación de sílice en las distintas rocas muestreadas. GTQ1-83 y GTQ1-100, tomadas de la Tesis de Licenciatura de Moreno y Sánchez (2002)

La Fig.34. muestra un fraccionamiento positivo, no pronunciado, en los valores de Th con respecto al incremento de sílice. Se puede observar bajos valores de Th en las rocas OTNX-04, GTQ1-100, GTQ1-83 y TNX-011 donde sus valores incrementan de 5ppm a 10ppm; sin embargo, incrementan de manera súbita, hasta casi 20ppm, en las rocas más félsicas (TNX-012, TNX-013 y TNX-015). La única roca que se sale de esta tendencia es la TNX-005 que muestra valores de casi

120ppm, la cual fue caracterizada como Traquidacita de la serie alcalina en el diagrama TAS, pero que no fue graficada ya que a la escala observada no se puede dibujar.

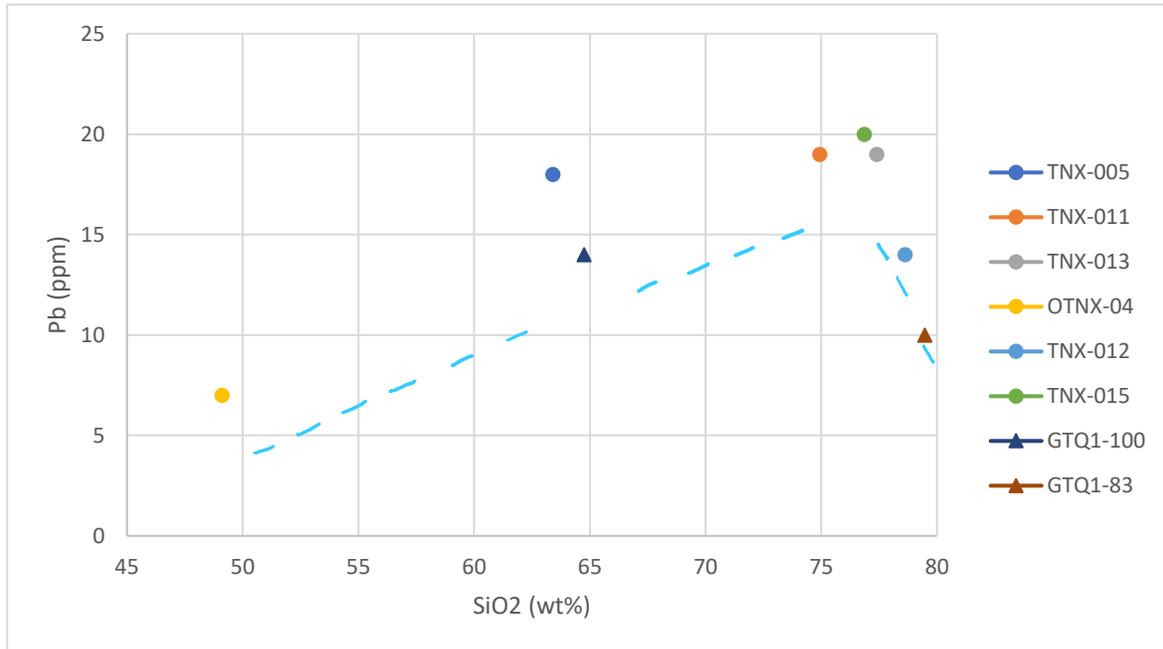


Fig.35. Diagrama que muestra el comportamiento del Pb con respecto a la variación de sílice en las distintas rocas muestreadas. GTQ1-83 y GTQ1-100, tomadas de la Tesis de Licenciatura de Moreno y Sánchez (2002)

El siguiente diagrama (*Fig.35.*) muestra un aumento en la cantidad de plomo presente en las rocas conforme el sílice incrementa, es decir, las rocas más máficas tienden a tener menor cantidad de plomo que las rocas que clasifican como riolitas, por las características de incompatibilidad que presenta este elemento. En este caso, podemos observar que las rocas siguen este patrón de fraccionamiento positivo casi lineal. Sin embargo, también se observa que dos rocas encontradas en la cañada del río Tecolutla, TNX-011 y TNX-013, presentan valores prácticamente idénticos de Pb y que el pico más alto lo tiene la roca TNX-015. Finalmente, se aprecia que las rocas TNX-012 y GTQ1-83 muestran una tendencia de fraccionamiento negativo llegando a valores de 10ppm, a pesar de ser rocas diferenciadas.

En la Fig.36. se advierte como se distribuyen los valores de Sr conforme varía el contenido de sílice en las rocas, podemos apreciar que la roca máfica (basalto) OTNX-04 tiene bajos niveles de Sr, y, mientras las rocas se vuelven más félsicas, este contenido no varía de más de 100ppm. Sin embargo, la roca TNX-005 y GTQ1-100 se salen de este patrón teniendo valores de 200 y 400ppm, respectivamente. Finalmente, la roca TNX-011 tiene el valor más alto de todo el conjunto de aproximadamente 900ppm. El Sr al igual que el Rb, son elementos incompatibles,

altamente móviles con agua, por lo que deberían tener un patrón similar, sin embargo, las rocas en sí no muestran un patrón definido.

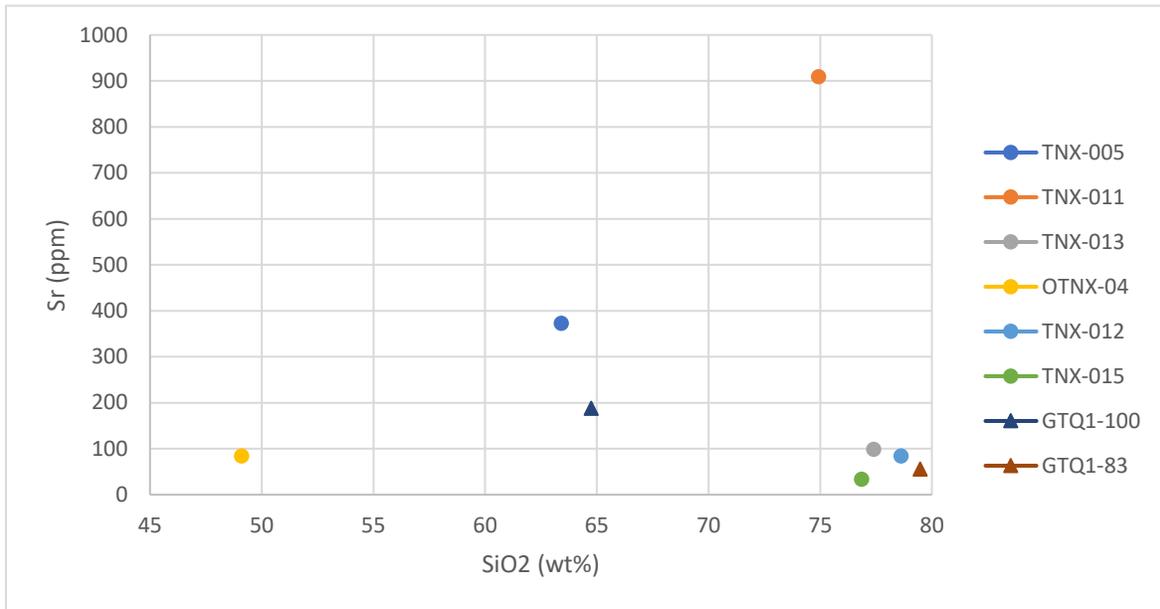


Fig.36. Diagrama que muestra el comportamiento del Sr con respecto a la variación de sílice en las distintas rocas muestreadas. GTQ1-83 y GTQ1-100, tomadas de la Tesis de Licenciatura de Moreno y Sánchez (2002)

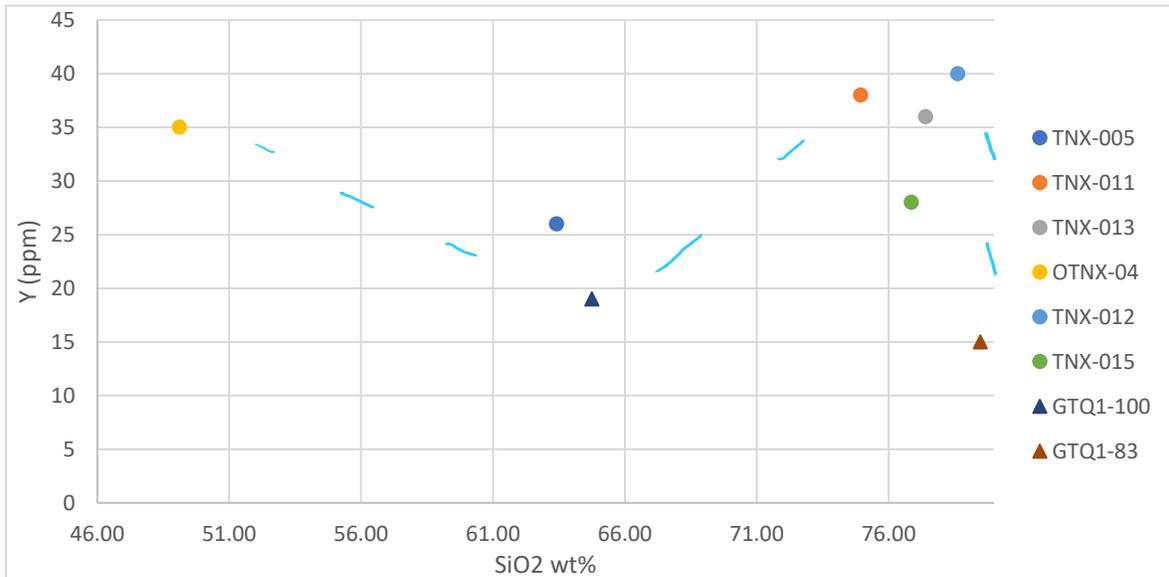


Fig.37. Diagrama que muestra el comportamiento del Y con respecto a la variación de sílice en las distintas rocas muestreadas. GTQ1-83 y GTQ1-100, tomadas de la Tesis de Licenciatura de Moreno y Sánchez (2002)

El diagrama (Fig.37.) muestra la distribución del Y conforme las rocas se vuelven más silíceas, podemos observar que la figura muestra tres secciones, la roca más máfica presenta un alto contenido de Y de aproximadamente 35ppm;

posteriormente, se aprecia un fraccionamiento negativo hacia las rocas clasificadas como Traquidacitas en el TAS (intermedias) mostrando un contenido de entre el 18-30ppm; y finalmente, las rocas más félsicas presentan otro incremento (fraccionamiento positivo) hasta alcanzar valores de 40ppm. Se puede apreciar que

la roca GTQ1-83 muestra el valor más bajo de la serie de rocas reportado, a pesar de tener alto porcentaje en peso de sílice, tiene un valor de 15ppm.

	TNX-005	TNX-011	TNX-013	OTNX-04	TNX-012	TNX-015	GTQ1-100	GTQ1-83
SiO2	61.847	63.4120084	72.494	74.9353952	76.477	77.40117	77.908	78.6210933
TiO2	0.711	0.72899151	0.609	0.62950942	0.11	0.11132927	0.912	0.94449047
Al2O3	16.185	16.5945536	11.7	12.0940233	12.81	12.9647997	16.856	17.4565037
Fe2O3t	4.567	4.68256572	4.175	4.31560232	0.611	0.6183835	11.517	11.9272991
MnO	0.128	0.13123898	0.038	0.03927973	0.023	0.02327794	0.206	0.21333886
MgO	3.067	3.14460895	1.142	1.18045937	0.132	0.13359513	6.842	7.08574979
CaO	2.595	2.66066522	1.518	1.56912199	0.021	0.02125377	8.083	8.37096106
Na2O	4.504	4.61797154	3.064	3.16718695	4.276	4.32767241	4.124	4.27091964
K2O	3.744	3.83874011	1.849	1.91126915	4.283	4.334757	0.444	0.45981773
P2O5	0.184	0.18865603	0.153	0.15815261	0.063	0.06376131	0.156	0.16155758
P x C	2.3	3.05	1.02			0.82		1.1
SUMA	99.832	100	99.792	100	99.826	100	99.913	100
contenido de volátiles	1.023582		1.03152715				1.00827505	1.0111585

Tabla 14. Análisis químicos de elementos mayores con su corrección de acuerdo con el contenido de volátiles de la zona noreste de Puebla (Teziutlán a Cuetzalan).

Elementos traza (ppm)	TNX-005	TNX-011	TNX-013	OTNX-04	TNX-012	TNX-015	GTQ1-100	GTQ1-83
Rb	110	76	69	101	195	157	57	57
Sr	373	909	99	84	34	188	56	56
Ba	1113	1251	1144	302	739	419	1343	414
Y	26	38	36	12	40	28	19	15
Zr	201	312	277	11	269	75	237	135
Nb	10	5	18	8	24	15	10	5
V	122	86	55	277	47	47	30	15
Cr	103	6	24	120	15	236	4	11
Co	19	15	4	57	12	5	8	8
Ni	26	13	8	35	7	9	0.5	6
Cu	21	9	5	4	7	11	5	16
Zn	132	56	24	103	29	33	125	40
Th	6	9	14	5	14	19	5	7
Pb	18	19	19	7	14	20	14	10

Tabla 15. Resultados de los análisis químicos de elementos traza de la zona noreste de Puebla de Teziutlán a Cuetzalan.

## 5. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos a partir de los estudios petrográficos y geoquímicos realizados para esta tesis (*Tabla 16.*) son discutidos en este apartado, si bien el número de muestras analizadas puede parecer escaso, al comparar los resultados se pueden establecer conexiones interesantes entre las localidades y explicar un posible origen de las rocas. Lo primero que hay que denotar es que los depósitos volcánicos encontrados están distribuidos de manera discontinua y con espesores variantes, lo que concuerda con el depósito de rocas ígneas sobre una topografía irregular como resultado de los procesos tectónicos que se estaban llevando a cabo en ese periodo en México.

NOMBRE	UBICACIÓN	GEOQUÍMICA	CLASIFICACIÓN
TNX-005***	Carretera rumbo a Mazatepec km7	Traquidacita Serie alcalina	Andesita
TNX-008"	Carretera a Teziutlán desde Zacapoaxtla	No se realizó	Toba cristalina
TNX-011***	Cañada del Río Tecolutla	Riolita Serie subalcalina	Brecha volcánica
TNX-012***	Cañada del Río Tecolutla	Riolita Serie subalcalina	Ignimbrita vitriclástica
TNX-013* TNX-014*** OTNX-05** OTNX-06**	Cañada del Río Tecolutla	Riolita Serie subalcalina	Ignimbrita riomórfica
TNX-015***	Margen derecha, Presa La Soledad	Riolita Serie subalcalina	Ignimbrita vitriclástica
OTNX-04***	Cercanías poblado de Buenavista, Puebla	Basalto Serie subalcalina	Basalto de olivino

Tabla 16. Resumen de los estudios petrográficos y geoquímicos de las rocas ígneas de Teziutlán a Cuetzalan, Puebla.

\*Muestra de mano; \*\*Lámina delgada; "Muestra de mano y lámina delgada; \*\*\*Muestra de mano, lámina delgada y estudios geoquímicos

Dicho lo anterior, algunas de las rocas que se encuentran alrededor de la región de Teziutlán (cercanas al poblado de Buenavista y en la Carretera a Tlatlauquitepec-Mazatepec), clasificaron como toleíticas en el diagrama AFM, que puede estar asociado a rocas que se encuentren en zonas de extensión (*rift* y *drift*) oceánicos, por lo que posiblemente su origen pueda estar relacionado con la apertura del Golfo de México; sin embargo, se requieren más estudios que comprueben esta hipótesis. En este sector, se tienen las muestras OTNX-04, TNX-005 y a la muestra reportada por Ángeles-Moreno E. y Sánchez-Martínez S. (2002), GTQ1-100.

La roca OTNX-04 clasificó como basalto de la serie subalcalina (ubicada muy cercana a la línea alcalina) de bajo potasio, presenta una matriz de plagioclasas aciculares y piroxenos prismáticos con fenocristales de mayor tamaño de olivino y augita, y glomerocristales de plagioclasa. En los diagramas de variación, la roca muestra altos valores de Ni, relacionado con la cristalización del olivino, y de Y que puede estar asociado a la cristalización de titanita, como posible óxido que aparece rellenando la matriz de la roca. Así mismo, los elementos más móviles se encuentran en cantidades bajas en comparación con las rocas más diferenciadas, como era de esperarse. La siguiente roca, que cae en la clasificación de la serie toleítica, es la TNX- 005 descrita como una traquidacita de la serie alcalina, presenta una textura porfídica de matriz microcristalina de plagioclasa y óxidos. Su alto contenido en K puede ser explicado con su mineralogía de anfíboles y feldespatos. Al igual que sus valores intermedios de Y que pueden estar asociados a la cristalización de los anfíboles y la titanita como posible óxido. Del mismo modo, el Sr presenta los valores más altos que el resto de las rocas, por lo que lo podemos atribuir al reemplazamiento de Ca en las plagioclasas.

La roca GTQ1-100 reportada por Ángeles-Moreno E. y Sánchez-Martínez S. (2002) está clasificada como un esquisto milonítico de biotita, el cual presenta valores muy altos de Mg, Ca y Na, para un esquisto, por lo que se decidió graficar y comparar con las rocas estudiadas en esta tesis ya que se encontraba cerca de la región de estudio. En el diagrama TAS se ubicó en el campo de las traquidacitas (roca alcalina al igual que la TNX-005) con contenidos muy altos de potasio y valores relativamente altos de Rb que pueden estar asociados a la cristalización de micas, característicos de este tipo de rocas; al igual que los bajos valores de Sr que pueden estar asociados a ambientes de alta presión donde no hubo mucha cristalización de plagioclasa (ya que no era estable) o a procesos de metasomatismo, y, al caracterizarla en el diagrama AFM aparenta seguir un patrón igualmente toleítico, por lo que para establecer una mejor clasificación recomendaría volver a muestrear esta roca.

Para finalizar esta secuencia, añadiremos a la roca TNX-008 la cual se ubica sobre la carretera a Teziutlán, está clasificada como una toba cristalina a la cual no se le realizó estudios geoquímicos por su contenido de líticos volcánicos, ya que podrían alterar sus resultados. Sin embargo, continuando con la idea de que las rocas encontradas en las cercanías de Teziutlán probablemente estén asociadas a la apertura del Golfo de México la consideraremos en esta categoría. Además, los componentes líticos que presenta, basaltos y andesitas, son rocas que también se describen en esta área y que tras graficar sus componentes caen en el campo de rocas toleíticas, por lo que por asociación puede clasificar en este primer grupo.

Por el contrario, el segundo grupo lo comprenden las rocas más félsicas, encontradas a lo largo de la Cañada del Río Tecolutla, cercanas a Cuetzalan (TNX-011, TNX-012, TNX-013) y en los alrededores de la Presa La Soledad (TNX-015 y GTQ1-83). El diagrama AFM muestra una asociación de rocas calcoalcalinas con variaciones en contenido de potasio de medio a alto, característica del magmatismo de arco asociado a procesos de subducción; a excepción de la roca TNX-011 que presenta un comportamiento toleítico en el diagrama AFM; sin embargo, también es posible encontrar rocas toleíticas en ambientes de arco volcánico.

Todas las rocas de esta zona clasificaron como riolitas en el diagrama TAS, sin embargo, la descripción petrográfica en lámina delgada nos muestra componentes juveniles (pómez), algunos cristales y esquirilas de vidrio en una matriz fluidal silicificada (con contenidos de sílice mayores al 77%) y con signos de devitrificación (esferulitas), a las que se les designó como ignimbritas vitriclásticas y reomórficas, junto con una brecha volcánica con matriz de óxidos y con fragmentos de la misma ignimbrita vitriclástica (TNX-011).

En características geoquímicas de elementos traza, las rocas de este grupo presentan un comportamiento similar, algunas con picos más marcados en algunos elementos que otras, por lo que se podría asumir que tienen el mismo parentesco. En general, las rocas presentan altos valores de Rb y Ba lo que sugiere metasomatismo o contaminación cortical posiblemente producto de la subducción de una placa tectónica la cual libera agua, haciendo que los LILE, móviles en agua, se enriquezcan. El empobrecimiento de los HREE se puede deber a la subducción y asimilación de esta placa, que, al estar en facies de metamorfismo, normalmente de anfibolita, se funde y produce la disminución de estos elementos; lo que también se ve reflejado con el empobrecimiento de Sr en las rocas, por la compatibilidad con la plagioclasa, que genera un magma silícico (fundido) con agua. A excepción de la roca TNX-011 que está enriquecida en Sr, lo que lo podemos atribuir a las alteraciones que presenta. Otro aspecto que se puede explicar con el agua que proviene de la placa subducida, es el incremento de Pb ya que tiene un comportamiento similar a un elemento LILE; sin embargo, la roca TNX-012 y GTQ1-83 comienzan a tener un fraccionamiento negativo.

La roca GTQ1-83 fue clasificada por Ángeles-Moreno E. y Sánchez-Martínez S. (2002) como un esquisto milonítico cuarzo-feldespático. Se graficaron sus datos geoquímicos en esta tesis debido a que presenta un alto contenido de sílice (79%wt.), pero bajo contenido de potasio (1.45%wt.), el cual se esperaría un poco más alto en un esquisto cuarzo-feldespático. En el diagrama TAS clasificó en el área de las riolitas y se observa un comportamiento similar en los diagramas de variación con las rocas de la cañada del Río Tecolutla (cuya ubicación no es tan cercana a la

que indican en su tesis). Debido a estas características, se incluyó en este grupo de rocas calcoalcalinas y se asumió un posible origen magmático común.

Como se mencionó anteriormente, los resultados obtenidos en el diagrama AFM indicaron que si bien, existen rocas con asociación de magmatismo de arco (para las rocas cercanas a Cuetzalan), también existen rocas que por su geoquímica pueden estar asociadas a magmatismo de extensión/rift oceánico, como sería el caso de las rocas cercanas a Teziutlán, tal como lo sugiere Bartolini et al.,(2003) en sus trabajos donde menciona que la extensión del Arco Nazas pudo haberse extendido hacia el este y sur de México (hacia la región del Golfo de México) y que, al mismo tiempo, el rift, relacionado con la extensión, pudo alcanzar zonas más al oeste de México, mencionando como ejemplos a los depósitos intercalados de rocas piroclásticas y estratos de capas rojas en Tamaulipas y San Luis Potosí, y a los depósitos de rocas metavolcánicas expuestas en La Popa, Nuevo León, asociados a magmatismo de rift (*Bartolini et al., 2003*).

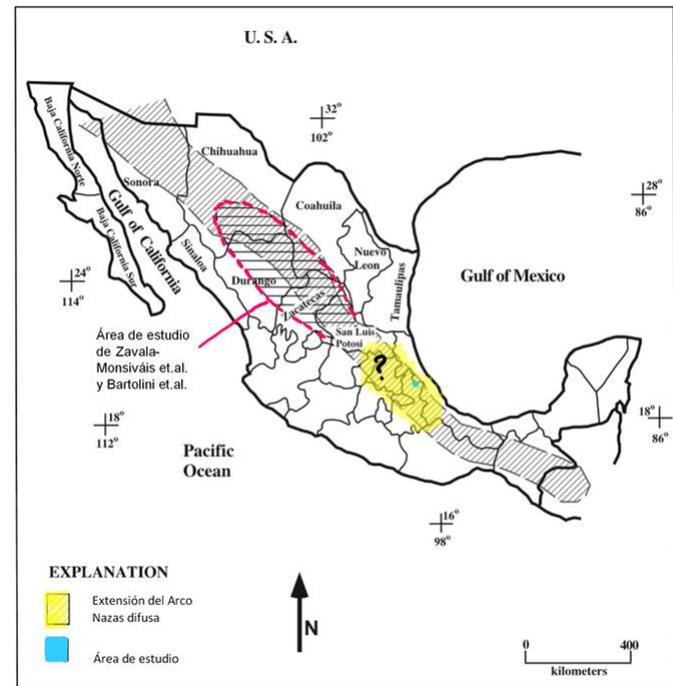


Fig.38. Configuración del Arco Nazas en México. Modificado de Bartolini et al., 2003.

De la misma manera, Bartolini op cit. también establecen, en su descripción del Arco Nazas, asociaciones riolíticas-andesíticas en la región de Zacatecas y San Luis Potosí con magmas calcoalcalinos (*Bartolini et al., 2003*); aunado a esto, las investigaciones recientes de Zavala-Monsiváis et. al. (2012) describen afloramientos de rocas volcánicas de edades Jurásicas Medias en la zona de Charcas, SLP, que asociaron con el magmatismo del Arco Nazas. Esto a su vez concuerda con la posibilidad de prolongar la traza del Arco Nazas desde la región del norte de Zacatecas y Durango

hasta la porción del centro-este de México (noroeste de Puebla) (*Fig.38*).

Los resultados que presentaron Zavala-Monsiváis et.al. (2012) en la sección del Arroyo de San Antonio en Charcas, San Luis Potosí, describen una sucesión de flujos piroclásticos muy alterados y brechas volcánicas de composición intermedia a félsica, muy similares a las encontradas en la Cañada del Río Tecolutla. Dichos autores describieron varios flujos piroclásticos, uno de ellos presenta una roca

devitrificada muy alterada de color amarillo a crema, con esferulitas de hasta 2 cm de diámetro. La matriz del flujo está compuesta de cenizas con sericitización, óxidos y un bandeamiento incipiente de flujo, así como fragmentos de pómez, mostrando estructuras tipo *fiame*; sin embargo, Zavala-Monsiváis et al. (2012) describen a las brechas volcánicas con fragmentos subangulosos de rocas volcánicas intermedias a félsicas; mientras que, en este trabajo, sólo se reconocieron fragmentos angulosos de ignimbrita vitriclástica.

En relación con la geoquímica, describen a las rocas con un intervalo amplio de composición %SiO<sub>2</sub> = 47.8 - 80.8 %, ubicando a la mayoría de las rocas en el campo de las riodacitas y se caracterizan, además, por mostrar diversos grados de alteración, que se reflejan en valores de pérdida por ignición de 2 % a 10 %, valores un poco más altos a los estudiados en esta tesis y presentados en la *Tabla 14*. Estas razones me permitieron considerar a las rocas descritas en la Cañada del Río Tecolutla como una extensión al noroeste-sureste del país del Arco Nazas.

No obstante, las relaciones estratigráficas (*Fig.39*), durante el Triásico-Jurásico, en la cañada del Río Tecolutla son un poco difusas, por lo que falta información para poder establecer correlaciones con alguna sucesión de rocas que ya se hayan confirmado como parte del magmatismo del Arco Nazas, por consiguiente, hace falta hacer más investigaciones en las zonas aledañas que nos permitan identificar la extensión de este depósito de flujos piroclásticos, su espesor total, así como realizar fechamientos de la unidad que permitan contar con elementos objetivos de su ubicación temporal, además de observar alguna discordancia o depósitos de rocas que nos ayuden a confirmar su vínculo con el Arco Nazas, ya que la única correlación que se aprecia en el área es con el depósito de rocas calcáreas, suprayaciendo estos flujos, y que han sido caracterizadas como parte de la Formación Tamán (*Ochoa-Camarillo, et.al., 1998*).

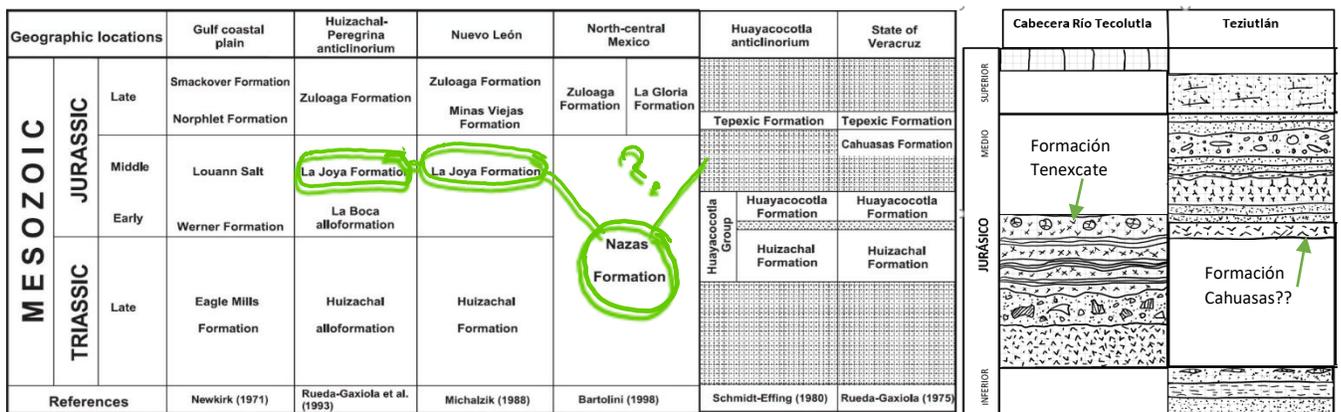


Fig.39. Correlación Triásica-Jurásica de las rocas relacionadas con el magmatismo del Arco Nazas en la región centro-norte y noreste de México. Modificado de Bartolini et.al., 2003.

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el estudio realizado se identificaron rocas básicas (basalto de olivino) hasta félsicas (ignimbritas), por lo que el contenido de sílice varía de 47 a 79%wt.

Después de haber analizado los datos geoquímicos, las muestras de rocas se agruparon en dos conjuntos:

1) Las rocas que se encuentran en el área cercana a Teziutlán. Los resultados muestran afinidad con la serie alcalina y un comportamiento toleítico: basalto de olivino (OTNX-04), andesita -traquidacita- (TNX-005). La roca TNX-008 -toba cristalina- presenta fragmentos subangulosos de líticos como basalto y andesita, por lo que posiblemente forma parte de este grupo. Las características geoquímicas de estas rocas indican una posible asociación a un proceso de rift vinculado a la expansión durante la apertura del Golfo de México.

2) Las rocas próximas al poblado de Cuetzalan. Se clasificaron como riolitas en el diagrama TAS (TNX-012, TNX-013, TNX-015 y la GTQ1-83); sin embargo, las descripciones de lámina delgada me permitieron identificarlas como ignimbritas reomórficas y vitriclásticas. En el diagrama AFM las rocas se encuentran en el campo calcoalcalino, de medio a alto potasio, con valores altos de elementos LILE, por lo que muestran afinidad a un ambiente de subducción.

La similitud litológica y geoquímica del conjunto anterior, así como sus relaciones estratigráficas permiten correlacionarlo con rocas descritas en localidades como el Arroyo de San Antonio en Charcas, San Luis Potosí, de edad Jurásico Medio, así como inferir la posibilidad de que estas rocas calcoalcalinas estén asociadas al Arco Nazas.

Los resultados obtenidos apoyan la posibilidad de tener en la región la sobreposición de rocas asociadas a la extensión y al magmatismo de arco tal como lo han sugerido otros autores, así como la posible extensión del Arco Nazas hacia la zona central-oriental del país. Por lo mismo, es necesario realizar fechamientos isotópicos de la Formación Tenexcate en la zona estudiada, para constreñir su edad.

Del mismo modo, se sugiere realizar estudios petrográficos y geoquímicos detallados de las rocas ígneas de la porción sur de la Presa de la Soledad y áreas aledañas a la Cañada del Río Tecolutla para poder determinar de mejor manera el origen y relación estratigráfica de las rocas.

La muestra GTQ1-100, reportada por Moreno y Sánchez (2002), se clasifica como un esquisto milonítico y la GTQ1-83 como un esquisto cuarzo feldespático, en esta última los análisis geoquímicos la ubican como una riolita. En ambos casos se

sugiere la revisión de la descripción del afloramiento y los estudios petrográficos para verificar su clasificación.

## 7. REFERENCIAS

- Aguilar-Hernández, A. y Sarmiento-Altamirano, S. (1998). “Análisis estratigráfico y estructural de la hoja Cuetzalan, entre los estados de Puebla y Veracruz” Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Ángeles-Moreno E. y Sánchez-Martínez S. (2002). “Geología Geoquímica y geología estructural de las Rocas del Basamentos del macizo de Teziutlán, Puebla”. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Barboza-Gudiño, J.R., Ocampo-Díaz, Y.Z.E., Zavala-Monsiváis, A. y López-Doncel, R.A. (2014). “Procedencia como herramienta para la subdivisión estratigráfica del Mesozoico temprano en el noreste de México”, *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, Vol. 31, No. 3, p. 303-324.
- Bartolini, C., Lang, H. y Spell, T. (2003). “Geochronology, geochemistry, and tectonic setting of the Mesozoic Nazas arc in north-central Mexico, and its continuation to northern South America”, *in* C. Bartolini, C., Buffler, R. T., and Blickwede, J., eds., “The Circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon habitats, basin formation, and plate tectonics”: AAPG Memoir 79, p. 427–461.
- Carrillo-Bravo, J. (1965). “Estudio geológico de una parte del Anticlinorio de Huayacocotla”, *Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros*, Vol. 17, No. 5-6, p. 73-96.
- Carrillo-Bravo, J. (1971).” *Paleogeografía y Estratigrafía de Puebla*”. Trabajo de recopilación de PEMEX.
- Castro-Dorado, A. (2015). “Petrografía de rocas ígneas y metamórficas”, España, Ediciones Paraninfo.
- Esquivel-Macías, C., Arenas-Islas, D., Flores-Castro, K. y Mendoza, G. (2014). “Caracterización de tafofacies en la Formación Huayacocotla, Jurásico inferior (Sinemuriano Superior), centro oriente de México” *Revista Brasileira Paleontología*, Vol. 17, No. 2, p. 249–272.
- Fitz-Diaz, E., Lawton, L.F., Juárez-Arriaga, E. y Chávez-Cabello, G. (2018). “The Cretaceous-Paleogene Mexican orogen: Structure, basin development, magmatism and tectonics”. Elsevier, *Earth Sciences Reviews*, No.183, p. 56-84.

- Gill, R. (2010). "Igneous rocks and processes: a practical guide", UK, Wiley-Blackwell, p. 472.
- Gutiérrez-Trejo, L.J. (2019). "Análisis microtectónico de las rocas del Complejo Metamórfico de Teziutlán, Estado de Puebla: Deformación milonítica en el Paleozoico Tardío" Tesis de Maestría en Ciencias de la Tierra, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Hernández-De la Fuente, R.A. (1996). "Sedimentología y Diagénesis del Kimmerdigiano en la Región de Jonotla, Puebla y Tlacolula, Veracruz" Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Hernández-Madrigal, V.M. Garduño-Monroy, V.H. y Alcántara-Ayala, I. (2007). "Estudio geológico para entender los procesos de remoción en masa en la región de Zacapoaxtla, Puebla, México", Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Vol. 59, No. 2, p.147-162.
- Imlay, R.W., Cepeda, E., Álvarez, M. Jr. y Díaz-González T. (1948). "Stratigraphic relations of certain Jurassic formations in eastern Mexico", American Association of Petroleum Geologist Bulletin, Vol. 32, No. 9, p.1750-1761.
- Lawton, T.F. y Molina-Garza, R.S. (2014). "U-Pb geochronology of the type Nazas Formation and superjacent strata, northeastern Durango, Mexico: Implications of a Jurassic age for continental-arc magmatism in north-central Mexico". Geological Society of America Bulletin 126, No. 9-10, p.1181-1199.
- López-Infanzón M. (1986). "Estudio petrogénico de las rocas ígneas en las Formaciones Huizachal y Nazas", Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Vol.47, No.2, p. 1-37.
- López-Palomino, I., Villaseñor, A.B., Olóriz-Sáez, F. (2005). "Primer registro del género Vinalesphinctes (Ammonitina) en el Oxfordiano de México: Significación bioestratigráfica y consideraciones paleobiogeográficas en el Jurásico Superior de América", Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, Vol. 23, No.2, p.162-183.
- Lozano-Santa Cruz, R., Verma, S.P., Girón, P., Velasco-Tapia, F., Morán-Zenteno, D., Viera, F., Chávez, G. (1995). "Calibración preliminar de fluorescencia de rayos X para análisis cuantitativo de elementos mayores en rocas ígneas", Actas INAGEQ, Vol.1, p.203-208.
- Manjarrez-Hernández, P.P., Hernández-De la Fuente, R.A. (1989) "Informe Geológico Final del Prospecto Cardel, IGPR-278: Coordinación Regional de Exploración, Superintendencia de Operación Geológica, Zona centro, Reporte inédito, p.132" in *Léxico Estratigráfico de México*, Servicio Geológico Mexicano, "Formación Tenexcate" (2014).

- Martini, M. y Ortega-Gutiérrez, F. (2018). "Tectonostratigraphic evolution of eastern Mexico during break-up of Pangea: A review" Elsevier, Earth Sciences Review, No.183, p.38-55.
- Nieto-Bender, E. (2013). "Aportaciones paleontológicas para precisar la edad de la Formación Pimienta, en el área de Cuetzalan, Estado de Puebla". Tesis de Maestría en Ciencias (Geología), Universidad Nacional Autónoma de México.
- Ochoa-Camarillo, H. (1996). "Geología del Anticlinorio de Huayacocotla en la región de Molando, estado de Hidalgo" Tesis de Maestría, Facultad de Ciencias, UNAM.
- Ochoa-Camarillo, H., Buitrón, B. y Silva-Pineda A. (1998). "Contribución al conocimiento de la bioestratigrafía, paleoecología y tectónica del Jurásico (Anticlinorio de Huayacocotla), en la región de Molango, Hidalgo, México". Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, Vol. 15, No. 1, p. 57-63.
- Ochoa-Camarillo, H.R., Buitrón, B.E., Silva-Pineda, A. (1999). "Redbeds of the Huayacocotla anticlinorium, state of Hidalgo, east-central Mexico", in Bartolini, C., Wilson, J.L., Lawton, T.F., "Mesozoic sedimentary and tectonic history of North-Central Mexico: Boulder, Colorado", Geological Society of America, Special Paper 340, p.59-68.
- Padilla y Sánchez, R.J. (1982). "Geologic evolution of the Sierra Madre Oriental between Linares, Concepcion del Oro, Saltillo, and Monterrey, Mexico" Tesis de Doctorado, Universidad de Texas en Austin.
- Padilla y Sánchez, R.J. (2007). "Evolución geológica del sureste mexicano desde el Mesozoico al presente en el contexto regional del Golfo de México" Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Tomo LIX, No.1, p.19-42.
- Pantoja-Alor, J. (1972). "La Formación Nazas del Levantamiento de Villa Juárez, Estado de Durango: (memoria) in Segunda Convención Nacional de la Sociedad Geológica Mexicana, Mazatlán, Sinaloa, México", Sociedad Geológica Mexicana, p. 25-31.
- Pindell, J., Miranda, C.E., Cerón, A., y Hernández, L. (2016). "Aeromagnetic Map constrains Jurassic-Early Cretaceous Synrift, Break Up, and Rotational Seafloor Spreading History in the Gulf of Mexico Mesozoic of the Gulf Rim and Beyond: New progress in science and exploration of the Gulf of Mexico Basin", p.123-154.
- Rubio-Cisneros, I. I., Ramírez-Fernández J.A. y García Obregón, R. (2011). "Análisis preliminar de procedencia de rocas clásticas Jurásicas del Valle de Huizachal, Sierra Madre Oriental: Influencia del vulcanismo sinsedimentario y el basamento cristalino", Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Vol. 63, No. 2, p.137-156.

- Silva-Romo, Mendoza-Rosales y Morales-Barrera (2014). Cao. 1 “Geología del estado de Puebla” *in* Castañeda-Posadas, C., (coord.), “El registro paleobiológico del estado de Puebla” (p. 29-33). México, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
- Zavala-Monsiváis, A., Barboza-Gudiño, J. R., Velasco-Tapia, F. y García-Arreola, M. E. (2012). “Sucesión volcánica Jurásica en el área de Charcas, San Luis Potosí: Contribución al entendimiento del Arco Nazas en el noreste de México “. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, Vol. 64, No.3, p.277-293.