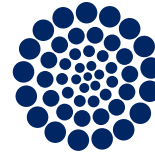




UNIVERSIDAD DE SONORA
"El Saber de mis Hijos hará mi Grandeza"



CONACYT
Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología

UNIVERSIDAD DE SONORA
DIVISIÓN DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

Tesis

Caracterización y puesta en evidencia de riolitas hiperalcalinas del Eoceno tardío – Oligoceno en Chihuahua, México: Significado geodinámico.

Para obtener el grado de

GEOLÓGO

Por:

TANIA ABIGAIL ARREDONDO CONTRERAS

Hermosillo, Sonora, a 27 de enero del 2023

Tesis financiada por el Proyecto CONACYT (320694) "EL RIFT DEL RÍO GRANDE EN MÉXICO POSIBLE FUENTE DE REE (?), a cargo del Dr. Jesús Roberto Vidal Solano.

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



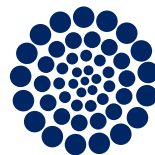
**"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como Open Access



UNIVERSIDAD DE SONORA
"El Saber de mis Hijos hará mi Grandeza"



CONACYT
Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología

UNIVERSIDAD DE SONORA
DIVISIÓN DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

Tesis

Caracterización y puesta en evidencia de riolitas hiperalcalinas del Eoceno tardío – Oligoceno en Chihuahua, México: Significado geodinámico.

Para obtener el grado de

GEOLÓGO

Por: Tania Abigail Arredondo Contreras

Tutor: Jesús Roberto Vidal Solano

SINODALES

PRESIDENTE Dr. Francisco Abraham Paz Moreno

SECRETARIO Dr. Luis Alonso Velderrain Rojas

VOCAL Dr. Jesús Roberto Vidal Solano

VOCAL INVITADO EXTERNO Geol. Luis Arturo Terán Ortega

Hermosillo, Sonora, a 27 de enero del 2023

Tesis financiada por el Proyecto CONACYT (320694) "EL RIFT DEL RÍO GRANDE EN MÉXICO POSIBLE FUENTE DE REE (?), a cargo del Dr. Jesús Roberto Vidal Solano.



EL SABER DE MIS HIJOS
HARÁ MI GRANDEZA

Hermosillo, Sonora, 6 de diciembre de 2022

DR. FRANCISCO GRIJALVA NORIEGA
JEFE DEL DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA
UNIVERSIDAD DE SONORA
P r e s e n t e.-a

Por este conducto y de la manera más atenta, me permito someter a su consideración, para su aprobación el siguiente tema de Tesis, intitulado:

“Caracterización y puesta en evidencia de riolitas hiperalcalinas del Eoceno Tardío – Oligoceno en Chihuahua, México: Significado geodinámico.”

Esto es con el fin de que la alumna **TANIA ABIGAIL ARREDONDO CONTRERAS** con Expediente No. **217210157**, pueda presentar su examen profesional para la obtención de su título de Licenciatura en Geología.

Sin otro en particular y agradeciendo de antemano su atención al presente, quedo de Usted.

A T E N T A M E N T E

Dr. Jesús Roberto VIDAL SOLANO
DIRECTOR DE TESIS
Departamento de Geología
Universidad de Sonora

C.c.p. Interesado.
C.c.p. Archivo



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

UNIVERSIDAD DE SONORA

Departamento de Geología
División de Ciencias Exactas y Naturales

Hermosillo, Sonora, México a 7 de diciembre de 2022

DR. JESÚS ROBERTO VIDAL SOLANO
DIRECTOR DE TESIS
P R E S E N T E.-

Por este conducto le comunico que ha sido aprobado el tema de Tesis propuesto por usted intitulado:

"CARACTERIZACIÓN Y PUESTA EN EVIDENCIA DE RIOLITAS HIPERALCALINAS DEL EOCENO TARDÍO – OLIGOCENO EN CHIHUAHUA, MÉXICO: SIGNIFICADO GEODINÁMICO"

Lo anterior con el fin de que la alumna **Tania Abigail Arredondo Contreras**, con No. de Expediente 217210157, pueda presentar su examen profesional para la obtención de su título de Licenciatura en Geología. Así mismo le comunico que han sido asignados los siguientes sinodales:

Presidente	Dr. Francisco Abraham Paz Moreno
Secretario	Dr. Luis Alonso Velderrain Rojas
Vocal	Dr. Jesús Roberto Vidal Solano
Vocal Invitado Externo	Geol. Luis Arturo Terán Ortega

Sin otro particular y agradeciendo de antemano su atención a la presente, quedo de ustedes

A T E N T A M E N T E
"EL SABER DE MIS HIJOS HARÁ MI GRANDEZA"

DR. FRANCISCO JAVIER GRIJALVA NORIEGA
JEFE DEL DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA



El saber de mis hijos
hará mi Grandeza
DEPARTAMENTO
DE GEOLOGÍA

c.c.p. archivo



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

UNIVERSIDAD DE SONORA

Departamento de Geología
División de Ciencias Exactas y Naturales

NOMBRE DE LA TESIS

**"CARACTERIZACIÓN Y PUESTA EN EVIDENCIA DE RIOLITAS
HIPERALCALINAS DEL EOCENO TARDÍO – OLIGOCENO EN CHIHUAHUA,
MÉXICO: SIGNIFICADO GEODINÁMICO"**

NOMBRE DE LA SUSTENTANTE

TANIA ABIGAIL ARREDONDO CONTRERAS

El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis profesional y que la encuentra en forma y contenido adecuado, como requerimiento parcial para obtener el Título de licenciatura en la Universidad de Sonora.

DR. FRANCISCO ABRAHAM PAZ MORENO

El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis profesional y que la encuentra en forma y contenido adecuado, como requerimiento parcial para obtener el Título de licenciatura en la Universidad de Sonora.

DR. LUIS ALONSO VELDERRAIN ROJAS

El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis profesional y que la encuentra en forma y contenido adecuado, como requerimiento parcial para obtener el Título de licenciatura en la Universidad de Sonora.

DR. JESÚS ROBERTO VIDAL SOLANO

El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis profesional y que la encuentra en forma y contenido adecuado, como requerimiento parcial para obtener el Título de licenciatura en la Universidad de Sonora.

GEOL. LUIS ARTURO TERÁN ORTEGA

**A T E N T A M E N T E
"EL SABER DE MIS HIJOS HARÁ MI GRANDEZA"**

**DR. FRANCISCO JAVIER GRIJALVA NORIEGA
JEFE DEL DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA**



El saber de mis hijos
hará mi Grandeza
DEPARTAMENTO
DE GEOLOGÍA

c.c.p. archivo

*Este trabajo está dedicado
a mis hermosos y extraordinarios padres, Rosario y Merardo.
Porque me han formado de una manera en que estoy inmensamente agradecida.
A mis queridos y atolondrados hermanos, Marittza y Michel.
Porque me han enseñado a soportar las adversidades de la vida.*

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad de Sonora por mi instrucción profesional, a los docentes que han influido con la formación de mi conocimiento desde el primer día, hasta el presente, de corazón, gracias.

Agradezco al CONACYT por el apoyo económico brindado durante el transcurso del desarrollo de esta tesis, que surgió a partir del proyecto “***El Rift del Río Grande en México, posible fuente de REE(?)***”, a cargo del Dr. Jesús Roberto Vidal Solano.

Agradezco a mis compañeras y amigas, Casandra Moreno y Perla Robles, quienes trabajaron arduamente a mi lado en el proyecto, y me dieron, sin saberlo, ánimos y alegría en la fase inicial de la tesis.

Al Profesor Vidal, a quién agradezco particularmente de manera exorbitante por ser mi mentor en la elaboración de mi tesis, y un guía fundamental en mi pasión personal por la ciencia, desde la primera asignatura que me impartió en la Licenciatura en el 2019, hasta la última (2022). Agradezco a mis sinodales por su colaboración y correcciones.

Agradezco a todas las instituciones científicas e investigadores que permitieron el desarrollo de esta temática, a través de los datos de acceso abierto disponibles para la contribución científica, particularmente al *Servicio Geológico Mexicano* por la colaboración durante el transcurso de esta tesis.

Por último, agradezco sinceramente a todos los compañeros que he tenido durante la Licenciatura, en el salón y en el campo; porque me han apoyado brindándome su conocimiento, sus risas, y palabras de aliento, pero, sobre todo, momentos muy dichosos. He sido particularmente feliz. Gracias a mis preciadas amigas de universidad: Michel, Paola, Perla y Casandra.

RESUMEN

El presente trabajo se centra en la porción centro-norte del Estado de Chihuahua, México, y su posible relación con la zona extensional del Rift del Río Grande (RRG), que se localiza al sur de Estados Unidos de América y se extiende desde Colorado, Nuevo México y Texas, donde se fusiona con la provincia extensional del *Basin and Range* (B&R). Para ello se utilizaron datos de acceso abierto de diversas fuentes disponibles, y se recopilaron en una base de datos con más de 400 muestras de rocas volcánicas félsicas del Eoceno tardío-Oligoceno.

En diversos estudios se ha discutido la posibilidad de la prolongación del RRG hacia el norte de México, esta tesis contribuye al conocimiento actual de su continuidad en Chihuahua a través de la correlación espacial, temporal y geoquímica del magmatismo anorogénico de tipo hiperalcalino.

Los datos permiten identificar el establecimiento de **tres zonas** con presencia de riolitas hiperalcalinas en el Estado: **Zona Norte**, que se localiza al norte del municipio de Buenaventura, cerca de la localidad de San Luis, **Zona Centro** circundante a la localidad de Estación Ojo Laguna, y la **Zona Este**, entre las localidades de Ciudad Delicias y Álamos de San Antonio.

Las edades de las rocas estudiadas y su ubicación en la región permiten reconocer una migración del magmatismo de Este a Oeste durante el Eoceno tardío-Oligoceno (38-26Ma). Esta migración, propuesta en trabajos previos realizados en la frontera de Texas y Chihuahua, es acompañada por la ocurrencia de magmas anorogénicos menos hiperalcalinos, en comparación con las rocas hiperalcalinas del RRG, lo que pudiera estar relacionado con una distribución de la corteza, que es más gruesa y antigua en el Este, en referencia a una más joven y delgada en el Oeste.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN

I. INTRODUCCIÓN.	1
1.1 Justificación del estudio.	4
1.2 Objetivo.	4
1.3 Localización del área de estudio.	4
1.4 Antecedentes.	5
II. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL.	7
2.1 Geología del estado de Chihuahua.	7
2.1.1 Sierras y Llanuras del Norte.....	8
2.1.2 Sierra Madre Occidental.	8
2.2 Zonas extensionales del estado de Chihuahua.	9
2.2.1 Rift Del Río Grande (RRG).	9
2.2.2 Basin and Range (B&R).	11
III. METODOLOGÍA.	12
3.1 Recopilación de datos de fuentes de acceso abierto.	13
3.1.1 Servicio Geológico Mexicano (SGM).	13
3.1.2 Geochemistry of Rocks of the Oceans and Continents (GEOROC).	13
3.1.3 The Western North American Volcanic and Intrusive Rock Database (NAVDAT).	14
3.1.4 Catalog of the Greater American Southwest archaeological obsidian sources.	15
3.2 Procesamiento de los datos.	17
3.2.1 Nomenclatura formal.	17
3.2.2 Clasificación de rocas hiperalcalinas.	18
IV. RESULTADOS.	19
4.1 Magmatismo félsico hiperalcalino del Eoceno tardío-Oligoceno en el estado de Chihuahua.	19
4.1.1 Nomenclatura formal.....	19
4.1.2 Clasificación de rocas hiperalcalinas.	22
4.2 Distribución espacial y contexto geológico de las rocas volcánicas hiperalcalinas del estado de Chihuahua.	27

4.3 Mapa de distribución geográfica de las rocas hiperalcalinas identificadas en el estado de Chihuahua y en RRG.	33
V. DISCUSIÓN.....	34
VI. CONCLUSIONES.....	50
VII. BIBLIOGRAFÍA.	52

I. INTRODUCCIÓN.

La ocurrencia en el planeta del magmatismo félsico de afinidad hiperalcalina es comúnmente asociada a los contextos tectónicos anorogénicos. Este magmatismo es particularmente registrado en la sucesión de rocas volcánicas del Rift Del Río Grande (RRG) en Los Estados Unidos de América, y puede utilizarse como un excelente trazador para identificar su distribución en el estado de Chihuahua (Parker y Henderson, 2021), algo que los rasgos superficiales de la geomorfología no muestran, puesto que la traza de las estructuras superficiales del RRG desaparece en el norte de México.

Fisiográficamente, el Rift del Río Grande (RRG) se extiende por más de 1000 km desde Leadville, Colorado, hasta Presidio, Texas, y Chihuahua, México (Gibson *et al.*, 1992; Figura 1.1). Los sedimentos asociados al RRG están evidenciados al suroeste de los Estados Unidos de América (Villarreal-Fuentes *et al.*, 2016), así como volcanes recientemente activos (Plio-Cuaternarios), cuencas excepcionalmente profundas y fallas de finales del Cuaternario (Seager, y Morgan, 1979), que son rasgos superficiales utilizados para trazar a la provincia tectónica hasta el extremo oeste de Texas y el Norte de Chihuahua (Seager, y Morgan, 1979). El RRG se delimita en la frontera entre EE.UU y México (Barker, 1977; Seager y Morgan, 1979; Gibson *et al.*, 1992), lo que se atribuye posiblemente a la convergencia temporal y espacial de las provincias geológicas de la Sierra Madre Occidental (SMO), el *Basin and Range* (B&R) y el Rift del Río Grande (RRG) en la porción centro-norte del estado de Chihuahua, durante el Cenozoico medio (Figura 1.1).

La identidad de las principales estructuras del RRG se pierde en la provincia del *Basin and Range*. Sin embargo, la existencia de rocas volcánicas anorogénicas

como las de tipo hiperalcalino ha sido documentada en la provincia magmática del Trans-Pecos dentro del RRG (Figura 1.1; Barker, 1977), la cual inclusive ha sido considerada como un análogo del Rift del Este Africano en Kenia (Barker, 1977).

De lo anterior mencionado, solo algunos estudios geofísicos, geológicos y geocronológicos en el centro de Chihuahua relacionan el contexto tectónico al RRG (e.g. Villarreal-Fuentes *et al.*, 2016). Sin embargo, es evidente que la manifestación magmática más reciente se asocia al vulcanismo Plio-Cuaternario intra-placa del Campo Volcánico de Camargo (Figura 1.1) en la frontera sur del estado de Chihuahua, y al NW en el Campo Volcánico de Palomas (Figura 1.1), ubicado en la frontera con Estados Unidos de América, a 70 km de Ciudad Juárez (Aranda-Gómez *et al.*, 2005).

La presencia de este magmatismo hiperalcalino en el centro norte de Chihuahua, correlacionado en edad, en rasgos geoquímicos y distribución geográfica en este estudio, establece las bases para contribuir al conocimiento de la posible continuidad del Rift del Río Grande en el centro-norte del estado de Chihuahua.

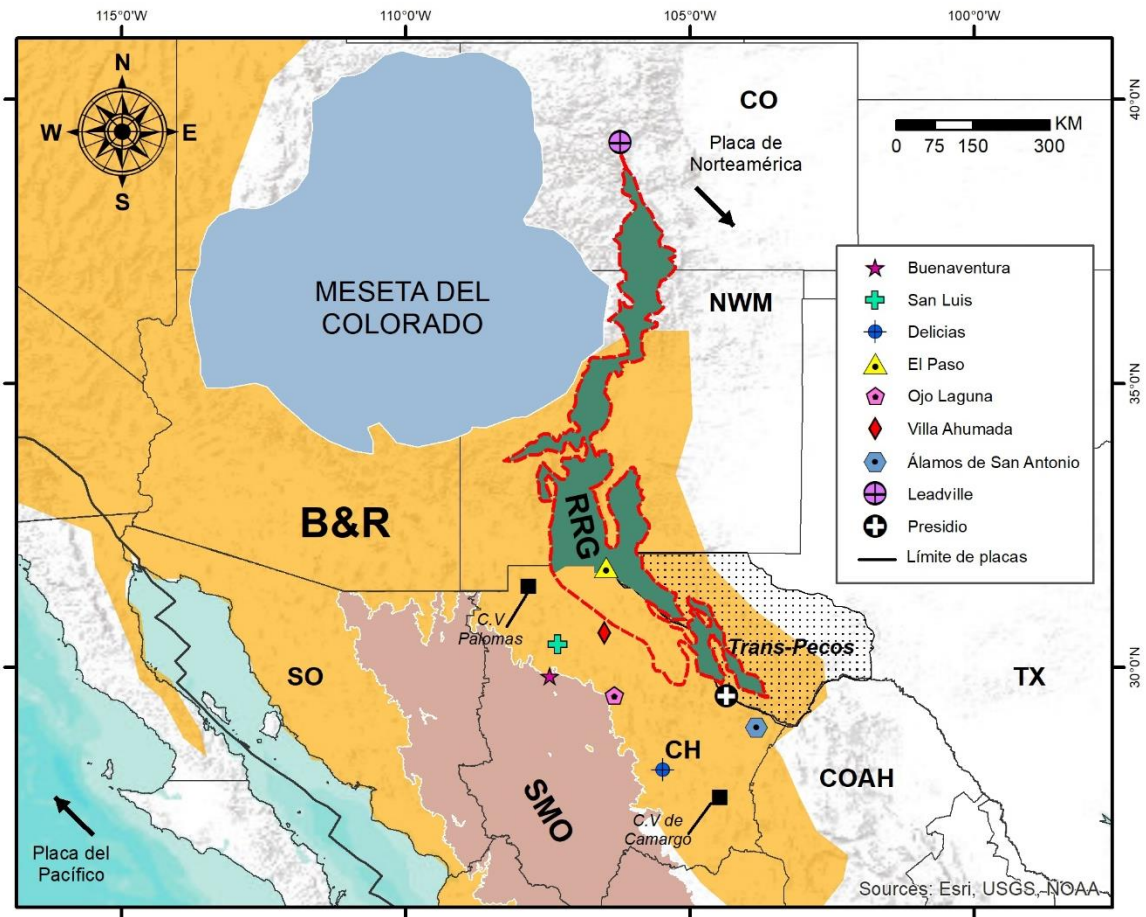


Figura 1.1. Mapa general del norte de México y el suroeste de EE.UU, muestra la convergencia espacial de las provincias extensionales del *Basin and Range* (B&R) y el Rift del Río Grande (RRG), así como de la Sierra Madre Occidental (SMO) en el Estado de Chihuahua. Imagen modificada de Villarreal-Fuentes *et al.* (2016). El RRG se representa en color verde en los Estados Unidos de América, la línea discontinua de color rojo significa la presencia de rocas asociadas al RRG propuesta en la imagen de Villarreal-Fuentes *et al.* (2016). Límite de la provincia fisiográfica de la SMO obtenido de INEGI (2001). Límite del Trans-Pecos obtenido de Cook T. (2015). Límite de placas tectónicas Pacífico y Norteamericana obtenido de Geo Gps Perú (2022). Abreviaturas; **CO:** Colorado, **NWM:** Nuevo México, **TX:** Texas, **CH:** Chihuahua, **COAH:** Coahuila, **SO:** Sonora **SMO:** Sierra Madre Occidental, **RRG:** Rift del Río Grande, **B&R:** Basin and Range, **C.V de Camargo:** Campo Volcánico de Camargo, **C.V Las Palomas:** Campo Volcánico Las Palomas.

1.1 Justificación del estudio.

El presente documento forma parte de un proyecto de investigación de Ciencia Básica y/o Ciencia de Frontera bajo la modalidad: Paradigmas y Controversias de la Ciencia 2022, titulado “***El Rift del Río Grande en México, posible fuente de REE(?)***”, el cual está a cargo del Dr. Jesús Roberto Vidal Solano. Este proyecto trata de evidenciar la continuidad de la Provincia Magmática del Rift del Río Grande en el estado de Chihuahua a través del registro del magmatismo félsico de tipo anorogénico (hiperalcalino).

Este trabajo de tesis busca establecer zonas con presencia de magmatismo félsico a partir de datos de acceso abierto de rocas volcánicas félsicas del Eoceno tardío-Oligoceno y correlacionarlas en edad, en rasgos geoquímicos y distribución geográfica con las rocas hiperalcalinas asociadas al RRG. La continuidad del RRG en México ha sido reportada en diversas investigaciones desde los años 70 de forma ambigua, en zonas como la cuenca de Los muertos en el centro-norte de Chihuahua, el Valle de San Bernardino, y el Valle de las Animas al sur de Nuevo México y su extensión hacia Chihuahua (Barker, 1977; Sager y Morgan, 1979), pero no particularmente de forma concreta.

1.2 Objetivo.

El objetivo general de esta tesis es evidenciar zonas con la presencia de rocas Riolíticas hiperalcalinas de edad Eoceno tardío-Oligoceno en el estado de Chihuahua, y exponer su significado geodinámico, contribuyendo con el conocimiento geológico científico actual del estado de Chihuahua.

1.3 Localización del área de estudio.

La región de estudio de esta investigación se ubica al norte de México, en el estado de Chihuahua, entre los estados de Sonora y Coahuila, al Oeste y Este, respectivamente (Figura 1.2). Chihuahua es el estado más grande de la república mexicana, y se localiza entre los 31° 54' - 25° 29' latitud N y 103° 16' - 109° 17'

longitud O. El estado de Chihuahua se localiza en la zona centro-norte de México, rodeado por cadenas montañosas, como la Sierra Madre Occidental, lo que provoca que las lluvias sean escasas, y el clima mayormente seco ([Gobierno de México, 2020](#)). Por otro lado, en los Estados Unidos de América, también se contempla una zona de estudio que comprende a la provincia extensional del Rift del Río Grande, que se extiende desde Colorado, Nuevo México y el oeste de Texas ([Figura 1.2](#)). De manera general, se encuentra dentro de la Provincia extensional del Basin and Range, que cubre gran parte del oeste de los Estados Unidos de América y del noroeste de México.

1.4 Antecedentes.

La geología Neógena del noroeste de Chihuahua ha sido razón de diversas controversias por causa del contexto tectónico en el que se desarrolla, puesto que interviene en dos zonas extensionales ampliamente reconocidas, como son el Rift del Río Grande y el Basin and Range ([Seager y Morgan, 1979](#); [Villarreal-Fuentes et al., 2016](#)). En el sur de Nuevo México y el norte de Chihuahua, el Rift del Río Grande y la provincia del *Basin and Range* se superponen y no se distinguen fisiográficamente, además de que comparten un estilo común de deformación y son relativamente continuas en el tiempo, llegando a ser contemporáneas ([Villarreal-Fuentes et al., 2016](#)).

El magmatismo félsico de tipo hiperalcalino puede ser asociado a los procesos tectónicos donde la corteza es adelgazada, comúnmente por un rifting. Este proceso a veces es resultado de un ascenso astenosférico o de plumas del manto en entornos intra-continetales ([Çubukçu et al., 2012](#), [Purdy et al., 2021](#)). Este magmatismo hiperalcalino ya ha sido reportado al menos en la provincia magmática del Trans-Pecos, ([Barker, 1977](#); [Parker y Henderson, 2021](#)), y relacionado al Rift del Río Grande, que se extiende desde Colorado, hacia el extremo oeste de Texas y el norte de Chihuahua ([Seager y Morgan, 1979](#)).

El magmatismo hiperalcalino se caracteriza por presentar un exceso molecular de álcalis sobre la alúmina ($Na + K > Al$; Índice de Hiperalcalinidad >1) y desarrolla fases minerales asociadas a magmas hiperalcalinos (e.g. aenigmatita,

II. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL.

2.1 Geología del estado de Chihuahua.

De forma resumida, en el estado de Chihuahua se localizan dos grandes provincias geológicas ([Gobierno del Estado de Chihuahua, 2013](#)), las cuales coinciden con las provincias fisiográficas de a) Sierras y Llanuras del Norte y, b) Sierra Madre Occidental ([Figura 2.1](#)).

El suroeste de Chihuahua está representado por una cubierta de ignimbritas del Terciario, en su mayoría del Oligoceno, intercalada con rocas de composición Basalto-Andesita con orientación NW-SE; y el noreste, por sierras con rocas Terciarias de riolitas y Tobas Riolíticas, así como sierras con rocas sedimentarias del Cretácico, y valles de sedimentos del Cuaternario, todos estos con orientación NW-SE (SGM, carta geológico-minera 1:500 000, [2004](#)).

Rzedowski ([2006](#)) , ubica tres principales tipos de roca en el estado de Chihuahua, estos son: 1) Rocas sedimentarias marinas del Cenozoico y del Mesozoico (principalmente calizas, lutitas y margas) en la zona centro-oriental y noreste del estado, coincidiendo con los municipios de Aldama, Ojinaga, Manuel Benavides y Ahumada, 2) Rocas volcánicas del Cenozoico y Pleistoceno (principalmente andesitas, basaltos, riolitas y tobas) las cuales coinciden con la Sierra Madre Occidental, y en una pequeña porción, en la zona colindante entre los municipios de Manuel Benavides, Camargo y Ojinaga; también se incluyen, 3) Aluviones del Pleistoceno y del Plioceno, los cuales se distribuyen en la zona central del estado (como se citó en [Gobierno del Estado de Chihuahua, 2013](#)).

2.1.1 Sierras y Llanuras del Norte.

La provincia de Sierra y Llanuras del Norte abarca más de la mitad de la superficie estatal (**Figura 2.1**) y se extiende desde el suroeste de los Estados Unidos de América hasta cerca de Nazas de Durango, abarcando la región árida del estado. Se compone de sierras abruptas que se elevan hasta los 3000m respecto al nivel del mar y de llanuras con 800m a 1000m de elevación ([Gobierno del Estado de Chihuahua, 2013](#)). En la provincia fisiográfica Sierras y Llanuras del Norte (Cuencas y Sierras: *Basin and Range*), dominan los depósitos recientes del Cuaternario, seguidos por las rocas sedimentarias tanto del Cretácico como del Terciario y las ígneas extrusivas básicas del Cuaternario. En esta provincia, también se encuentran afloramientos de rocas metamórficas del Precámbrico y sedimentarias del Paleozoico (INEGI, [2003](#); como se citó en [Gobierno del Estado de Chihuahua, 2013](#)).

2.1.2 Sierra Madre Occidental.

La Sierra Madre Occidental (SMO, **Figura 2.1**) es considerada una de las provincias ígneas silícicas más grandes del mundo y la más grande del Cenozoico. La cubierta ignimbrítica de la SMO se estima en la actualidad en ~300 000 km² (McDowell y Keizer, [1977](#); McDowell y Clabaugh, [1979](#); Ward, [1995](#); como se citó en [Ferrari et al., 2005](#)). Es caracterizada por un altiplano con una elevación promedio de más de 2 000m, y aproximadamente 1200km de largo por 200-400km de ancho, la cual se extiende desde la frontera con los Estados Unidos de América hasta la Faja Volcánica Transmexicana ([Ferrari et al., 2005](#)). El término “Sierra Madre Occidental” también se utiliza para definir la provincia volcánica terciaria caracterizada por grandes volúmenes de ignimbritas silícicas ([Ferrari et al., 2005](#)). Como provincia volcánica terciaria la Sierra Madre Occidental (SMO) se extiende más allá de la provincia fisiográfica, abarcando también a la Mesa Central y parte de Chihuahua oriental ([Ferrari et al., 2005](#)).

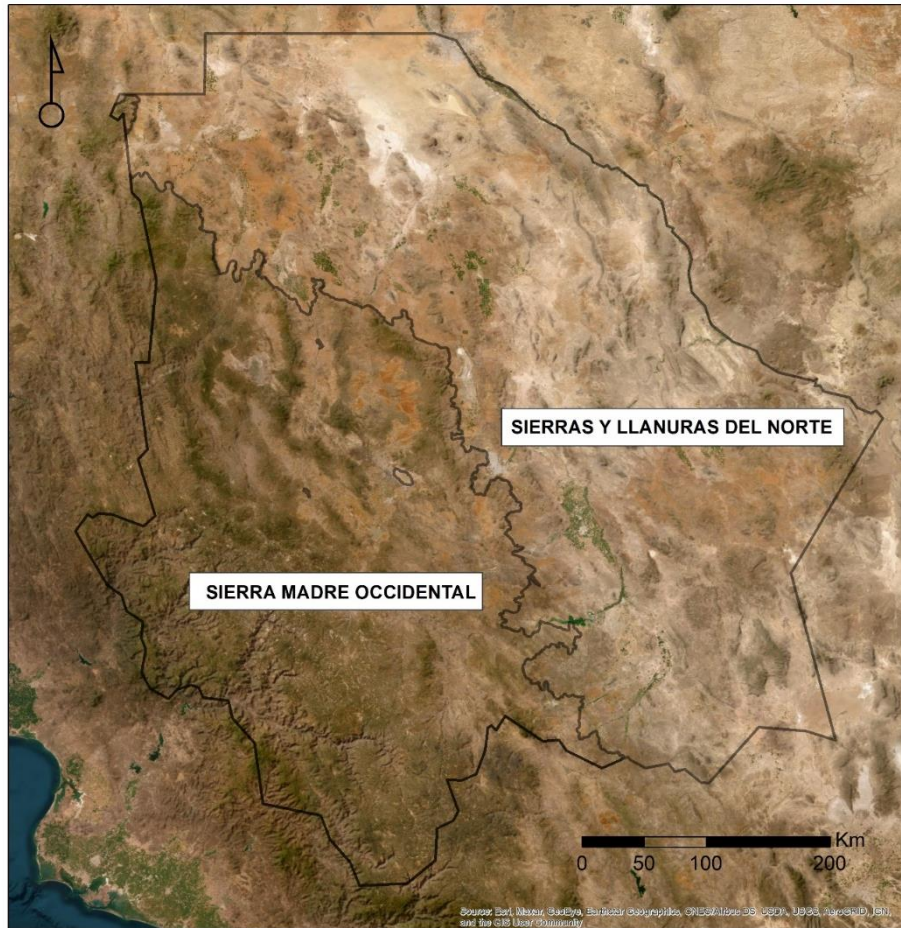


Figura 2.1. División de las provincias fisiográficas de la Sierra Madre Occidental y de la Sierras y Llanuras del Norte (Cuencas y Sierras). Modelo digital de Elevación (MDT) de Chihuahua a 15m, obtenido de [INEGI \(2013\)](#). Límite de la SMO obtenido de [INEGI \(2001\)](#).

2.2 Zonas extensionales del estado de Chihuahua.

2.2.1 Rift Del Río Grande (RRG).

El RRG es un rift continental activo, en donde la zona axial del rift se ensancha a lo largo de sus ~1000 km de longitud, desde Leadville, Colorado, hasta el sur de El Paso, Texas, donde se vuelve indistinguible de la provincia fisiográfica *Basin and Range* ([Figura 1.1](#)). Como se menciona en [Cipar et al. \(2020\)](#), los estudios geológicos en rocas sedimentarias, magmáticas, así como estudios estructurales, sugieren una compleja historia tectónica que abarca una transición

desde la compresión tardi-Laramide (60-40 Ma) a episodios discretos de extensión y vulcanismo entre ~35-20 Ma, y desde ~10 Ma hasta el presente. [Seager y Morgan \(1979\)](#), exponen que el RRG es una estructura térmicamente anómala, que se distingue en toda su longitud por la combinación de un elevado flujo de calor, volcanes recientemente activos, cuencas excepcionalmente profundas y fallas de finales del Cuaternario. Estos rasgos se interpretan como manifestaciones superficiales de un levantamiento de la astenosfera, con una corteza adelgazada que contiene enjambres de diques ([Seager y Morgan, 1979](#)).

Por otra parte, la Provincia Magmática Trans-Pecos (PVM-TP), se localiza dentro de la región sur del Rift del Río Grande y se ubica al oeste de Texas y el sur de Nuevo México, es un análogo más erosionado del rift de Kenia (Rift Gregory) en África Oriental ([Barker, 1977](#)). Como se expone en [Barker \(1977\)](#), las rocas alcalinas del Trans-Pecos son similares al conjunto basalto-fonolita-traquita-riolita de las erupciones fisurales y multicéntricas, y de algunos volcanes centrales, del rift de Kenia. Está delimitada al este por el Río Pecos, al sur y al oeste por el Río Grande, y al norte por una línea de 12 km al norte de la frontera entre Texas y Nuevo México ([Barker, 1977](#)).

El magmatismo cenozoico de la provincia magmática de Trans-Pecos se produjo por encima del *slab* subducido de Farallón, que se fue hundiendo gradualmente, a medida que disminuía la velocidad de convergencia entre las placas Norteamérica y Farallón, a partir de unos 50Ma (Bunge y Grand, [2000](#); Cowen y Bruhn, [1992](#); citado en [Parker y Henderson, 2021](#)). [Parker y Henderson \(2021\)](#) mencionan que existen tres fases de magmatismo en la PVM-TP. El magmatismo inicial comenzó hace unos 47 Ma en la zona del Big Bend, y fue mayoritariamente alcalino máfico con una producción menor de magma silíceo. El magmatismo mayoritariamente silíceo, comenzó hace 37 Ma con derrames de lava riolítica en lo que hoy es la región de las Montañas Davis, y continuó hasta hace unos 30 Ma en la frontera con México ([Parker y Henderson, 2021](#)), mientras que, el magmatismo de fase tardía inició hace unos 30 Ma, finalizando hace unos 17 Ma, y

estuvo dominado por basaltos erupcionados simultáneamente al fallamiento del *Basin and Range* (Henry y McDowell, 1986; citado en [Parker y Henderson, 2021](#)).

2.2.2 *Basin and Range (B&R).*

El *Basin and Range* es una provincia fisiográfica y un evento tectónico distensivo, que se formó en dos episodios de extensión; la fase temprana es del Oligoceno tardío al Mioceno medio, y la fase tardía del Mioceno tardío al reciente. Se extiende desde el suroeste de los Estados Unidos de América hasta la porción centro occidental de México. La provincia *Basin and Range* en México consiste en cuencas elongadas en dirección N-NNW y sierras con elevación promedio de 2000m.s.n.m, similar a lo que se observa en EE.UU (Henry y Aranda-Gómez, 1992; como se citó en [Ramírez-Peña, 2014](#)).

[Ramírez-Peña \(2014\)](#) sugiere que la presencia de una serie volcánica (42-37 Ma) que es sobreyacida en discordancia angular por ignimbritas del Oligoceno (Megaw, 1990), parece indicar que la actividad distensiva “asociada al *Basin and Range*” en el sur de Chihuahua, inició en el Eoceno. En [Ramírez-Peña \(2014\)](#) se menciona que la evidencia tectónica en la zona, permite definir que el primer episodio extensional inició inmediatamente después del periodo de máxima actividad volcánica silícica de la Sierra Madre (34 y 29 Ma; McDowell y Clabaugh, 1979; como se citó en [Ramírez-Peña, 2014](#)), y se sugiere que el Basin and Range tiene una edad <29 Ma puesto que las estructuras de tipo Basin and Range (ej. fallas de alto ángulo y bloques con bajo basculamiento indicando extensión moderada, por ejemplo [Ramírez-Peña, 2014](#)) afectan a la cubierta ignimbrítica de la Sierra Madre Occidental.

III. METODOLOGÍA.

En este proyecto se optó por utilizar datos de fuentes de acceso abierto, con el objetivo de aprovechar estos recursos, debido a la alta producción de metadatos que se generan actualmente. Según el sitio web de la editorial [Springer](#), el **Acceso Abierto** tiene lugar cuando las publicaciones se encuentran libremente disponibles en línea para todos sin costo alguno y con restricciones limitadas con respecto a la reutilización.

Para este proyecto se recopilaron datos de diversas **Bases de Datos (BD)** de distintas fuentes disponibles en plataformas de internet, artículos, tesis, informes técnicos y cartas geológicas 1:50 000 del *Servicio Geológico Mexicano*. Cada fuente fue procesada de acuerdo con las características de muestras, edad, coordenadas, tipo de roca, elementos mayores, elementos traza, y REE. Con respecto a la búsqueda de los datos de las muestras para este estudio, se consideró a rocas volcánicas de composición félsica, dentro de un rango de edad Eoceno tardío-Oligoceno (38 a 23 Ma), y pertenecientes a los estados de Chihuahua, Texas, Nuevo México y Colorado que integran a la región de interés.

3.1 Recopilación de datos de fuentes de acceso abierto.

3.1.1 Servicio Geológico Mexicano (SGM).

El [Servicio Geológico Mexicano](#) (SGM) es un organismo público descentralizado del Gobierno Federal, que genera y difunde conocimiento geológico de la república mexicana. La estrategia de trabajo empleada para la recopilación de datos en esta fuente se realizó a través de diversos métodos. Estos datos corresponden tanto a datos propios del SGM, como a recopilados de la literatura y utilizados en los proyectos de la institución

De la página web del SGM, se revisó un reservorio de publicaciones, informes técnicos y tesis. Para el caso de las *cartas geológico-mineras a escala 1:50 000 e informes técnicos* del estado de Chihuahua, se recopilaron muestras mediante la lectura y búsqueda de información asociada a rocas volcánicas de composición félsica, de edad Eoceno tardío-Oligoceno con características petrológicas de rocas hiperalcalinas. Adicionalmente se recopilaron datos de la composición mineral de dos muestras, en base a la asociación mineral típica de las rocas hiperalcalinas ([ver Anexo I](#)), sin que se presentara información geoquímica en los informes técnicos de las cartas ALAMOS DE SAN ANTONIO H13-D54 y LA COYOTA H13-D71 ([ver Anexo VI](#)).

Fueron proporcionadas por parte del SGM, cinco láminas delgadas (de aquí en adelante “muestras petrográficas”) de rocas de composición riolítica de edad del Eoceno (relación estratigráfica), localizadas en la carta geológico-minera 1:50 000 NUEVA DELICIAS H13-C45 ([Figura 4.8D](#)).

3.1.2 *Geochemistry of Rocks of the Oceans and Continents* (GEOROC).

La plataforma de internet [GEOROC \(2022\)](#) es una completa colección de análisis de rocas ígneas, metamórficas y minerales ([Figura 3.1](#)). De la cual se descargaron metadatos del estado de Chihuahua que incluyen información geoespacial, geocronológica y de referencias bibliográficas. La base se procesó en el programa Excel para filtrar las rocas volcánicas de composición félsica de interés.



Figura 3.1. Captura de pantalla de la plataforma del sitio web GEOROC.

3.1.3 The Western North American Volcanic and Intrusive Rock Database (NAVDAT).

[NAVDAT \(2022\)](#) es un sitio web de repositorio de acceso abierto de rocas volcánicas e intrusivas de América del Norte con datos geocronológicos, químicos e isotópicos, que pertenece a [J. Douglas Walker y colaboradores](#), del cual se extrajeron datos ubicados en los estados de Chihuahua, Texas, Nuevo México y Colorado de la edad Eoceno tardío-Oligoceno (Figura 3.2). Posteriormente se filtraron en el programa Excel para conservar a los datos de las rocas volcánicas de composición félsica.

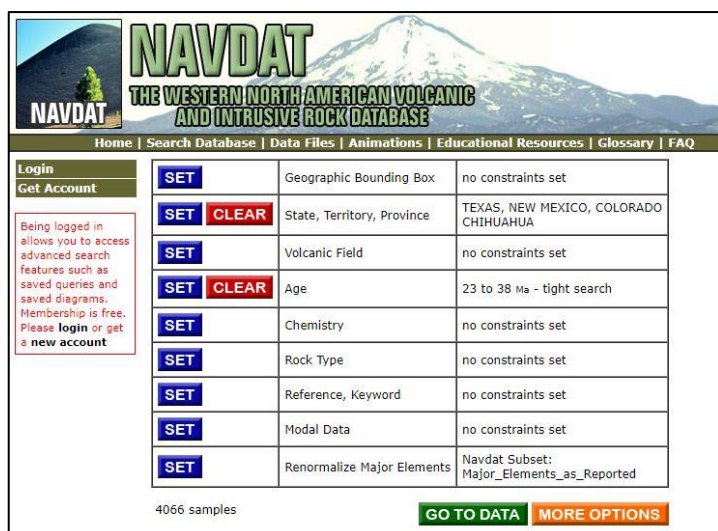


Figura 3.2. Captura de pantalla del sitio web de NAVDAT, donde se presenta un ejemplo de la búsqueda realizada para la selección de los datos de las muestras.

3.1.4 *Catalog of the Greater American Southwest archaeological obsidian sources.*

El sitio de internet [Catalog of the Greater American Southwest archaeological obsidian sources](#) ubica localidades de fuentes o yacimientos donde han sido reportadas obsidianas (FOGSWA; [Shackley, 2021](#)) en el suroeste de Estados Unidos de América y noroeste de México, y pertenece al Dr. Steven Shackley.

Para la recopilación de las muestras de obsidiana del sitio web, se ajustó una zona en el Mapa proporcionado por [Shackley \(2005\)](#) que concuerda con el área de estudio del presente proyecto ([Figura 3.3](#)), con la finalidad de revisar las localidades dentro de esta zona, que contenían muestras de obsidiana de edad del Eoceno tardío-Oligoceno, las cuales cuentan con ciertos elementos traza. Algunas muestras no mencionan coordenadas, por lo que se ubicaron buscando el sitio de acuerdo con la información proporcionada de la fuente arqueológica y de localidades mencionadas. Por esta razón, varias muestras de la misma fuente de obsidiana tienen las mismas coordenadas.

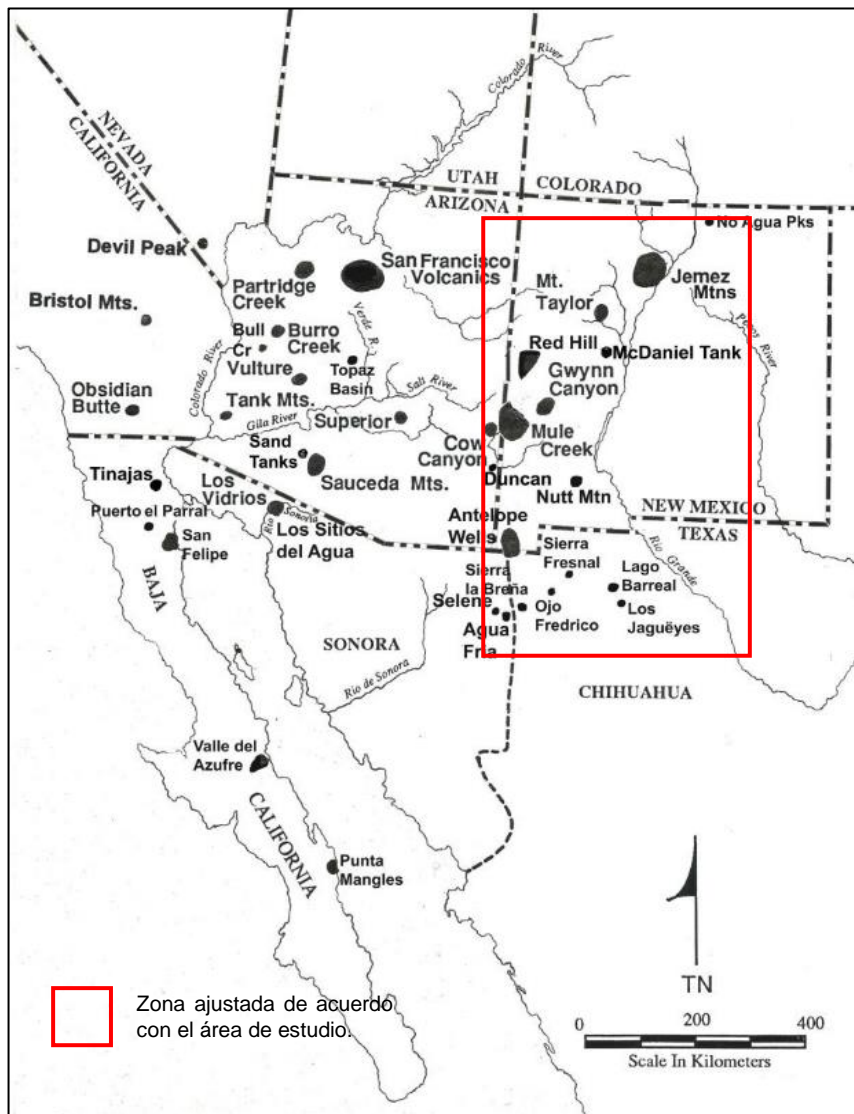


Figura 3.3. Mapa de Shackley (Shackley, 2005), que indica las fuentes de obsidiana reportadas en su estudio. El rectángulo rojo indica el área considerada para la consulta de localidades y recopilación de las muestras de obsidiana de este estudio. Modificado de la página web Catalog of the Greater American Southwest archaeological obsidian sources.

3.2 Procesamiento de los datos.

Los datos de las muestras recopiladas en este estudio se agruparon en una **Base de Datos (BD)** dentro de un documento de Excel de acuerdo con sus características de coordenadas, fuente literaria, estado, edad, tipos de roca y geoquímica (elementos mayores, trazas y REE), para su procesamiento en los programas Excel, Igpert y ArcGIS.

El procesado de los datos incluyó el recálculo de los elementos mayores al 100%, libres de volátiles, para la utilización de los siguientes diagramas de clasificación. Se realizó el cálculo de la norma CIPW (norma catiónica de [Irvine and Baragar \(1971\)](#)), para el cálculo de los minerales normativos a través del software [Igpert v. 2021](#).

3.2.1 Nomenclatura formal.

Las muestras obtenidas de los informes técnicos del *SGM*, y las muestras petrográficas (del *SGM*), corresponden a muestras que no tienen geoquímica de elementos mayores, ni trazas, por lo que no pueden ser clasificadas por su química. Estas fueron consideradas para este estudio por su constitución mineralógica, edad y ubicación geográfica. Exceptuando los ejemplares antes mencionados, las muestras se clasificaron químicamente para obtener una nomenclatura petrológica formal, utilizando dos procesos distintos bajo el uso del software [Igpert v. 2021](#).

1. Diagrama TAS (*Total Alkali-Silica*).

Las muestras con elementos mayores Na_2O , K_2O y SiO_2 se clasificaron utilizando el diagrama de tipos de roca TAS, de [Le Bas et al., 1986](#).

2. Diagrama de elementos traza *HFS* de Pearce.

Los datos de las muestras sin Na_2O , K_2O y SiO_2 , se clasificaron utilizando los contenidos de sus elementos Zr, Ti, Nb e Y mediante el diagrama de [Pearce \(1996\)](#).

3.2.2 Clasificación de rocas hiperalcalinas.

La identificación de las rocas hiperalcalinas consistió en graficar las muestras utilizando tres métodos distintos (1) utilizando el diagrama de [Maniar y Picolli \(1989\)](#), (2) utilizando el diagrama de tipos de rocas de [Winchester y Floyd \(1977\)](#) y, (3) por su constitución mineral.

(1) Bajo el primer método, se calculó el grado de saturación en alúmina para las muestras que contaban con los elementos Al_2O_3 , Na_2O , K_2O y CaO , en proporciones molares. Las muestras se filtraron en el programa Excel de acuerdo con el contenido molar total de álcalis, contra el contenido molar de alúmina, conforme a la clasificación propuesta por [Shand \(1927\)](#) en Hiperluminosas [$\text{Al}_2\text{O}_3 > (\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$], Metaluminosas [$\text{Al}_2\text{O}_3 < (\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ pero $\text{Al}_2\text{O}_3 > (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$] e Hiperlcalinas [$\text{Al}_2\text{O}_3 < (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$]. Se utilizó el diagrama de [Maniar y Picolli \(1989\)](#) para observar a las muestras que se clasifican en él como hiperalcalinas.

(2) En el segundo método, se graficaron las muestras que no pueden ser procesadas por el índice de Hiperlcalinidad [$\text{Al}_2\text{O}_3 < (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$], a través del diagrama de tipos de rocas de [Winchester y Floyd \(1977\)](#), que utiliza elementos traza inmóviles (Zr, Ti, Nb e Y). Se asociaron a rocas hiperalcalinas las muestras del campo comendita/pantelerita.

(3) El tercer método se basó en las clasificaciones petrográficas de los datos recopilados en los informes técnicos del SGM, y de las muestras petrográficas (del SGM) que presentan una relación mineralógica característica del magmatismo de afinidad hiperalcalina ([ver Anexo I](#)).

IV. RESULTADOS.

De acuerdo con los datos recabados en la **Base de Datos (BD)**, 270 rocas volcánicas de composición félsica son del estado de Chihuahua, y se presentan aquí los resultados obtenidos para la asignación de su nomenclatura formal de acuerdo con los diversos métodos de clasificación antes mencionados que se utilizaron en este estudio, tanto geoquímicos, como petrográficos. Seguidamente, se muestra la identificación y clasificación de aquellas rocas reconocidas como hiperalcalinas en el estado de Chihuahua, así como su distribución espacial y el contexto geológico en el que se localizan.

4.1 Magmatismo félsico hiperalcalino del Eoceno tardío-Oligoceno en el estado de Chihuahua.

La asignación de una nomenclatura formal para las muestras recopiladas en la base de datos consideró un total de 481 rocas volcánicas de composición félsica (**Figura 4.1A**), de las cuales 270 corresponden al estado de Chihuahua, mientras que las 211 muestras restantes conciernen a los estados de Texas, Nuevo México y Colorado. Las rocas son en su mayoría de edad del Oligoceno (**Figura 4.1A**). Para estos datos, las rocas volcánicas de origen efusivo destacan sobre las piroclásticas en abundancia, representando el 90% (muestras de color azul, **Figura 4.1A**).

4.1.1 Nomenclatura formal.

Para la clasificación de la nomenclatura utilizando el diagrama TAS (*Total Alkalies vs Silica*) de **Le Bas et al., 1986**, se clasificaron 222 muestras, de las 270 del estado de Chihuahua, tanto volcánicas lávicas como piroclásticas (**Figura 4.1B**).

A través de la clasificación del diagrama de **Le Bas et al., 1986**, se obtuvo que 163 muestras son de composición riolítica, y varían en los contenidos de SiO₂ de 69 a 81% en peso, de las cuales, 133 corresponden a rocas volcánicas lávicas y

30 a piroclásticas (Figura 4.1B). Aplicando el discriminante normativo ($q < 20\%$) propuesto por la IUGS (Unión Internacional de Ciencias Geológicas, por sus siglas en inglés), 36 muestras son de composición traquítica con contenidos en SiO_2 de 63 a 78% en peso, en las que, 34 rocas son volcánicas lávicas, y tan sólo 2, son piroclásticas, 14 muestras son de composición dacítica, que presentan contenidos de SiO_2 de 65 a 69 % en peso, donde todas son volcánicas lávicas. Finalmente, 9 muestras son rocas de composición traquidacita, aplicando el discriminante normativo ($q > 20\%$) propuesto por la IUGS, y corresponden al menor número de ejemplares reportados en esta base, con contenidos en SiO_2 de 64 a 69% en peso, siendo todas rocas volcánicas lávicas.

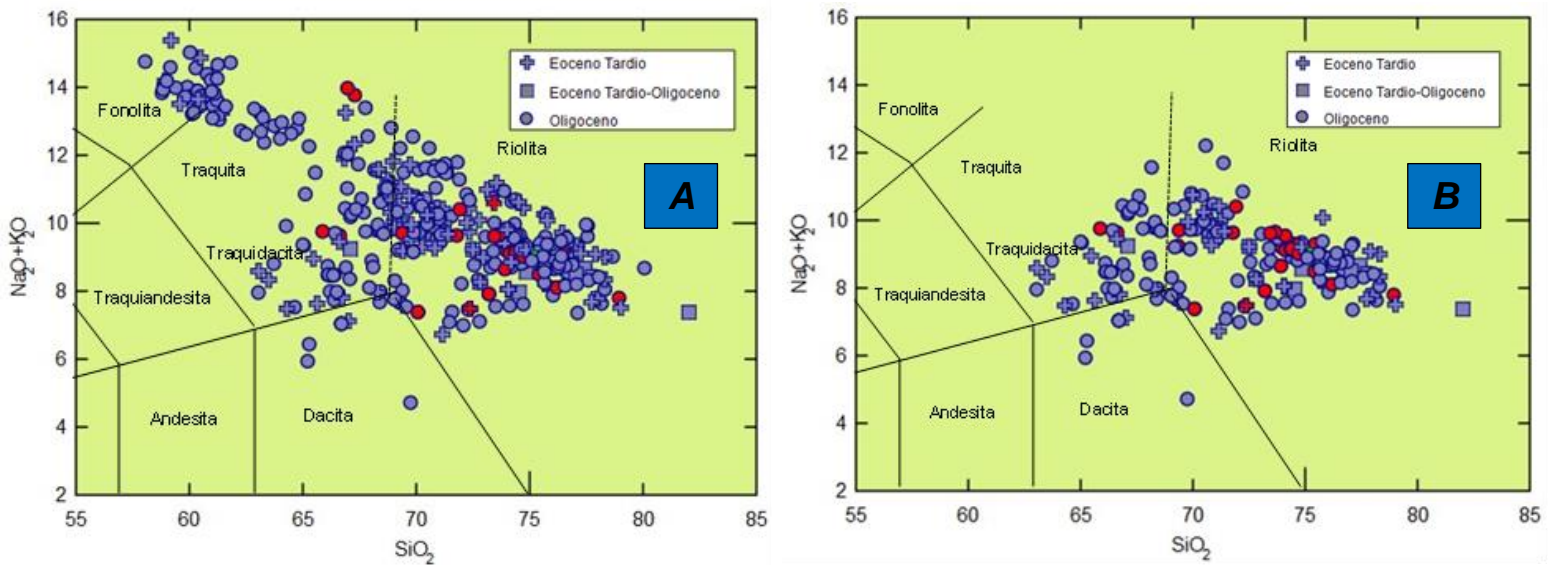


Figura 4.1 Diagrama TAS (*Total Alkalis vs Silica*) de [Le Bas et al., 1986](#), que muestra la clasificación para las rocas volcánicas y piroclásticas, de acuerdo con los contenidos de álcalis vs SiO_2 en la base de datos desarrollada para este estudio, se clasifican por edad y se representan en color azul, las rocas volcánicas lávicas, y en color rojo las piroclásticas. **A)** Para los estados de **Colorado, Nuevo México, Texas y Chihuahua.** **B)** Para el estado de **Chihuahua.**

El segundo método para la clasificación y nomenclatura consistió en la utilización de los diagramas de elementos traza inmóviles como el de [Pearce \(1996\)](#) y el de [Winchester y Floyd \(1977\)](#), basados en los cocientes Zr/Ti y Nb/Y . Este fue aplicado principalmente debido a que 41 muestras de las Fuentes de Obsidiana del Gran SW Americano (FOGSWA; [Shackley, 2021](#)) carecen de elementos mayores.

La clasificación con esos diagramas permitió reconocer que 17 muestras de obsidiana son **riolitas alcalinas** (Figura 4.2), las cuales pertenecen a las fuentes *Los Jagueyes* y *Lago Barreal*, y se caracterizan por presentar altos contenidos en los elementos como el Zirconio (Zr), que varía de 500 a 2000 ppm y el Titanio (Ti), que va desde 1300 a 1900 ppm. Por otro lado, 24 muestras que pertenecen a la fuente de obsidiana *Sierra Fresnal* fueron clasificadas como **riolitas y dacitas**.

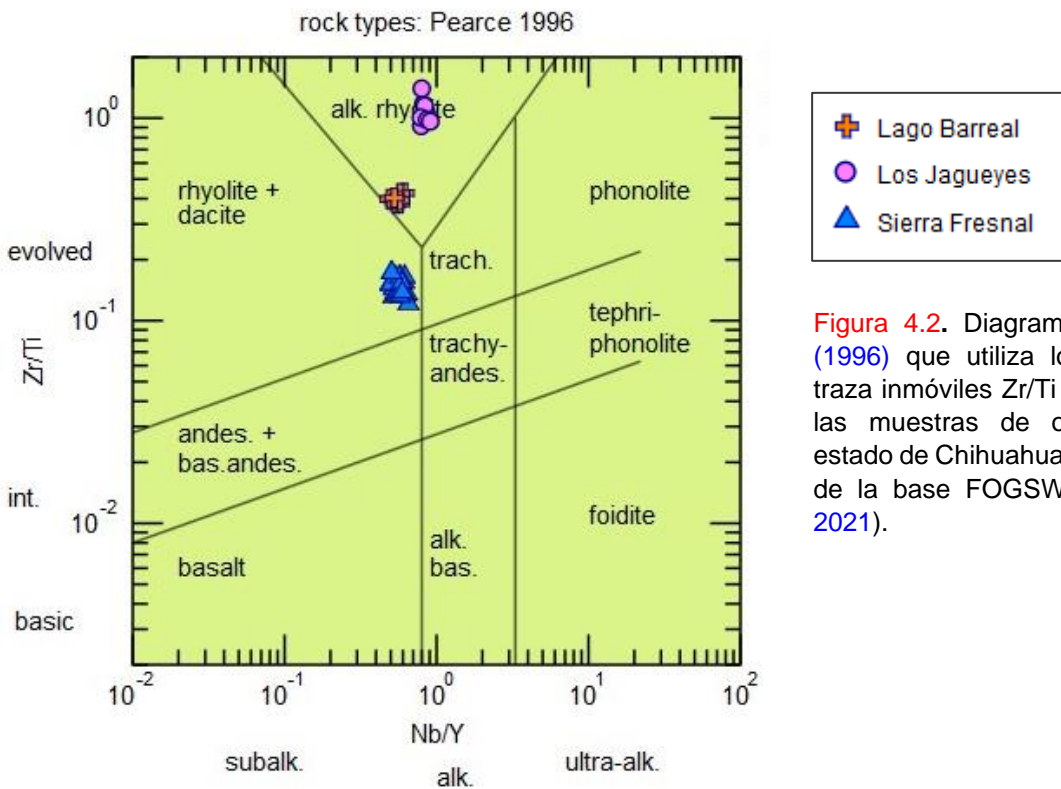


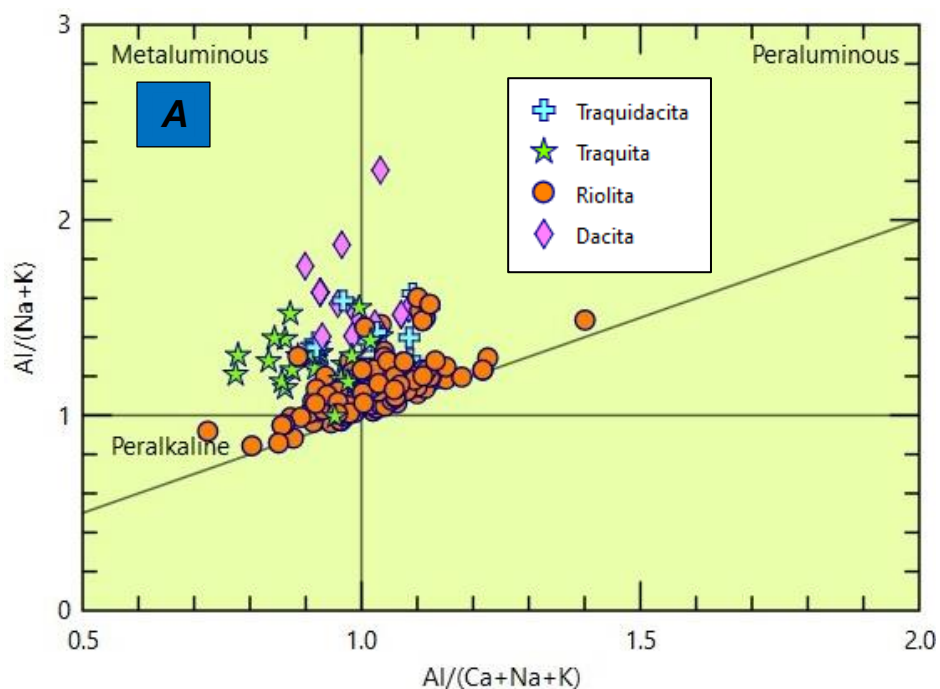
Figura 4.2. Diagrama de Pearce (1996) que utiliza los elementos traza inmóviles Zr/Ti vs Nb/Y para las muestras de obsidiana del estado de Chihuahua provenientes de la base FOGSWA (Shackley, 2021).

El tercer método para nombrar formalmente a las rocas se basó en las clasificaciones petrográficas de las muestras establecidas en los informes técnicos del SGM (ver Anexo VI), y con respecto a las muestras petrográficas (del SGM), ya habían sido clasificadas por la institución. Corresponden a un total de 7 rocas, clasificadas como riolitas, entre las cuales una es lávica y las otras 6 muestras son piroclásticas (Tablas 1, 2). Estas muestras no cuentan con elementos mayores, ni trazas, para una clasificación química.

4.1.2 Clasificación de rocas hiperalcalinas.

Para la identificación de las rocas félsicas con afinidad hiperalcalina, se decidió emplear los tres métodos anteriores, de acuerdo con las mismas implicaciones mencionadas en el apartado anterior sobre la nomenclatura formal. En el primer método, las muestras que contienen elementos mayores se graficaron utilizando el diagrama propuesto por Maniar y Picolli (1989), el cual contempla el uso del índice de Shand (1927), que consiste en el cálculo del grado de saturación en alúmina bajo la relación molar $Al/(Na+K+Ca)$, así como un índice de hiperalcalinidad basado en el cociente $Al/(Na+K)$ en proporción molar.

Del total de 222 muestras del estado de Chihuahua, solo 17 muestras son de variedades hiperalcalinas (e.g. cociente $Al/(Na+K)$ de 0.85 a 1; Figura 4.3A). Estas rocas corresponden a 16 de composición riolítica y 1 de composición traquítica. De acuerdo con el diagrama de clasificación de riolitas y traquitas de tipo comendita y pantelerita utilizando Al_2O_3 vs FeO^t , de McDonald (1974) y sugerido por la IUGS, las riolitas y la traquita se clasifican como comenditas (Figura 4.3B).



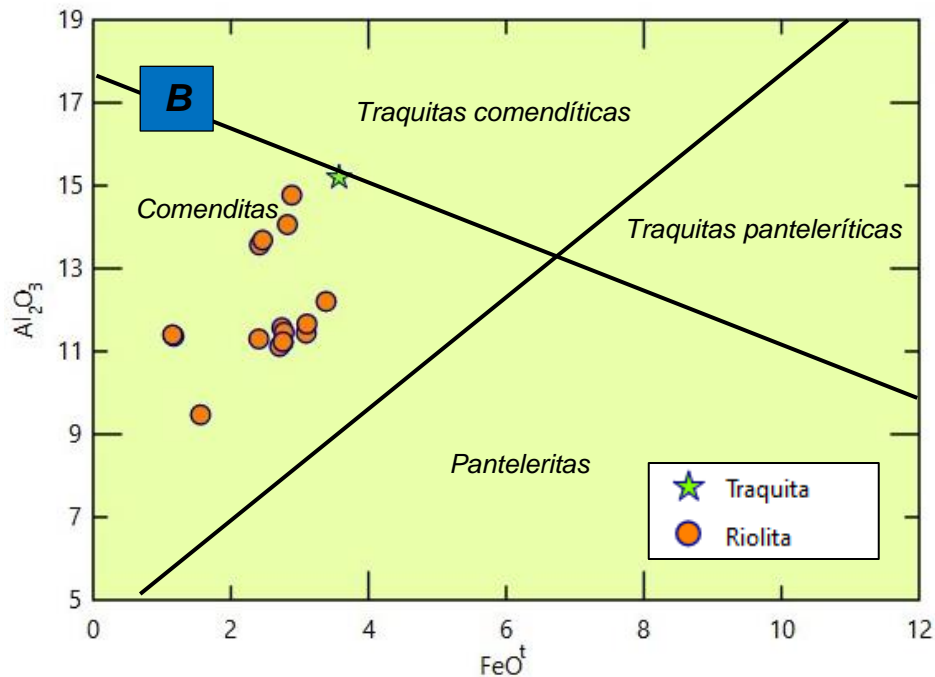


Figura 4.3. Diagramas de clasificación. **A)** saturación en alúmina según Maniar y Picolli (1989), que muestra a las rocas volcánicas félsicas del estado de Chihuahua. **B)** diagrama de McDonald (1974, p.7, fig.3), contempla los contenidos de Al_2O_3 y FeO^t , se muestra la clasificación para las rocas hiperalcalinas del estado de Chihuahua.

Prosiguiendo con la identificación de rocas hiperalcalinas bajo el segundo método, se decidió utilizar el diagrama de Winchester y Floyd (1977), el cual en base a las relaciones de los elementos traza de Zr, Ti, Nb e Y, discrimina entre riolitas “convencionales” (aquellas que no son hiperalcalinas) e hiperalcalinas. Para este diagrama se utilizaron las 41 muestras de obsidiana obtenidas de la fuente FOGSWA (Shackley, 2021), las cuales no cuentan con elementos mayores. De estas, solo 10 fueron identificadas como hiperalcalinas (de acuerdo con el campo comendita/pantelerita del diagrama), que pertenecen a la fuente de obsidias Los Jagueyes (Figura 4.4).

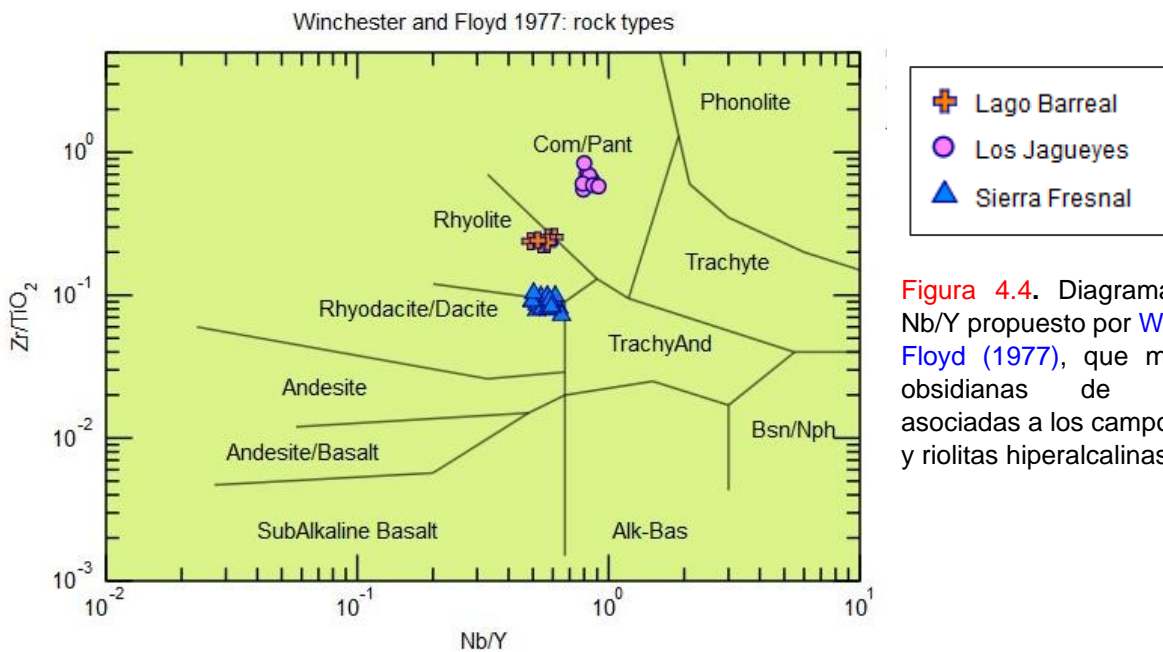


Figura 4.4. Diagrama Zr/Ti vs Nb/Y propuesto por [Winchester y Floyd \(1977\)](#), que muestra las obsidias de Chihuahua asociadas a los campos de riolita y riolitas hiperalcalinas.

Por último, bajo el tercer método de identificación basado en las relaciones minerales, afines al magmatismo hiperalcalino (e.g. *sanidina*, *cuarzo*, *arfvedsonita*, *aegirina* y *fayalita*), encontradas en la petrografía de las muestras, se determinó que 7 muestras son de rocas hiperalcalinas con una composición mineral agpaítica.

En primer lugar, las 2 muestras clasificadas como toba riolítica en la nomenclatura formal (de los informes técnicos del SGM) contienen una relación mineral anhidra de *sanidina*, *cuarzo* y *óxidos de fierro* ([Tabla 1](#), ver [Anexo VI](#)). Mientras que, por otro lado, las 5 muestras (de la petrografía del SGM) clasificadas como riolita e ignimbrita riolítica ([Tabla 2](#)) se caracterizaron por presentar una relación mineral de *sanidina*, *cuarzo*, *arfvedsonita*, *aegirina* y *fayalita*, donde los minerales como, el clinopiroxeno de tipo aegirina rico en Fe y Na, y el anfíbol arfvedsonita rico en Fe, son minerales marcadores de las rocas típicamente hiperalcalinas ([Figura 4.5](#)).

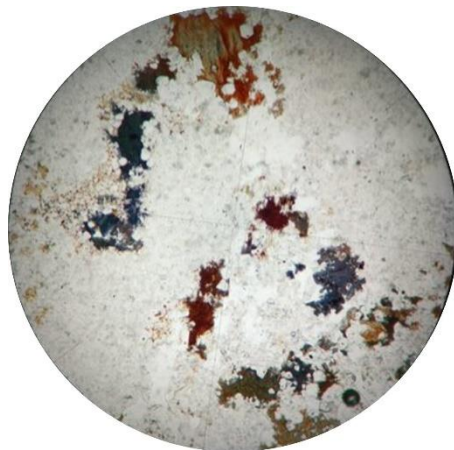
Muestras de Informes técnicos del SGM	
Clave	Características
GSA-140	Toba riolítica de cuarzo, feldespatos alcalinos (sanidina) y hematita como accesorio.
FVP223	Toba riolítica de sanidina, cuarzo y hematita como accesorio.

Tabla 1. Tabla que contiene las rocas hiperalcalinas consideradas de acuerdo con su relación mineral de los **Informes Técnicos** del estado de Chihuahua. Estas muestras fueron obtenidas de los informes técnicos de las cartas ALAMOS DE SAN ANTONIO H13-D54 (GSA-140), y LA COYOTA H13-D71 (FVP223).

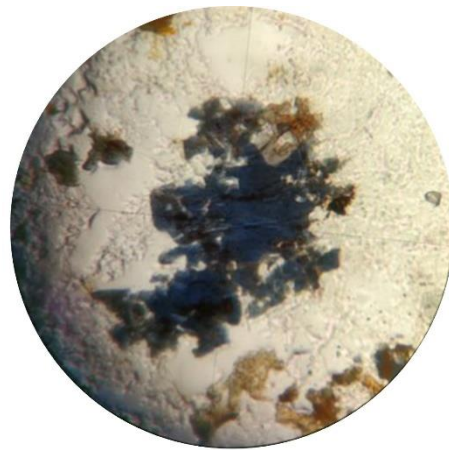
Muestras petrográficas del SGM	
Clave	Características
TRC-42P	Riolita de sanidina, cuarzo, arfvedsonita, fayalita y posible riebeckita
TRC-56P	Ignimbrita riolítica de sanidina, cuarzo, fayalita y aegirina
TREA-28P	Ignimbrita riolítica de sanidina, cuarzo, fayalita
TREA-29P	Ignimbrita riolítica de sanidina, cuarzo y fayalita en posición tardía
TREA-43P	Ignimbrita riolítica de sanidina, cuarzo, arfvedsonita, aegirina y fayalita

Tabla 2. Tabla que contiene las rocas hiperalcalinas consideradas de acuerdo con su relación mineral de las muestras **petrográficas (del SGM)**. Estas muestras (lámina delgada) fueron proporcionadas por el SGM, y pertenecen a la carta NUEVO DELICIAS H13-C45.

A



TRC42P LPA, 10X



LPA, 60X

2 mm

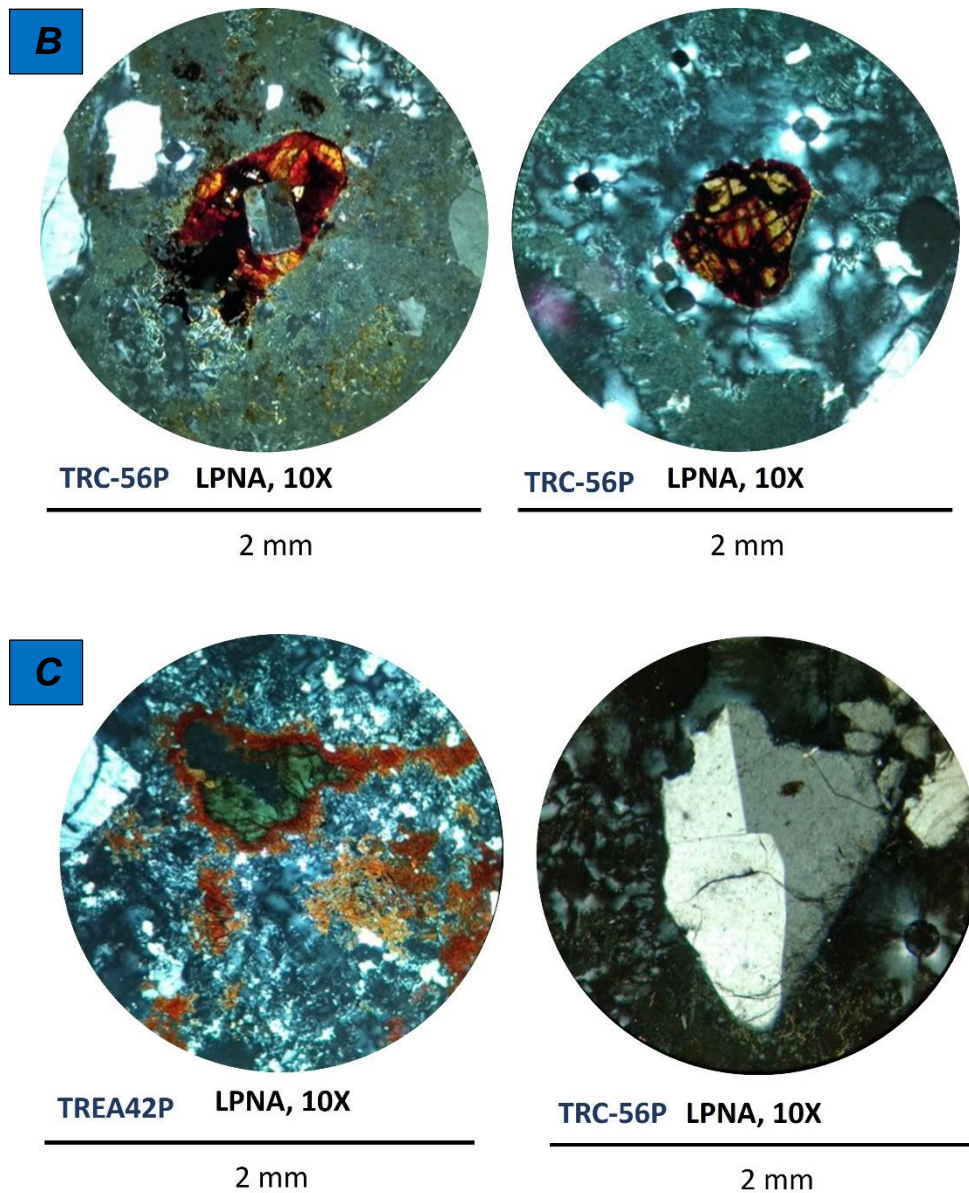


Figura 4.5. Fotomicrografías de los principales minerales característicos marcadores de las rocas típicamente hiperalcalinas reconocidas en las muestras estudiadas. Las muestras fueron tomadas con lentes de 10x y 60x. **A)** Cristales de anfíbol arfvedsonita con un pleocroísmo muy marcado que varía en tonos de verde; Cristal de riebekita con relieve alto (color azul prusia) en una matriz holocristalina; **B)** Cristal de PI dentro de cristal de clinopiroxeno aegirina de alto relieve con un alto grado de oxidación. Y cristal de aegirina en alto relieve, nótese que destacan los altos colores de birrefringencia (a pesar de la oxidación), y la exfoliación de casi 90°. **C)** Cristal de anfíbol rodeado de fayalita. Macla simple en fenocristal de sanidina. Abreviaturas: **LPNA:** Luz Polarizada No Analizada. **LPA:** Luz Polarizada Analizada.

4.2 Distribución espacial y contexto geológico de las rocas volcánicas hiperalcalinas del estado de Chihuahua.

La mayoría de las riolitas reconocidas aquí como hiperalcalinas se localizan en la porción centro, así como al norte y este del estado de Chihuahua, cerca de los estados de Texas y Coahuila. Una muestra hiperalcalina identificada en la provincia de la SMO, no fue considerada para la distribución de las zonas anteriores, por dos razones, 1) se localiza muy alejada de las otras rocas hiperalcalinas identificadas, lo que podría ocasionar un sesgo en los resultados finales, 2) se considera que podría ser objeto de estudio de una temática particular, con un enfoque distinto al que se trata en esta tesis.

Se distinguen tres zonas con ocurrencia de estas rocas, presentes en Sierras que guardan una ligera orientación NW-SE, entre las provincias magmáticas del Rift del Río Grande y de la Sierra Madre Occidental (Figura 4.6). Las muestras asociadas a las obsidias (FOGSWA; Shackley, 2021) corresponden a grupos de muestras (por fuente), con las mismas coordenadas.

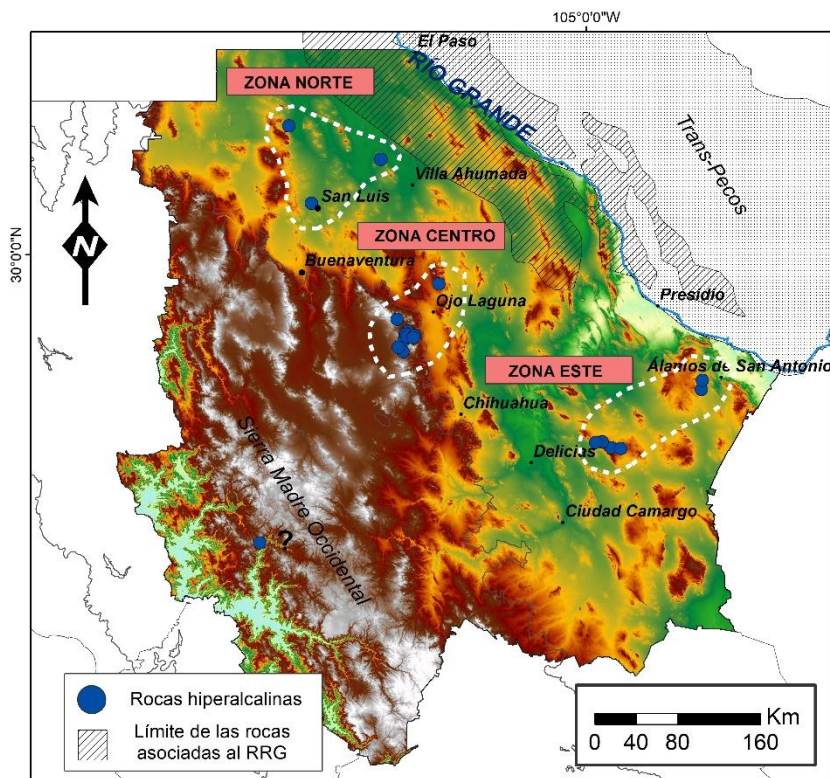


Figura 4.6. Distribución espacial de las riolitas hiperalcalinas en el estado de Chihuahua en función de la fisiografía y la ubicación de las principales provincias magmáticas. Imagen MDT obtenida de INEGI (2013). Límite del Trans-Pecos obtenido de Terry Cook (2015). Límite del RRG, que muestra la presencia de rocas asociadas, propuesta en la imagen de Villarreal-Fuentes *et al.* (2016).

Zona Norte.

En la zona norte ([Figura 4.7A](#)) las muestras reconocidas como hiperalcalinas pertenecen a los datos de la fuente FOGSWA ([Shackley, 2021](#)), corresponden a tres fuentes de marekanitas, el primero es asociado a la Sierra *Fresnal* ([Figura 4.7B](#)), reconocida como una fuente de marekanitas asociadas a domos de riolitas coalescentes (que se unen) con tendencia noroeste-sureste ([Shackley, 2021](#)). La litología presente son riolitas del Oligoceno (ToR-Rd, ToR) y conglomerado polimíctico del Cuaternario (QhoCgp). Los otros dos sitios arqueológicos son asociados a fuentes secundarias de marekanitas, uno cercano a la *Laguna El Barreal* ([Figura 4.7C](#)), que corresponde a siete muestras de obsidiana arqueológica asociadas a litología de andesitas del Eoceno (TeA), ignimbritas del Oligoceno (ToTR-Ig) y conglomerado polimíctico del Plioceno (TplCgp) para las rocas de la fuente arqueológica de obsidianas. *Los Jagueyes* ([Figura 4.7D](#)) cercano a la localidad de San Luis, contempla diez muestras, la litología asociada son ignimbritas del Oligoceno (ToTR-Ig), basaltos del Oligoceno (ToB) y conglomerado polimíctico del Cuaternario (QptCgp) para esta fuente, el autor ([Shackley, 2021](#)) menciona que no es posible distinguir que nódulos son geológicos y cuales culturales.

Sus coordenadas fueron establecidas de acuerdo con la información ahí proporcionada. De acuerdo con la geología de la región estas localidades se encuentran dentro de las cartas geológico-mineras 1:250 000 correspondientes a CIUDAD JUAREZ H13-1 y NUEVAS CASAS GRANDES H13-4. En las dos regiones existen rocas félsicas del Eoceno y del Oligoceno de acuerdo con el sitio web [GEOINFOMEX-SGM](#) ([Figura 4.7](#)).

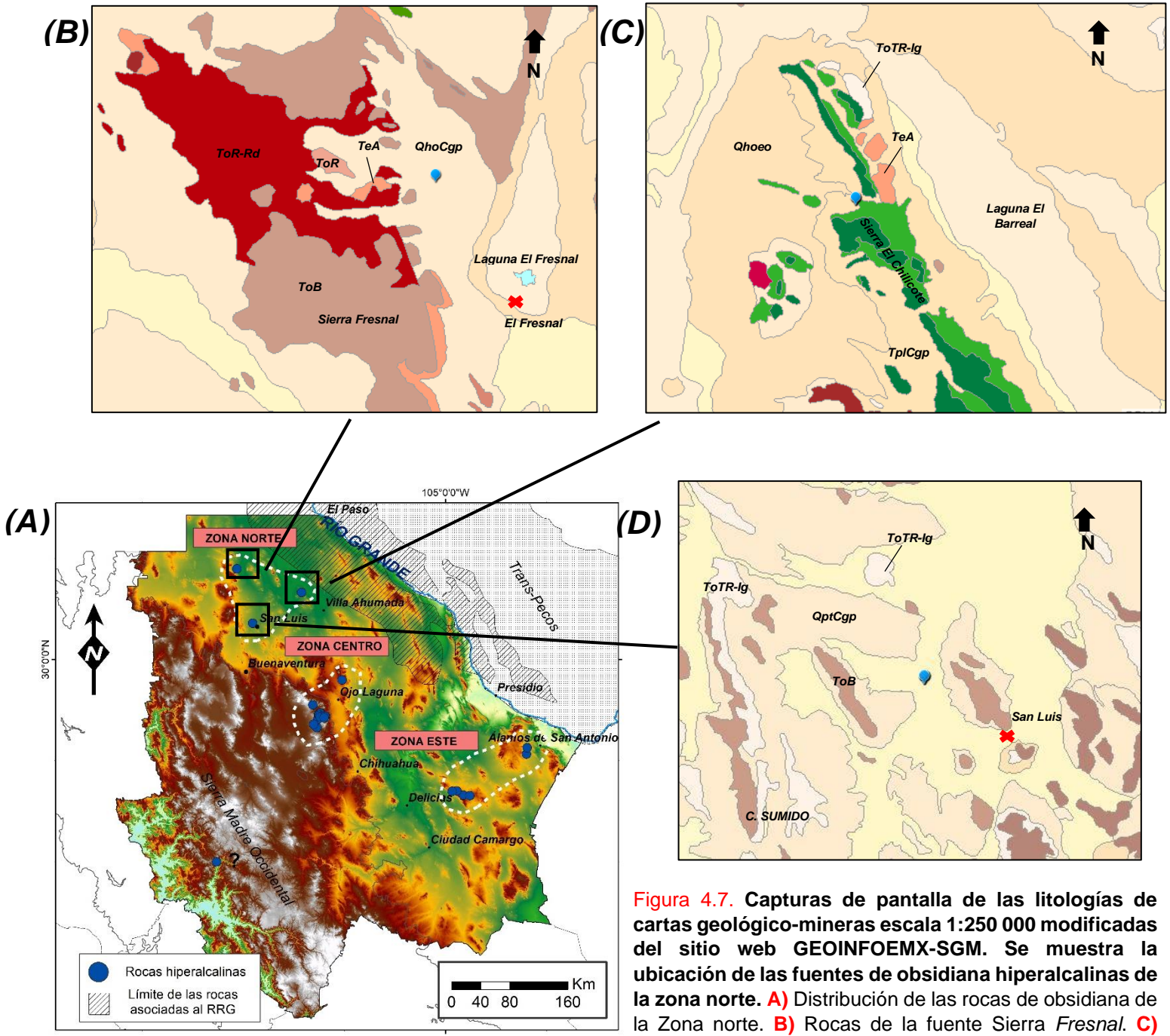


Figura 4.7. Capturas de pantalla de las litologías de cartas geológico-mineras escala 1:250 000 modificadas del sitio web GEOINFOEMX-SGM. Se muestra la ubicación de las fuentes de obsidiana hiperalkalinas de la zona norte. **A)** Distribución de las rocas de obsidiana de la Zona norte. **B)** Rocas de la fuente Sierra Fresnal. **C)** Rocas de la fuente de Laguna El Barreal, **D)** Rocas de la fuente de Los Jagueyes.

Zona Centro.

Por otra parte, las muestras hiperalcalinas correspondientes a la zona centro (Figura 4.6), son en su mayoría de la fuente del *Servicio Geológico Mexicano*, a excepción de una muestra, que pertenece a [Achim y Goldstein \(2000\)](#), pero que fue obtenida de esta misma fuente.

La roca hiperalcalina que se localiza al noreste (Figura 4.8B), corresponde a una muestra geológica obtenida en la Sierra *El Mezquite* cercana a la localidad de Ojo Laguna (Figura 4.8C). Las 12 muestras que se localizan al suroeste son muestras geológicas, cercanas a la Sierra *Los Fresnos*, 5 de ellas corresponden a las muestras petrográficas (del SGM; delimitadas con una línea punteada negra, Figura 4.8D), al noroeste de la comunidad ejidal de Nueva Delicias.

De acuerdo con la geología de la región estas localidades se encuentran dentro de la carta geológico-minera 1: 250 000 correspondiente a BUENAVENTURA H13-7. Se reportan edades del Eoceno-Oligoceno de acuerdo con el sitio web [GEOINFOMEX-SGM](#) (Figura 4.8).

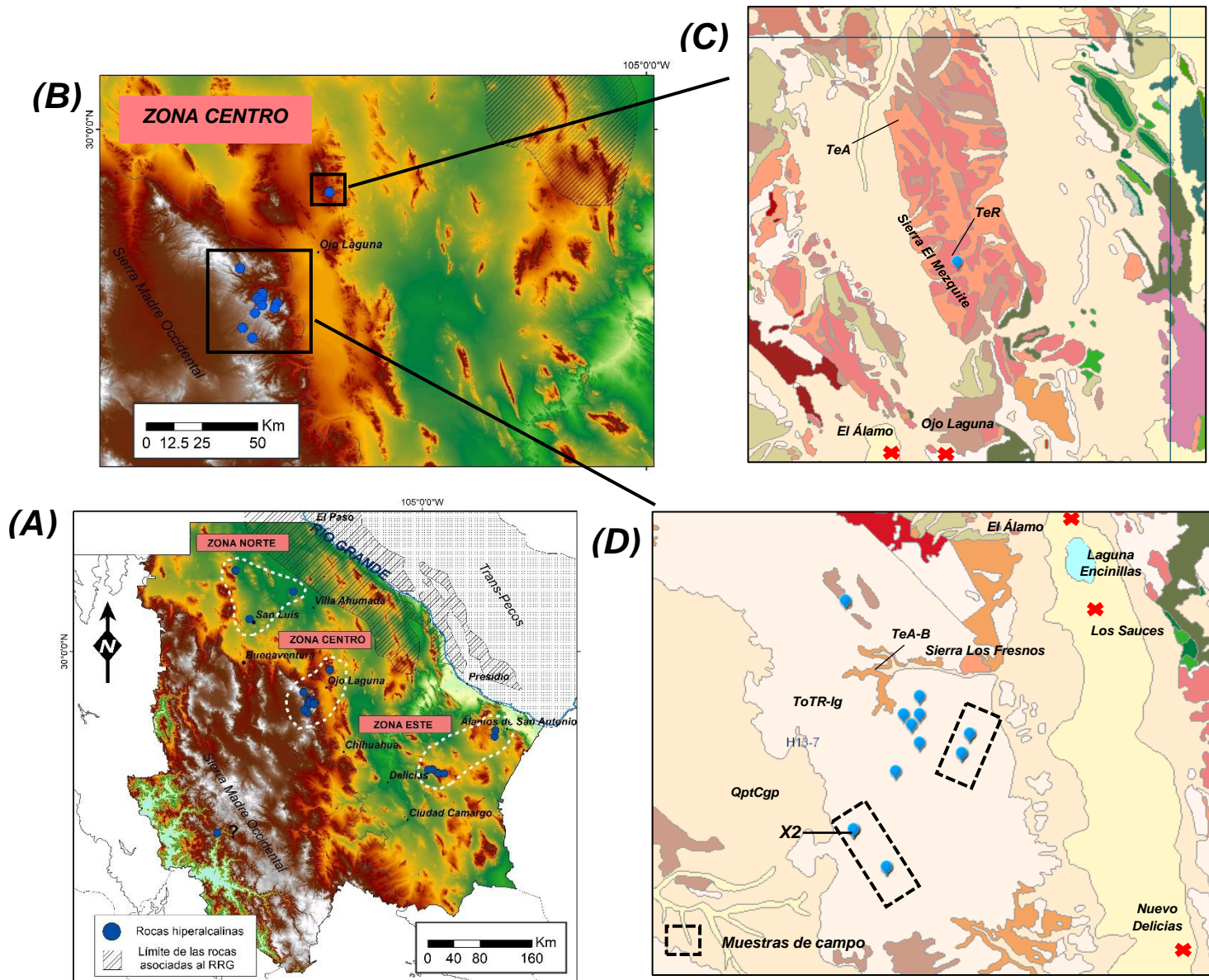


Figura 4.8. Distribución de las rocas hiperalcalinas de la zona centro. **A)** Ubicación en el Estado. **B)** Ampliación de la zona centro. Las litologías donde ocurren las muestras son: **C)** Riolita del Eoceno (TeR), andesita del Eoceno (TeA) para la muestra que se localiza al norte de Ojo Laguna. **D)** Ignimbrita del Oligoceno (ToTR-Ig), andesita-basalto del Eoceno (TeA-B), y conglomerado polimictico del cuaternario (QptCgp) para las muestras que se localizan al noroeste de Nuevo Delicias. Mapas tomados de las cartas geológico-mineras escala 1:250 000 modificadas del sitio web GEOINFOMEX-SGM. Abreviaturas: **X2**: Dos muestras se superponen.

Zona Este.

Las rocas identificadas como hiperalkalinas asociadas a la zona este, corresponden a las fuentes NAVDAT y *cartas geológico-mineras escala 1:50 000 e informes técnicos del SGM*, y se localizan entre las localidades de Ciudad Delicias y Álamos de San Antonio. (Figura 4.9A).

Las muestras cercanas a Álamos de San Antonio se localizan al norte del pueblo Escobillas de Arriba (Figura 4.9C). Las muestras localizadas al Este del pueblo Delicias, se localizan en la Sierra Los Orcanos (Figura 4.9D). De acuerdo con la geología de la región estas localidades se encuentran dentro de la carta geológico-minera 1: 250 000 correspondiente a CIUDAD DELICIAS H13-11, y reportan edades del Oligoceno de acuerdo con el sitio web [GEOINFOMEX-SGM](#) (Figura 4.9).

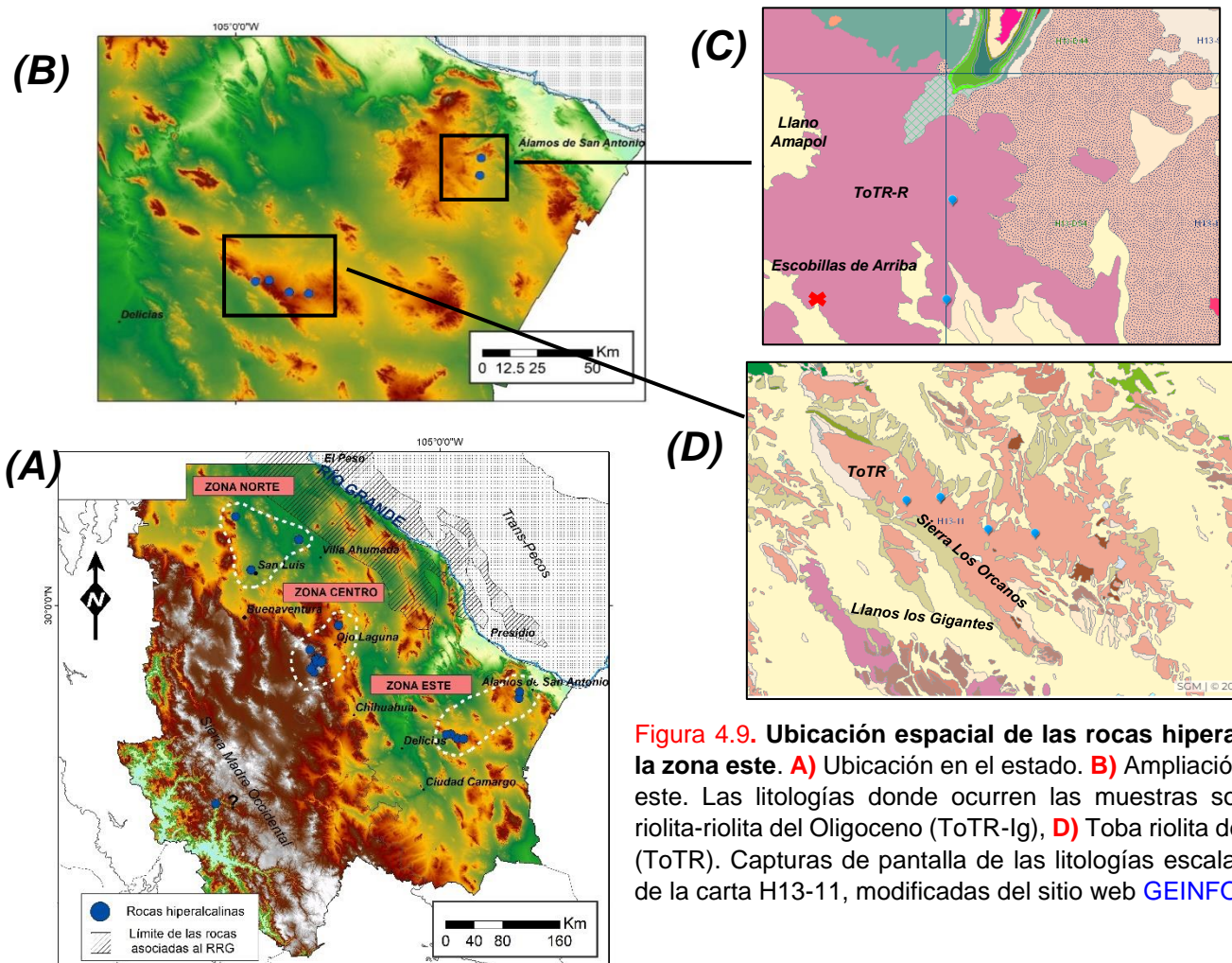


Figura 4.9. Ubicación espacial de las rocas hiperalkalinas de la zona este. A) Ubicación en el estado. B) Ampliación de la zona este. Las litologías donde ocurren las muestras son: C) Toba riolita-riolita del Oligoceno (ToTR-Ig), D) Toba riolita del Oligoceno (ToTR). Capturas de pantalla de las litologías escala 1: 250 000 de la carta H13-11, modificadas del sitio web [GEOINFOMEX-SGM](#).

4.3 Mapa de distribución geográfica de las rocas hiperalcalinas identificadas en el estado de Chihuahua y en RRG.

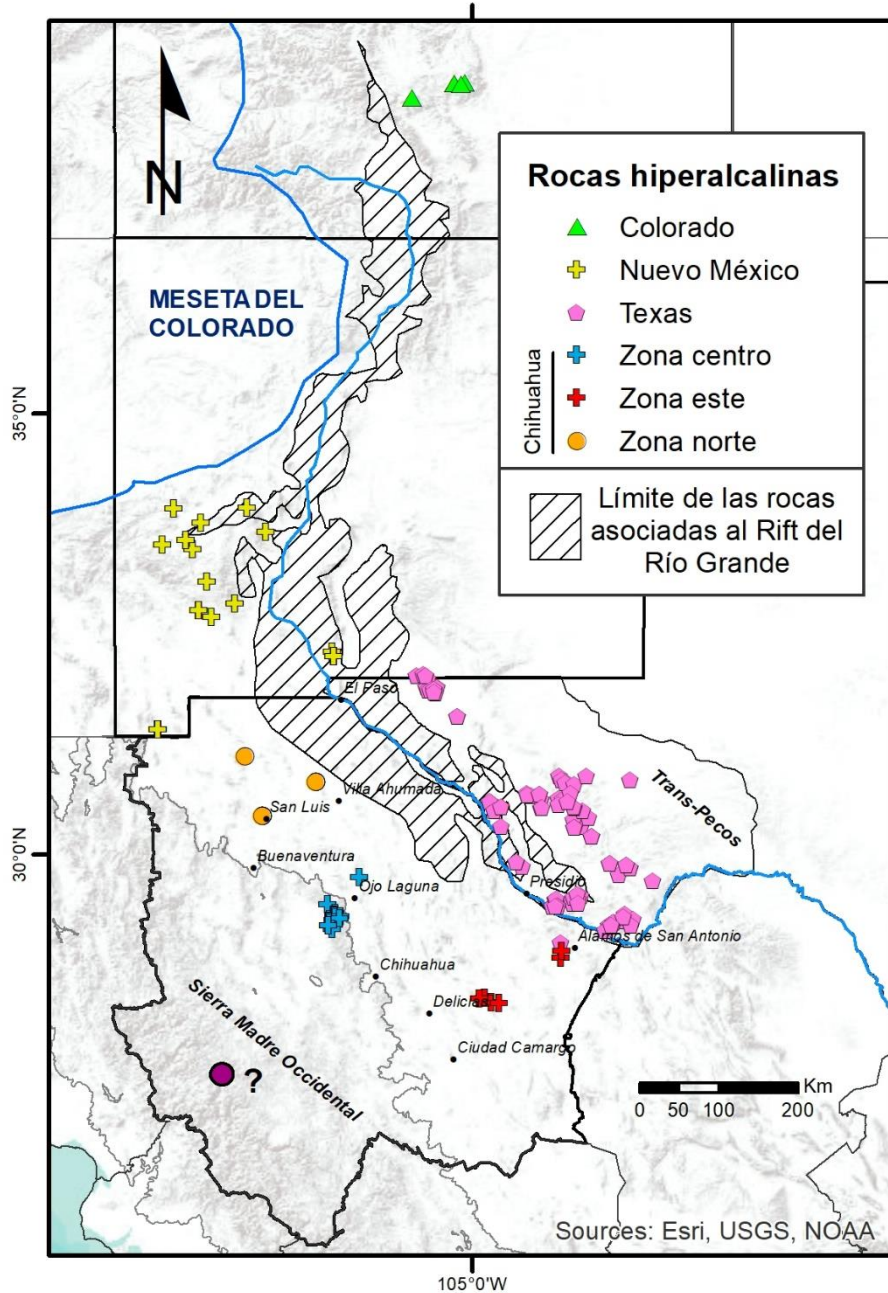


Figura 4.10. Mapa de distribución geográfica de rocas hiperalcalinas identificadas en el RRG, en los estados de Texas, Nuevo México y Colorado; y en el centro-norte del estado de Chihuahua, separados por las zonas Norte, centro y Este (establecidas en este estudio). En la SMO se muestra una roca hiperalcalina que se descartó para la agrupación de las zonas. Límite de la meseta del Colorado en color azul obtenido de [Liu et al. \(2019, p. 17, Fig. 2\)](#). Límite del RRG, que muestra la presencia de rocas asociadas, propuesta en [Villarreal-Fuentes et al. \(2016\)](#). Límite de la provincia fisiográfica de la Sierra Madre Occidental obtenido de [INEGI \(2001\)](#). Límite del Trans-Pecos obtenido de [Cook T. \(2015\)](#).

V. DISCUSIÓN.

Las obsidias clasificadas como riolita hiperalcalina.

En el diagrama de Pearce (1996, [Figura 5.1](#)) el cual discrimina a las rocas entre riolitas alcalinas, riolitas y dacitas se clasifican las muestras de obsidias de la fuente FOGSWA ([Shackley, 2021](#)). El campo de riolitas alcalinas puede ser considerado como un análogo para la clasificación de las rocas hiperalcalinas (en este estudio), de acuerdo con sus altos contenidos en elementos traza de Zr, Nb e Y. Las muestras de las fuentes *Los Jagueyes*, *Lago Barreal* y *Antelope Wells*, esta última del estado de Nuevo México (las cuales se incluyen en esta discusión para tener un margen de referencia más amplio), pueden distinguirse de las riolitas “convencionales” (aquellas que no son hiperalcalinas) de acuerdo con este diagrama ([Figura 5.1](#)).

Las muestras Sierra Fresnal (este) y Sierra Fresnal (oeste) de la fuente *Sierra Fresnal* ([Figura 5.1](#)) del estado de Chihuahua, son las únicas muestras de la base de datos FOGSWA ([Shackley, 2021](#)) que cuentan con elementos mayores, lo que permite que sean clasificadas como riolitas, de acuerdo con el diagrama TAS ([Figura 4.1B](#)), y de acuerdo al índice de [Shand \(1927\)](#), proporciones molares del grado de saturación en alúmina bajo la relación $Al/[Na+K+Ca]$, y al índice de hiperalcalinidad (basado en el cociente $Al/[Na+K]$), como rocas hiperalcalinas

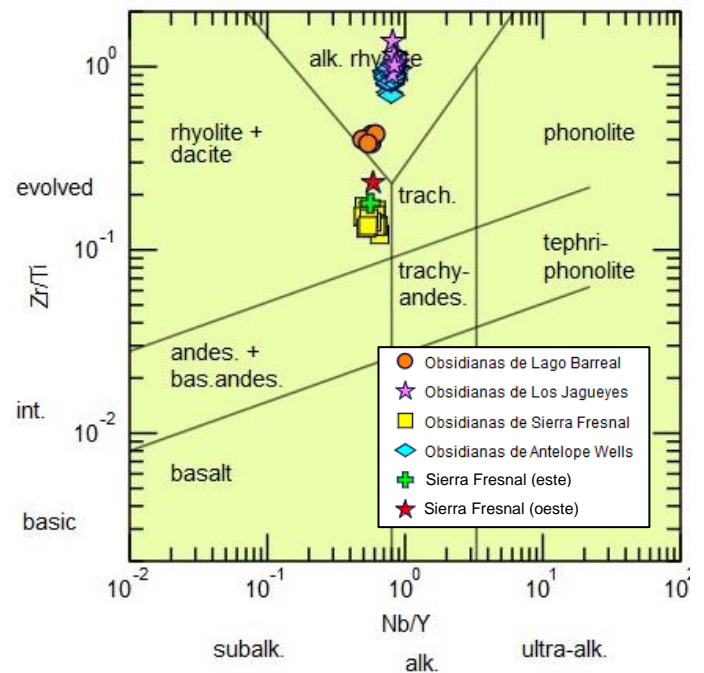


Figura 5.1. Diagrama de Pearce (1996), que muestra la relación de los elementos traza inmóviles Zr, Ti, Nb e Y, por fuentes de obsidiana del sitio web FOGSWA ([Shackley, 2021](#)).

(Figura 4.3A). Sin embargo, estas muestras en correspondencia con los diagramas de Pearce (1996) y de Winchester y Floyd (1977), no serían consideradas como riolitas alcalinas o rocas hiperalcalinas, lo que podría significar varias hipótesis. Una **primera hipótesis**, puede explicarse debido a que al clasificar a las rocas hiperalcalinas únicamente por un método basado en los elementos mayores (por ejemplo, diagrama de Maniar y Picolli (1989); Figura 4.3A) podría ser influenciado por una movilidad de los elementos debido a una alteración en las muestras, o

inclusive por un muestreo no representativo de las características primarias del magma, lo cual sería difícil de conocer a partir de los datos recolectados en fuentes de acceso abierto. Para el caso de las muestras vítreas bajo el aspecto y las características físicas de la obsidiana (vidrio no alterado “fresco”), esta hipótesis puede ser descartada. Una **segunda hipótesis**, es que los magmas hiperalcalinos que formaron a las muestras de la Sierra Fresnal podrían no contener valores elevados en los cocientes Zr/Ti y Nb/Y.

Tomando en cuenta, a la clasificación de Winchester y Floyd (1977), la cual distingue entre riolitas “convencionales” e hiperalcalinas (campo comendita/pantelerita; Figura 5.2), se reafirma la alcalinidad de las obsidias de Los Jagueyes (Chihuahua) y Antelope Wells (Nuevo México), pero no a la de las obsidias de Lago Barreal, anteriormente clasificadas como riolitas alcalinas por el diagrama de Pearce (1996, Figura 5.1). Estas últimas ocurren en el campo de riolitas “convencionales” en el diagrama de Winchester y Floyd (1977) (Figura 5.2), por lo que, al no contar con los contenidos de elementos mayores en estas obsidias, podrían no ser clasificadas como hiperalcalinas, no obstante, esto podría solo deberse a un rasgo petrogénico particular en los magmas hiperalcalinos que

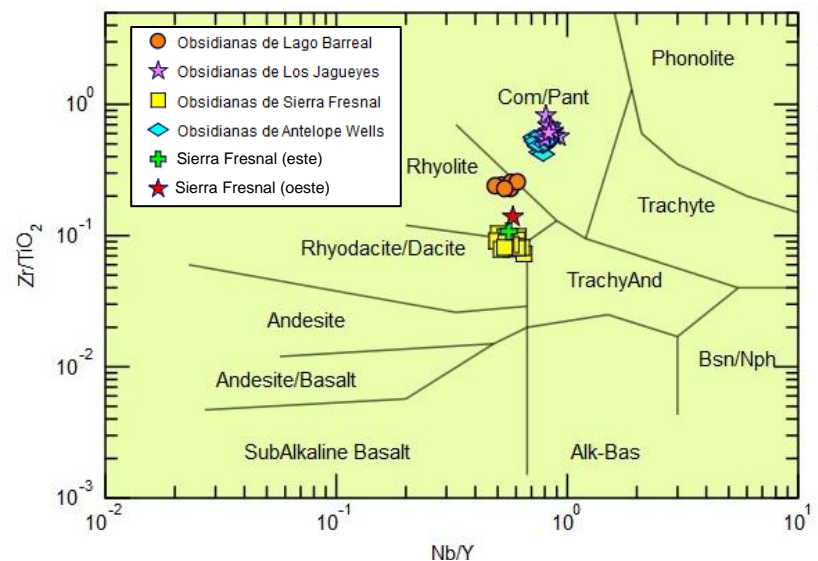


Figura 5.2. Diagrama de Winchester y Floyd (1977) que muestra la relación de Zr/Ti vs Nb/Y, donde se grafican las fuentes de obsidiana del sitio FOGSWA (Shackley, 2021).

formaron a la obsidiana en Chihuahua, ya que es evidente que en las obsidianas hiperalcalinas de la *Sierra Fresnal* (determinadas bajo las proporciones molares de álcalis y alúmina), existe un comportamiento atípico de sus contenidos en elementos traza, lo que las clasifica como una riolita y una dacita “convencionales” (aquellas que no son hiperalcalinas) de acuerdo con este diagrama ([Figura 5.2](#)).

Las proporciones de los elementos traza en las obsidianas *hiperalcalinas atípicas de la Sierra Fresnal*, comparadas con todas las rocas clasificadas como hiperalcalinas en este estudio ([Maniar y Picolli, 1989; Figura 4.3A](#)), para los estados de *Chihuahua, Colorado, Nuevo México y Texas* ([Figura 5.3](#)), muestran que poseen bajos contenidos de **Zr**, **Ti**, **Nb** e **Y**, que varían de 157 a 175 ppm, de 984 a 1429 ppm, de 31 a 41 ppm, y de 58 a 73 ppm respectivamente; mientras que los valores de esos elementos en las obsidianas hiperalcalinas típicas, como las de *Los Jagueyes* ([Figura 5.3](#)), son más altos y rondan en 1416 a 2006 ppm, 1348 a 1906 ppm, 119 a 170 ppm, y en 144 a 212 ppm respectivamente. Los procesos involucrados para generar los bajos contenidos atípicos de esos elementos en magmas agpaíticos, reconocidos aquí en las obsidianas hiperalcalinas peculiares de la *Sierra Fresnal* de Chihuahua, podrían ser mejor explicados por medio de un estudio petrogenético en la fuente geológica de las mismas.

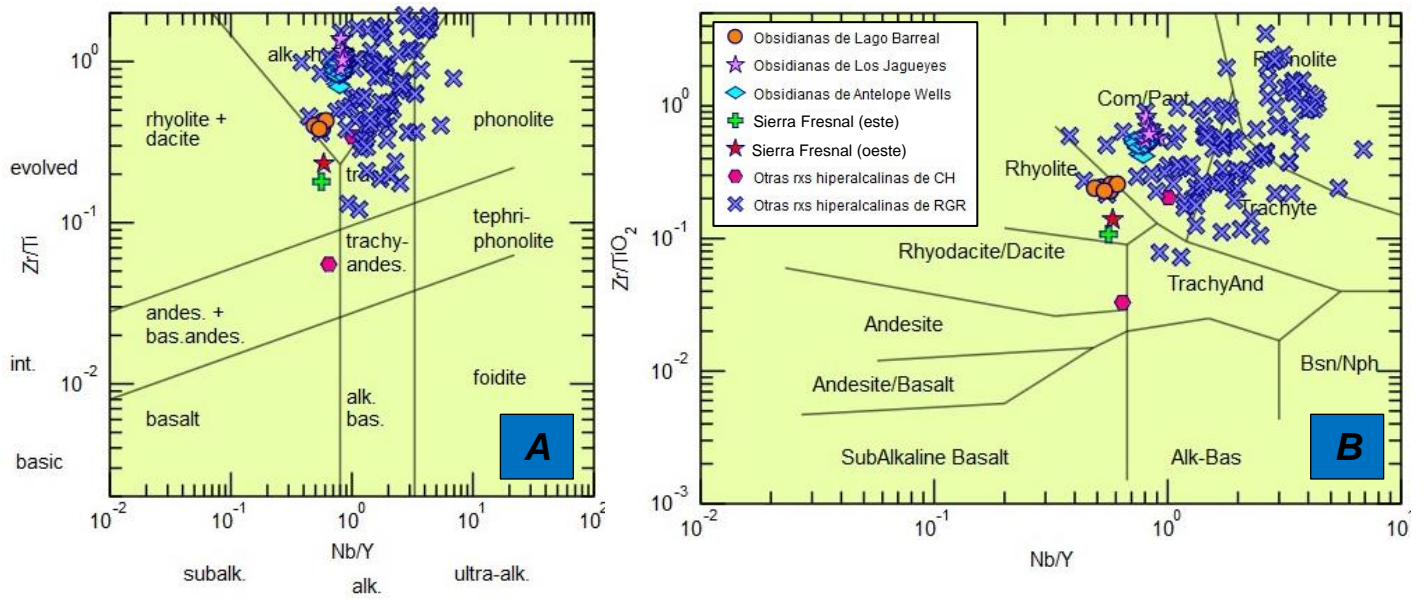


Figura 5.3. Clasificación por elementos traza para las obsidias de la fuente FOGSWA (Shackley, 2021), y rocas hipercalinas en general (según el índice de hipercalinidad de Maniar y Picolli (1989)) de la base de datos generada en el Río Grande Rift para todos los estados incluyendo Chihuahua. **A)** Diagrama de Pearce (1996), **B)** Diagrama de Winchester y Floyd (1977). Nótese la atípica ubicación de las muestras de la Sierra Fresnal.

Correlación geoquímica de las rocas hiperalcalinas de Chihuahua con las del Rift del Río Grande.

En el diagrama TAS, de la **Figura 5.4**, se muestra la clasificación de las rocas hiperalcalinas del RRG y del estado de Chihuahua (clasificadas en este estudio). Las rocas del RRG en el estado de Texas y Colorado presentan variedades subsaturadas en SiO_2 , en el campo de las fonolitas, y saturadas en SiO_2 , en los campos de traquitas y riolitas. Mientras que, las muestras asociadas a los estados de Nuevo México y Chihuahua se presentan únicamente en las variedades saturadas en SiO_2 , en los campos de traquitas y riolitas. En las rocas de Chihuahua destacan dos grupos de riolitas hiperalcalinas, unas bajas en SiO_2 que van de 68 a 72 % en peso y otras altas en SiO_2 con valores de 75 a 79% en peso (más asociadas a las típicas riolitas hiperalcalinas).

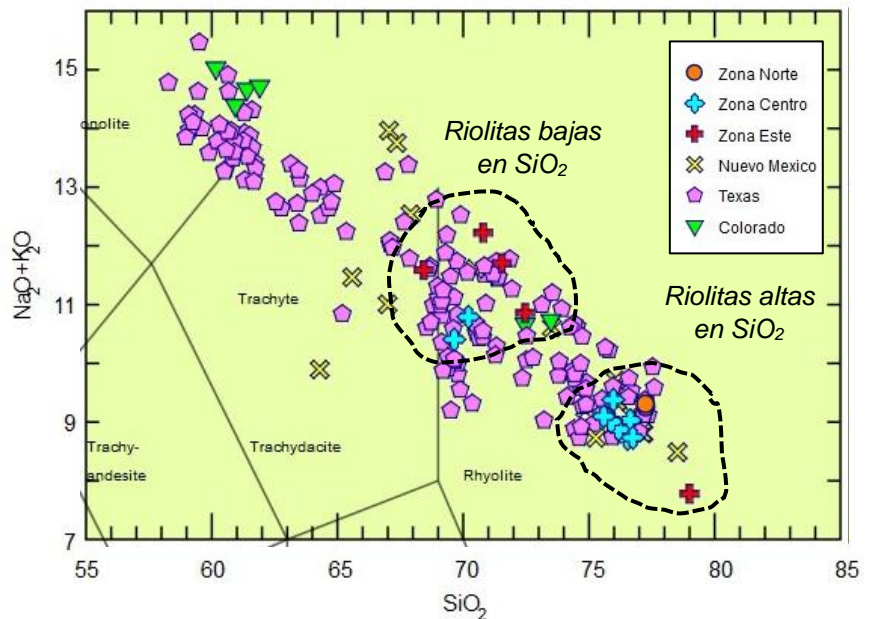
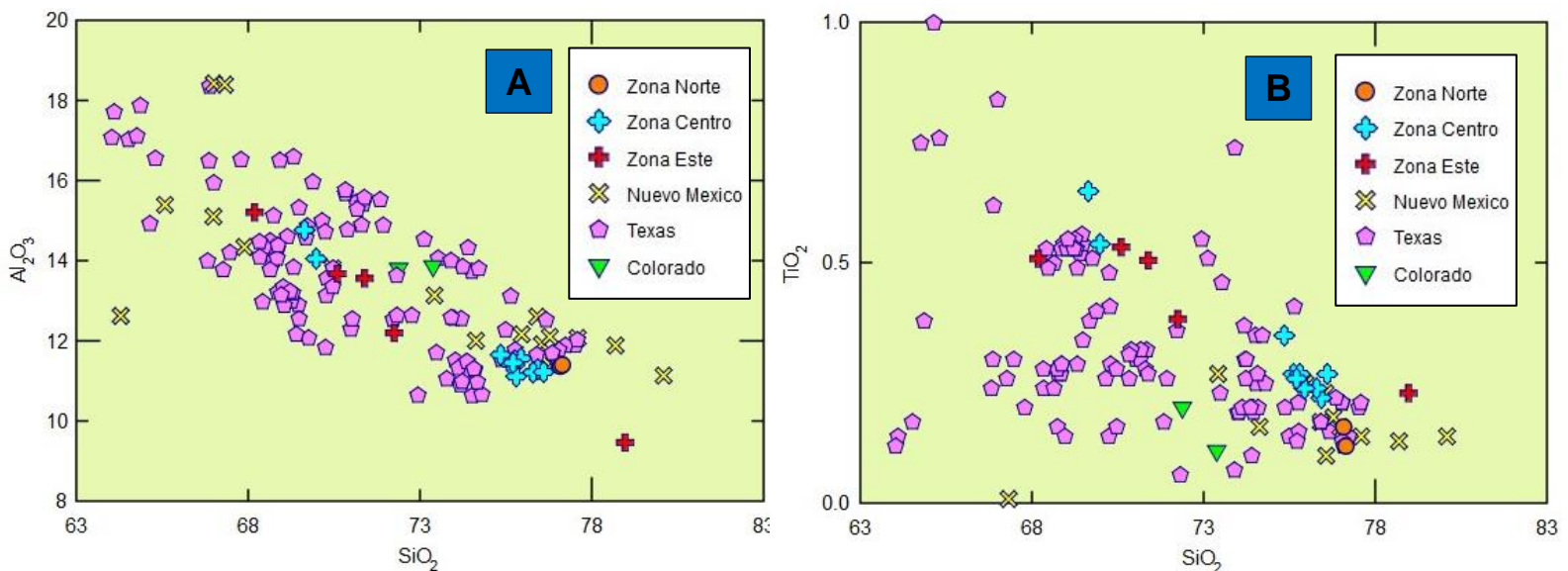


Figura 5.4. Clasificación química de rocas volcánicas hiperalcalinas de los estados de Texas, Nuevo México, Colorado y Chihuahua en el diagrama TAS (Total Alkalies vs Silica) de **Le Bas et al., 1986**, de acuerdo

Las rocas hiperalcalinas del estado de Chihuahua presentan variaciones similares a las rocas hiperalcalinas asociadas al Rift del Río Grande en cuanto a los contenidos en los elementos mayores Al, Ti, Fe, Mn, Na, K, Ca y Si (**Figura 5.5**). En relación con las riolitas hiperalcalinas de Chihuahua, se distinguen dos conjuntos en la mayoría de los diagramas, el conjunto de las riolitas altas en SiO_2 , que pertenecen a la zona centro, presenta menores contenidos en los principales elementos mayores, mientras que el conjunto de las riolitas bajas en SiO_2 , de la zona este, presenta un mayor contenido en esos elementos.

Una marcada tendencia de disminución en Al_2O_3 , Na_2O y FeO^t conforme al aumento del sílice es evidente para las muestras de todos los estados. El TiO_2 y el K_2O presentan una tendencia de disminución más marcada en las rocas de Chihuahua, en comparación con las rocas de Texas, las cuales muestran un comportamiento mayormente disperso. Las muestras del estado de Chihuahua presentan bajos contenidos en CaO , en comparación con las muestras de Texas. Las rocas de Chihuahua y del RRG presentan menores contenidos en MnO para las riolitas altas en SiO_2 . Se observa una afinidad para las riolitas altas en SiO_2 , de Chihuahua con las de Colorado y Nuevo México (particularmente con estas últimas), en todos los diagramas de variación (Figura 5.5).

Parece haber una *analogía* para las rocas en los contenidos de FeO^t y K_2O , ya que en el diagrama de FeO^t vs SiO_2 (Figura 5.5C), las rocas de Texas presentan valores más altos en comparación con las de los otros estados, siendo esto inverso para el K_2O (Figura 5.5D).



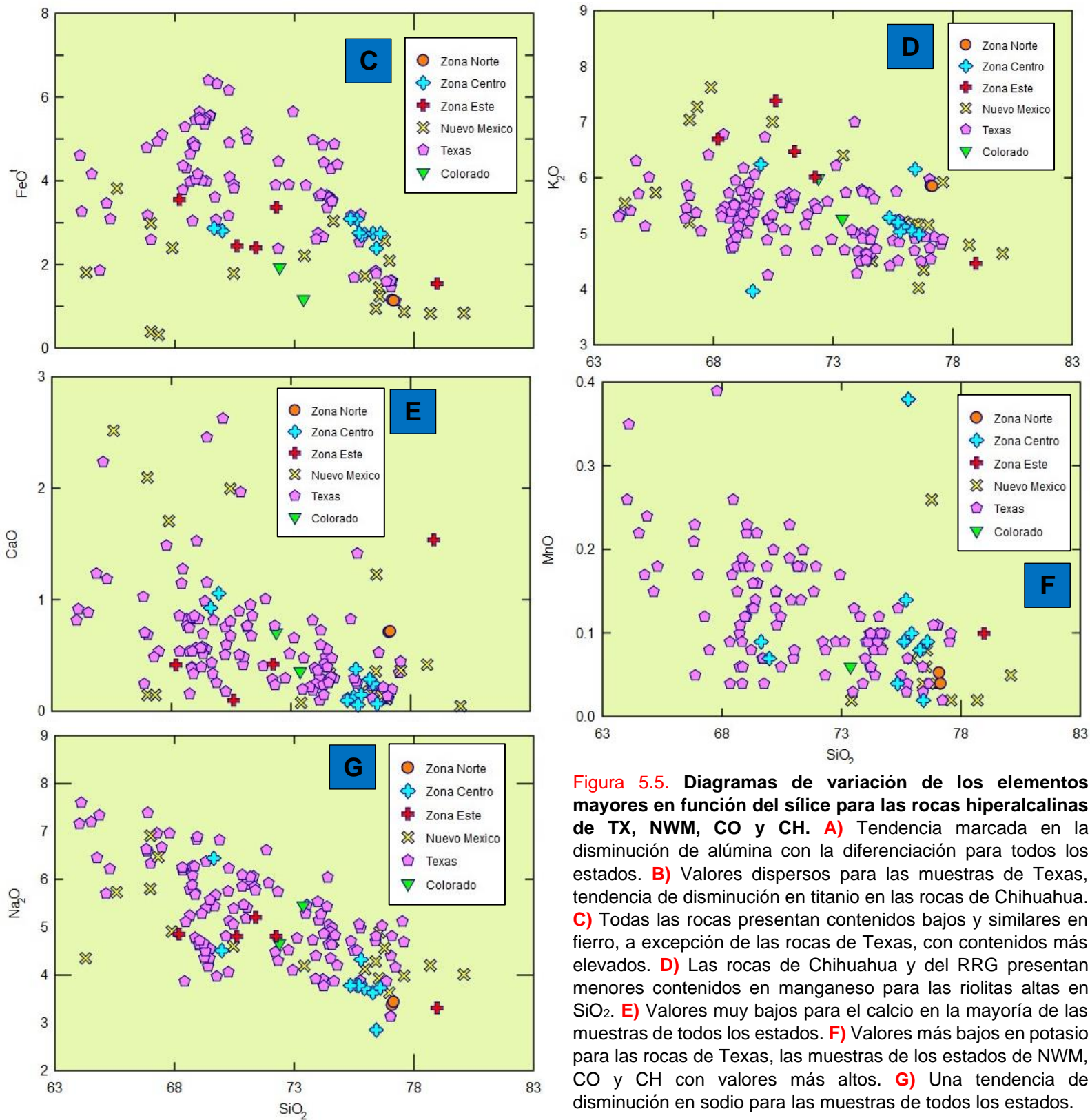


Figura 5.5. Diagramas de variación de los elementos mayores en función del sílice para las rocas hiperalcalinas de TX, NWM, CO y CH. **A)** Tendencia marcada en la disminución de alúmina con la diferenciación para todos los estados. **B)** Valores dispersos para las muestras de Texas, tendencia de disminución en titanio en las rocas de Chihuahua. **C)** Todas las rocas presentan contenidos bajos y similares en hierro, a excepción de las rocas de Texas, con contenidos más elevados. **D)** Las rocas de Chihuahua y del RRG presentan menores contenidos en manganeso para las riolitas altas en SiO_2 . **E)** Valores muy bajos para el calcio en la mayoría de las muestras de todos los estados. **F)** Valores más bajos en potasio para las rocas de Texas, las muestras de los estados de NWM, CO y CH con valores más altos. **G)** Una tendencia de disminución en sodio para las muestras de todos los estados.

De acuerdo con el diagrama propuesto por McDonald (1974) para la clasificación de las rocas hiperalcalinas (Figura 5.6), el RRG muestra una amplia variedad que incluye a riolitas tipo comenditas y panteleritas, así como a traquitas comendíticas. Las rocas hiperalcalinas del estado de Chihuahua son exclusivamente riolitas de tipo comenditas, con contenidos en Al_2O_3 , en un rango de 11 a 15 % en peso. La traquita del Estado de Chihuahua que se agrupa en el campo de las comenditas, así como algunas de las del RRG (Figura 5.6), corresponden a las rocas con contenidos menores al 15% en peso de Al_2O_3 , que se encuentran en el límite con las riolitas bajas en SiO_2 (Figura 5.4).

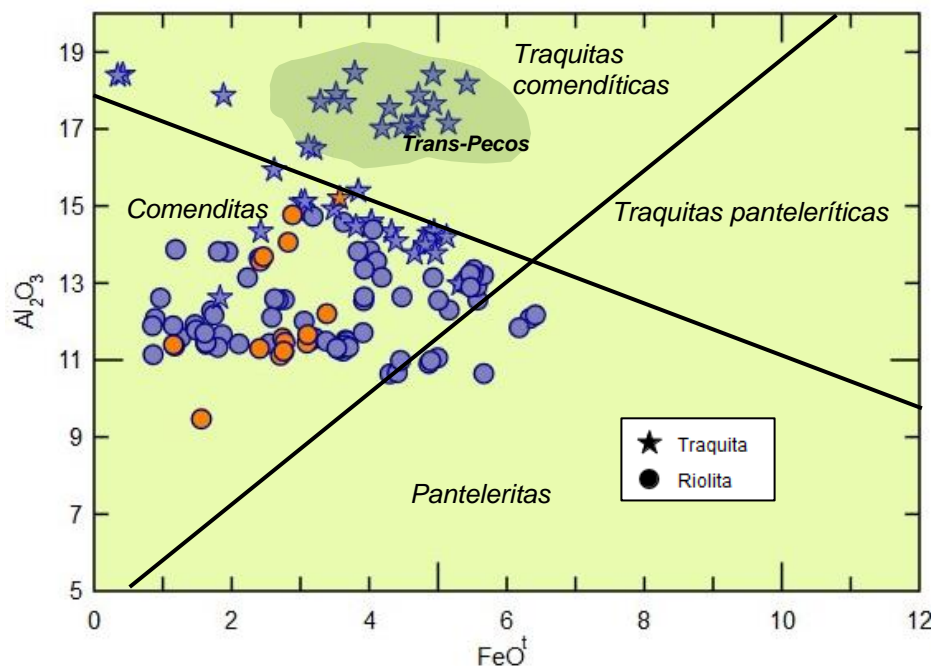


Figura 5.6. Diagrama de clasificación para las rocas hiperalcalinas que contempla los contenidos de Al_2O_3 y FeO^t de McDonald, 1974). Se muestra la clasificación para las rocas hiperalcalinas del estado de Chihuahua (en color naranja) y del RRG (en color azul).

De acuerdo con el diagrama de la Figura 5.7, las riolitas hiperalcalinas del estado de Chihuahua, presentan un grado similar de hiperalcalinidad (en base al contenido en acmita normativa) con las riolitas de los estados de Texas y Nuevo México, donde es posible distinguir que las riolitas con alto contenido en acmita son las atribuidas a la zona este del estado de Chihuahua (que se localizan entre las localidades de Ciudad Delicias y Álamos de San Antonio; Figura 4.11D), y a las rocas del estado de Texas. Por otro lado, las riolitas de Chihuahua con bajo contenido en acmita corresponden a la zona centro (cercanas a Ojo Laguna y Los Sauces; Figura 4.10B), y se agrupan junto a las rocas de Nuevo México (Figura 5.7).

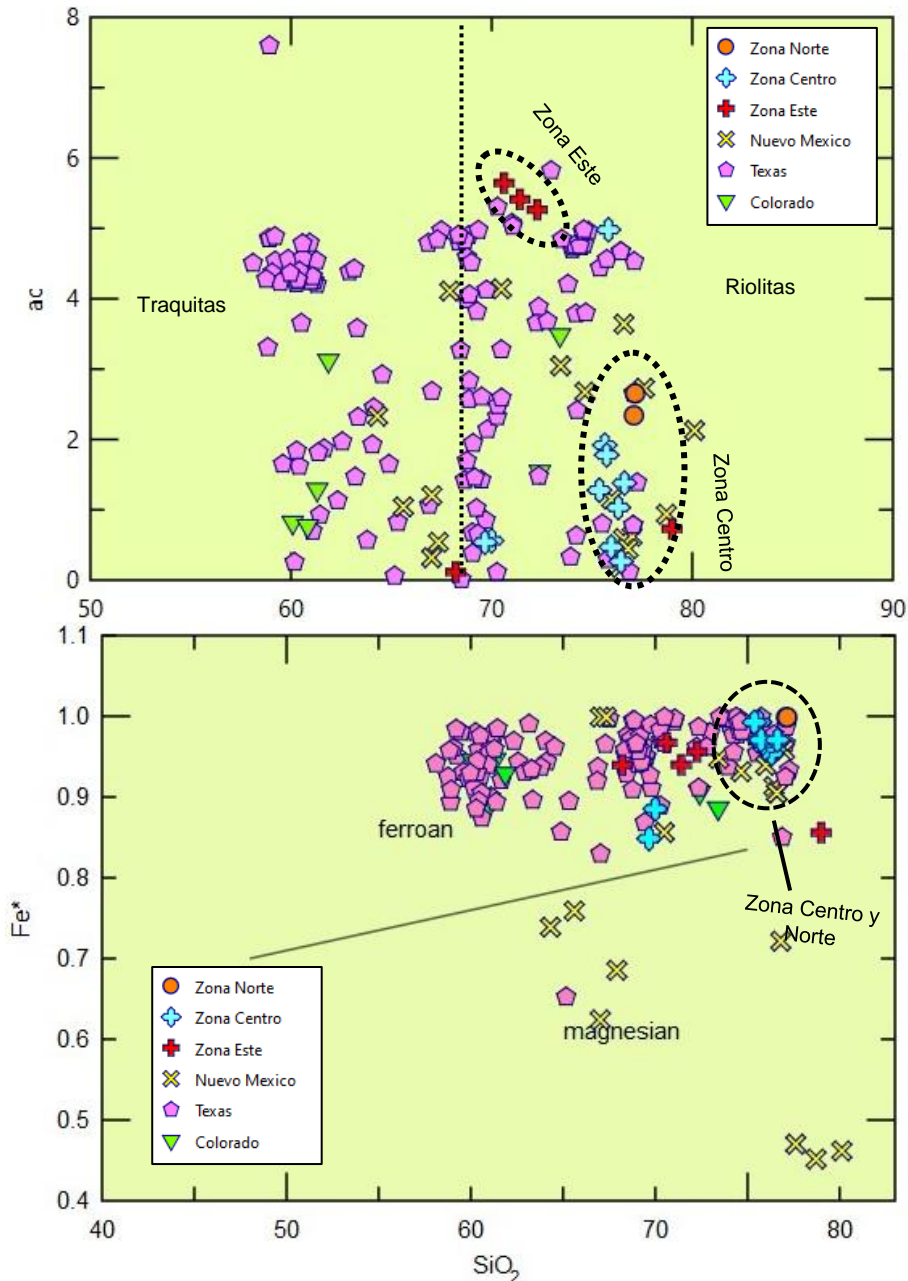


Figura 5.7. Diagrama de ac vs SiO₂, indica el grado de hiperalcalinidad, de acuerdo con sus valores en ac y el contenido en SiO₂. En él se muestran las rocas hiperalcalinas de acuerdo con los estados, y la división por zonas del estado de Chihuahua que se menciona anteriormente en la Figura 4.3A.

Figura 5.8 Diagrama de FeO/(FeO + MgO) frente a SiO₂. Límite ferroan-magnésiano de Frost *et al.* (2001). Las rocas hiperalcalinas estudiadas de los estados de Colorado, Nuevo México, Texas y la distribución por Zonas del estado de Chihuahua anteriormente mencionada (Figura 4.7).

De acuerdo con el diagrama de Frost *et al.* (2001; Figura 5.8) las rocas hiperalcalinas de la zona centro y norte se agrupan en el campo con enriquecimiento en hierro, al igual que algunas de las rocas de Texas y Nuevo México. Finalmente, dadas estas observaciones comparativas se puede concluir que las rocas del RRG son ligeramente más enriquecidas en Fe, y, por ende, presentan contenidos más elevados en acmita (normativa), pero muy similares a las del estado de Chihuahua, particularmente a la zona este, cercana al estado de Texas.

Características petrológicas y significado geodinámico del magmatismo hiperalcalino Eoceno tardío-Oligoceno en Chihuahua.

Las rocas hiperalcalinas de Chihuahua y del RRG están asociadas a un contexto de rift intraplaca, de acuerdo con el diagrama de [Pearce et al. \(1984; Figura 5.10A\)](#), ya que presentan un enriquecimiento en Y y Nb y valores altos de Rb. Por un lado, las rocas del estado de Texas y Colorado son las únicas en donde se presentan dos tendencias en la serie alcalina ([Figura 5.10B](#)), una saturada en sílice, y otra subsaturada. Además, el comportamiento de todas las rocas hiperalcalinas en conjunto, muestran una tendencia predominantemente alcalina por debajo al 75% en peso de SiO₂, que varía a la alcalina cálcica por arriba de ese porcentaje ([Figura 5.10B](#)).

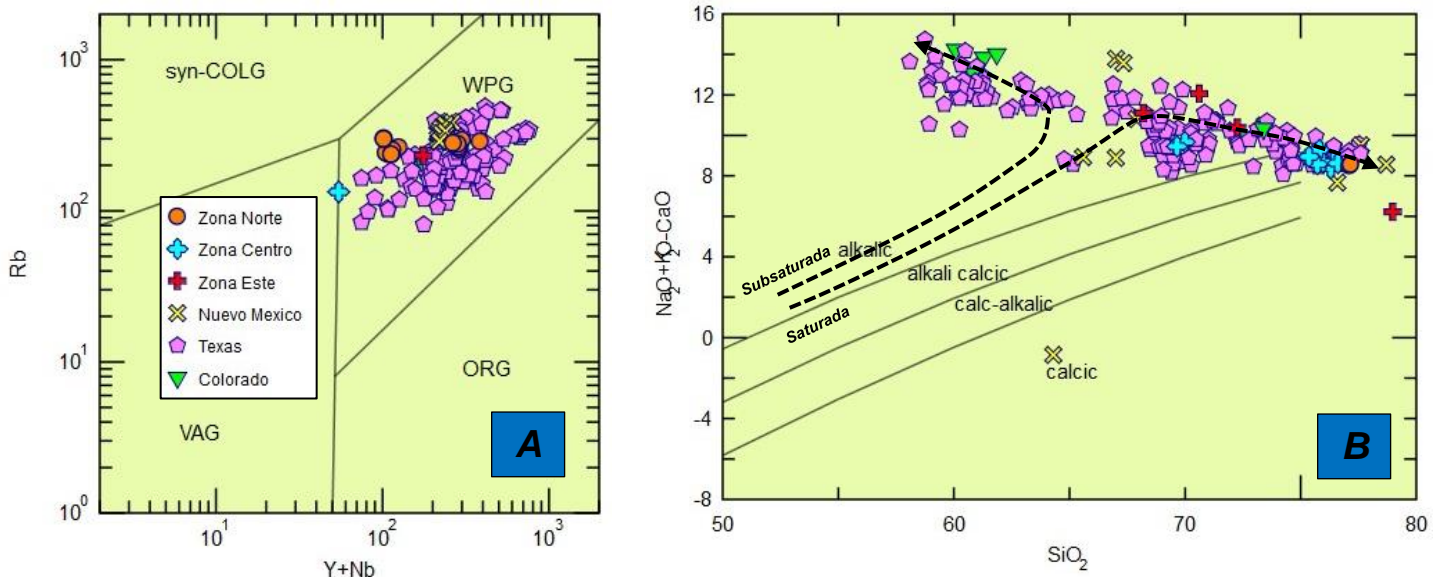


Figura 5.10. Diagramas de discriminación tectonomagmática para las rocas hiperalcalinas de Chihuahua y el RRG **A)** Rb frente a (Y + Nb). **WPG:** granitoides dentro de la placa; **VAG:** granitoides de arco volcánico; **ORG:** granitoides de dorsales oceánicas; **syn-COLG:** granitoides sincolisionales. Según [Pearce et al. 1984](#); modificado por [Christiansen y Keith, 1996](#)). **B)** índice Alcalino-calcico modificado según [Frost et al. \(2001\)](#).

De acuerdo con el diagrama de Frost *et al.* (2001, Figura 5.11), es posible distinguir en aquellas rocas félsicas de Chihuahua, que **no** son hiperalcalinas, dos tendencias de alcalinidad de acuerdo con el grado de diferenciación magmática, que comienza a partir del 65% en peso de SiO₂. Las rocas hiperalcalinas de CH y del RRG destacan por sus valores en Na₂O+K₂O+CaO mayores al 7%, lo que permite establecer una posible relación genética entre los magmas hiperalcalinos del RRG con los del estado de CH.

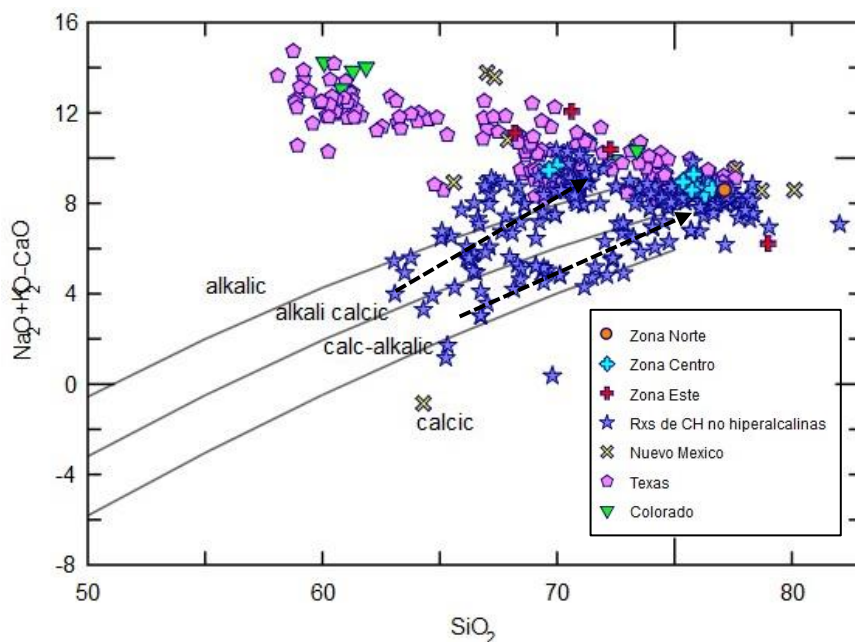


Figura 5.11. Diagrama de discriminación tectono-magmática del índice Alcalino-calcáreo modificado según Frost *et al.* (2001), para las rocas de Chihuahua y las rocas hiperalcalinas reportadas en este estudio de CH y el RRG.

El magmatismo de composición félsica de tipo hiperalcalino identificado en la zona centro-norte de Chihuahua, entre las provincias magmáticas de la Sierra Madre Occidental y del Rift del Río Grande, podría estar relacionado al de la zona sur del RRG (en el campo volcánico del Trans-Pecos). Parker y Henderson (2021), reportan que el magmatismo del RRG, en gran parte silíceo, comenzó a los 37Ma en la región de las montañas Davis y continuó hasta aproximadamente los 30Ma en la frontera con México, mientras que el magmatismo de la fase tardía del RRG comenzó a partir de los 30Ma y terminó a los 17 Ma, dominado por la erupción de basaltos que ocurrieron simultáneamente con las fallas del *Basin y Range* (Henry y McDowell, 1986, como se citó en Parker y Henderson, 2021).

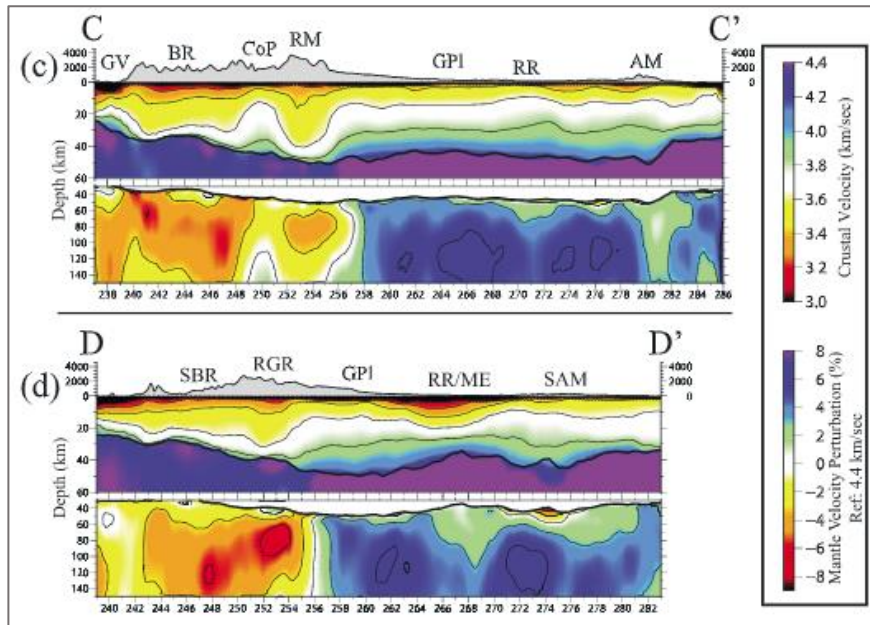
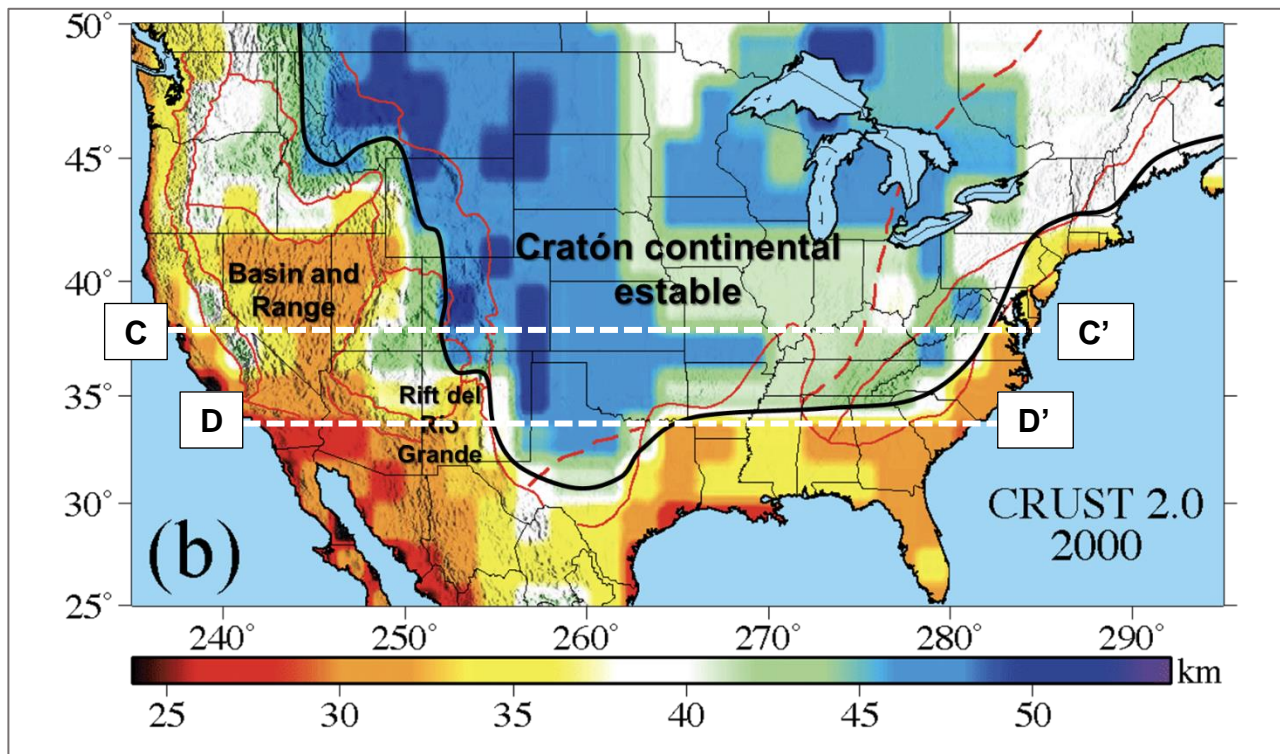


Figura 5.10. Imagen modificada de Shen y Ritzwoller (2016; pp.4065-4796) que muestra el límite del cratón continental estable, así como la ubicación con respecto al cratón de las zonas extensionales de B&R y del RRG. Nótese que el RRG se localiza en el borde. También se presentan dos secciones que cortan de Oeste a Este, y que se utiliza en este estudio únicamente para mostrar el espesor de la corteza. Abreviaturas: **AM**: Appalachian Mountains, **BR**: Basin and Range, **SBR**: Southern Basin and Range, **CoP**: Colorado Plateau, **GPI**: Great Plains, **RGR**: Río Grande Rift, **RM**: Rocky Mountains, **RR**: Reelfoot Rift, **GV**: Great Valle, **ME**: Mississippi Embayment, **SAM**: Southern Appalachian Mountains.

La mayoría de las rocas hiperalcalinas del estado de Chihuahua, no cuentan con edades precisas. Algunas de ellas son de 30 a 29 Ma, y otras fueron asignadas por estratigrafía a edades relativas del Eoceno (56-33.9Ma), y del Oligoceno (33.9-23 Ma); sin embargo, las relaciones estratigráficas concuerdan con aquellas rocas del RRG identificadas como hiperalcalinas (en este estudio), particularmente con las del estado de Nuevo México, puesto que se localizan bajo un mismo *trend* geográfico y temporal, en un rango de 33 a 26 (?) Ma (Figura 5.9).

Considerando las tendencias de disminución en los contenidos de elementos mayores con forme aumenta la diferenciación, la disminución del índice de hiperalcalinidad (contenido de ac vs SiO₂), la evolución de las rocas en el diagrama de Frost *et al.* (2001; Figura 5.11), y a la posible migración del magmatismo de Este a Oeste (Barker, 1977), de acuerdo con la distribución de las rocas hiperalcalinas y sus edades (Figura 5.9), es posible proponer que conforme el magmatismo migra hacia el Oeste, aumenta el contenido en SiO₂, disminuye el contenido en álcalis, y por ende el grado de hiperalcalinidad. Esta relación coincide con el grosor y el tipo de corteza continental, considerando una corteza más antigua y gruesa al Este y una más delgada y joven al Oeste (por ejemplo, Ricketts *et al.*, 2021; Shen y Ritzwoller, 2016; Figura 5.10). Esta configuración cortical pudiera repercutir en los procesos petrogenéticos que dan origen al volcanismo hiperalcalino en Chihuahua, más evidente en el oriente del Estado, y más atípico, y menos pronunciado al occidente (e.g. obsidianas de la Sierra el Fresnal).

Si bien, el magmatismo hiperalcalino se manifiesta de forma puntual en algunas zonas en el centro-norte de Chihuahua, presenta una distribución muy similar (línea discontinua de color rojo, Figura 5.9) a la provincia magmática RRG y a la orientación asociada a los sedimentos del actual Rift del Río Grande (Figura 5.11), por lo cual, sería interesante realizar un trabajo de campo en las zonas donde no existe la presencia documentada de rocas hiperalcalinas y establecer mejor esa tendencia espacial en Chihuahua (Figura 5.11).

Es importante destacar que las rocas hiperalcalinas del oeste de Nuevo México y el centro-norte de Chihuahua se localizan en la zona de transición propuesta en [Ricketts et al. \(2021, Figura 5.9\)](#), que se produjo durante el Eoceno tardío, la cual separa a las zonas extensionales del B&R y del RRG.

Las rocas hiperalcalinas de la zona norte y centro, en el norte de Chihuahua ([Figura 4.10](#)) pueden ser la evidencia del magmatismo de RRG, asociadas al estado de Nuevo México, esto de acuerdo con las relaciones geoquímicas presentes en este estudio, como el grado de hiperalcalinidad, los contenidos en Y, Rb y Nb. Además de compartir una distribución temporal similar, de acuerdo con la [Figura 5.9](#), y una distribución espacial simétrica con la forma actual de los sedimentos asociados al RRG, aunque las estructuras en el estado de Chihuahua no son visibles, puede establecerse una correlación.

Toda la falla del RRG se formó bajo una extensión regional E-O, en la zona sur del rift probablemente se reactivaron estructuras subyacentes (fallas) más antiguas en el Terciario que produjeron la curvatura del oeste de Texas y el norte de México (véase [Rodríguez-Gonzales, 2019](#)). Como se menciona en [Seager y Morgan, \(1979\)](#), en la provincia del *Basin and Range* puede haber varios sistemas de rift discretos, similares al Rift del Río Grande. Por lo que posiblemente la presencia del magmatismo hiperalcalino en el norte de Chihuahua, pueda estar relacionada a estos rifts discretos durante el Eoceno tardío-Oligoceno ([Figura 5.11](#)).

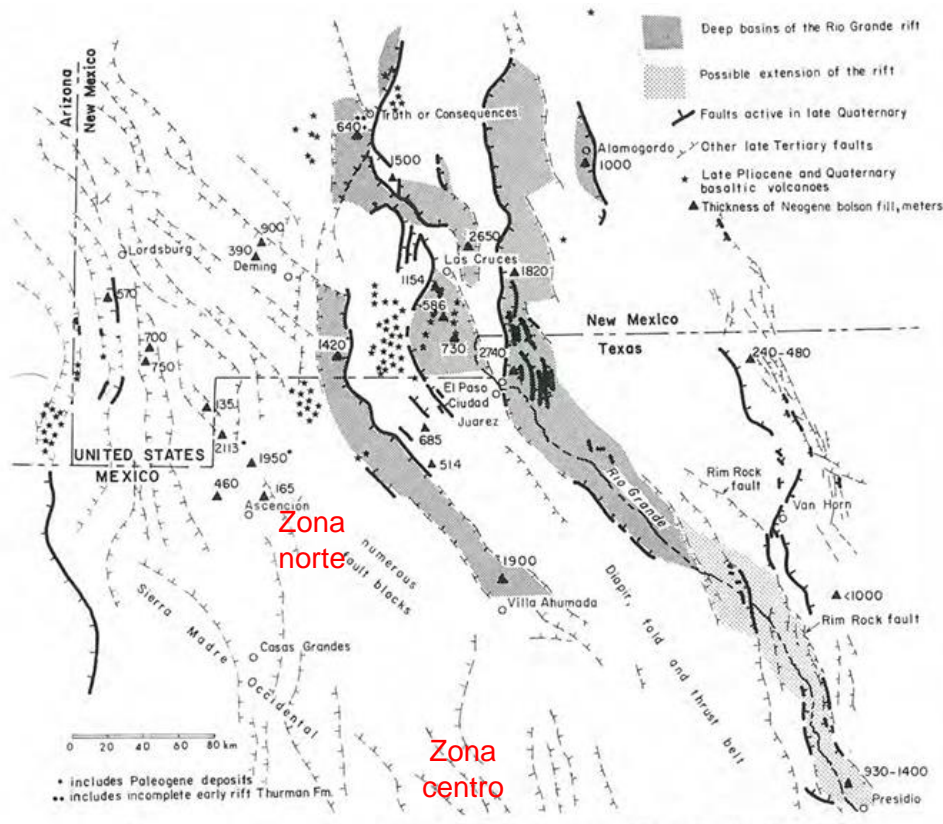


Figura 5.11. Mapa tectónico modificado de Seager y Morgan (1979, p.90, fig.3). Muestra las Zonas Norte y Centro con presencia de rocas hiperalcalinas en el estado de Chihuahua (establecidas en este estudio), y las fallas del Terciario.

VI. CONCLUSIONES.

Esta investigación permitió identificar la ocurrencia del registro magmático de tipo hiperalcalino en el estado de Chihuahua, mediante el análisis de 41 muestras distribuidas en el centro-norte de Chihuahua. Evidencias geoquímicas de estas muestras permiten sentar las bases para la continuidad de la Provincia Magmática del Rift del Río Grande al menos en el norte de México.

Se establecieron **tres zonas** con riolitas hiperalcalinas en el estado de Chihuahua, 1) **Zona Norte**, que se localiza al norte del municipio de Buenaventura, cerca de la localidad de San Luis, 2) **Zona Centro**, en los alrededores de la localidad de Estación Ojo Laguna, y 3) **Zona Este**, entre las localidades de Ciudad Delicias y Álamos de San Antonio.

Si bien los datos de las muestras de obsidiana recolectados para este estudio son en su mayoría de rocas anorogénicas, el hecho de no contar con los elementos mayores limita la posibilidad de discutir sobre la proporción de los álcalis sobre alúmina, o la formación de acmita normativa. Esto nos restringe únicamente a contar con sus características de enriquecimiento en elementos traza como el caso del Zr, que puede variar fuertemente desde 590 hasta 2000ppm. Este cambio puede ser más susceptible en los procesos petrogenéticos involucrados en la evolución magmática, indicando otro tipo de particularidades.

Las rocas hiperalcalinas de Chihuahua y del RRG se relacionan geoquímicamente, presentan tendencias similares en los elementos mayores, en el grado de hiperalcalinidad y en los contenidos de acmita normativa. Se distinguen dos regiones de acuerdo con la edad en el RRG, en la que destaca una edad más joven de 33-26(?) Ma en el oeste de Nuevo México y Chihuahua, y una edad más antigua de 38-32 Ma en el Este de Nuevo México, Chihuahua y el Oeste de Texas (en la Provincia Magmática del Trans-Pecos). Lo que podría indicar una migración del

magmatismo de Este-Oeste, o zonas de fisura colaterales que se desarrollaron en el centro-norte de Chihuahua durante el Eoceno tardío-Oligoceno.

VII. BIBLIOGRAFÍA.

Aranda-Gómez, José Jorge, Luhr, James F., Housh, Todd B., Valdez-Moreno, Gabriel, & Chávez-Cabello, Gabriel. (2005). El volcanismo tipo intraplaca del Cenozoico tardío en el centro y norte de México: una revisión. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 57(3), 187-225. <https://doi.org/10.18268/bsgm2005v57n3a1>

Arredondo-Contreras, Moreno-García, Vidal-Solano (2022). [Seminario] El Rift del Río Grande en México, posible fuente de REE (?). Proyecto LA ROCATECA y programa de Divulgación y Difusión Científica/Tecnológica y Humanística (DAVD).

Arredondo-Contreras, Vidal-Solano, Moreno-García, Paz-Moreno, Velderrain-Rojas (2022). [Ponencia] El Rift del Río Grande en México: geoquímica de las rocas félsicas anorogénicas de chihuahua correlacionadas con Texas, nuevo México y colorado. Congreso Nacional de Geoquímica XXXII-INAGEQ 2022.

Arredondo-Contreras, Vidal-Solano, Moreno-García, Robles-Robles (2022). [Póster] El Rift del Río Grande en México: rocas félsicas anorogénicas de chihuahua correlacionadas con Texas, nuevo México y colorado. Reunión Universitaria de Investigación en Materiales XXV-RUIM 2022.

Arredondo-Contreras, Vidal-Solano (2022). [Ponencia] El Rift del Río Grande en México: las rocas félsicas anorogénicas de chihuahua correlacionadas con Texas, nuevo México y colorado. Semana Cultural de Geología XLIII- 2022.

Arredondo Mendoza José Ángel, Guzmán Ibarra Iván. 2008: Carta geológico-minera y geoquímica Álamos de San Antonio H13-D54, escala 1:50,000, estado de Chihuahua [**Informe Técnico**].

Barker, Daniel S. (1977). Northern Trans-Pecos magmatic province: Introduction and comparison with the Kenya rift. *Boletín GSA*; 88 (10): 1421–1427. doi: [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1977\)88<1421:NTMPIA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1977)88<1421:NTMPIA>2.0.CO;2)

Black S., MacDonald, MR Kelly. (1997). Crustal Origin for Peralkaline Rhyolites from Kenya: Evidence from U-Series Disequilibria and Th-Isotopes, *Journal of Petrology*, volumen 38, número 2, febrero de 1997, páginas 277–297, <https://doi.org/10.1093/petroj/38.2.277>

Carr Michael J., Gazel Esteban. (2017). (Versión 2021) [Software] Igpeta para modelar procesos ígneos: ejemplos de aplicación utilizando la versión educativa abierta. *Miner Petrol* 111, 283–289. doi: <https://doi.org/10.1007/s00710-016-0473-z>

Cipar, Jacob H., Garber, Josué M., Kylander-Clark, Andrew RC., Smye, Andrés J. (2020). Active crustal differentiation beneath the Rio Grande Rift. *Nat. Geosci.* 13, 758–763. doi: <https://doi.org/10.1038/s41561-020-0640-z>

Douglas Walker J., Allen F. Glazner, G. Lang Farmer, Richard W. Carlson, Luca Ferrari, (2002). NAVDAT, The North American Volcanic and Intrusive Rock Database. (<https://www.navdat.org/>).

Dutch RA, MX Werner, CBE Krapf, T Rusak, (2013). Geology of the TIEYON 1:100 000 map sheet (5645). Geological Survey of South Australia, Resources and Energy Group, DMITRE.

ESRI. (2019). ArcGIS (versión 10.8) [software GIS]. <https://support.esri.com/en/products/desktop/arcgis-desktop/arcmap/10-5>

Ferrari, Luca., Valencia-Moreno, Martín., Bryan, Scott. (2005). Magmatismo y tectónica en la Sierra Madre Occidental y su relación con la evolución de la margen occidental de norteamérica. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 57(3), 343-378. doi: <https://doi.org/10.18268/bsgm2005v57n3a5>

Frost, B.R., Arculus, R.J., Barnes, C.G., Collins, W.J., Ellis, D.J., and Frost, C.D., (2001). A geochemical classification of granitic rocks: *Journal of Petrology*, v. 42, p. 2033–2048. doi: <https://doi.org/10.1093/petrology/42.11.2033>

GEOROC. Geochemistry of Rocks of the Oceans and Continents. Los datos se descargaron de la base de datos GEOROC, el 11 de noviembre de 2022. (<https://georoc.eu/>).

Geo Gps Perú. Placas Tectónicas en KMZ para Google Earth, recuperado el 14 de Enero del 2023 de <https://www.geogpsperu.com/2011/12/placas-tectonicas-en-kmz-para-google.html>

Gibson, Sally. A., Thompson, R. N., Leat, P. T., Dickin, A. P., Morrison, M. A., Hendry, G. L., Mitchell J. G. (1992) Asthenosphere-derived magmatism in the Rio Grande rift, western USA: implications for continental break-up. *Geological Society, London, Special Publications* 1992; v. 68; p. 61-89. doi: <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1992.068.01.05>

Gobierno de México, (2020). *Ver erige el estado de Chihuahua*. Gob.Mx. Recuperado el 3 de enero de 2023, de <https://www.gob.mx/siap/articulos/se-erige-el-estado-de-chihuahua>

Gobierno del Estado de Chihuahua, secretaria de desarrollo Rural, Dirección de desarrollo forestal (2013). Cartografía de uso de suelo y vegetación del Estado de Chihuahua Escala 1:50,000. Recuperado el 3 de enero de 2023, de <https://www.sciencebase.gov/catalog/item/57e02051e4b09082500212ae>

Graham D.M. Andrews, Cathy J. Busby, Sarah R. Brown, Christopher M. Fisher, Pablo Davila-Harris, Ariel Strickland, Jeffrey D. Vervoort, Holly D. Pettus, Fred W. McDowell, Bryan P. Murray, (2022). Petrogenesis of voluminous silicic magmas in the Sierra Madre Occidental large igneous province, Mexican Cordillera: Insights from zircon and Hf-O isotopes. *Geosphere*; 18 (3): 946–984. doi: <https://doi.org/10.1130/GES02430.1>

Hernández Velázquez Magdalena, Vázquez Balderas José Francisco, Loera Flores Abelaid. 2003: Carta geológico-minera La Coyota H13-D71, escala 1: 50 000, estado de Chihuahua [**Informe Técnico**].

Inan Ulusoy, H. Evren Çubukçu, Erkan Aydar, Philippe Labazuy, Orkun Ersoy, Erdal Şen, Alain Gourgaud, (2012). Volcanological evolution and caldera forming eruptions of Mt. Nemrut (Eastern Turkey), *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Volumes 245–246, Pages 21-39, ISSN 0377-0273 doi: <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2012.06.031>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), (2013). *Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM)*. Org.mx. Recuperado el 3 de enero del 2023, de <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), (2001). Conjunto de datos vectoriales Fisiográficos. Continuo Nacional serie I. Escala 1: 1 000 000. Provincias fisiográficas. Recuperado el 3 de enero del 2023, de <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267575>

Instructors, & (SpringerNature), L. (s/f). ¿Qué es el Acceso Abierto? Springer.com. Recuperado el 7 de diciembre de 2022, de [consulta](#)

Irvine, T.N. and Baragar, W.R.A. (1971) A Guide to the Chemical Classification of the Common Volcanic Rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8, 523-548. doi: <https://doi.org/10.1139/e71-055>

LE BAS, M. L., Le Maitre, R. W., Streckeisen, A., Zanettin, B., & IUGS Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks, (1986). A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *Journal of petrology*, 27(3), 745-750.

Lehnert, K., Su, Y., Langmuir, CH, Sarbas, B. y Nohl, U. (2000). Una estructura de base de datos geoquímica global para rocas.

Liu Yiduo A., Michael A. Murphy, Jolante van Wijk, Daniel J. Koning, Tyson Smith, Ross A. Andrea, (2019). Progressive opening of the northern Rio Grande rift based on fault structure and kinematics of the Tusas-Abiquiu segment in north-central New Mexico, U.S., *Tectonophysics*, Volume 753, Pages 15-35, ISSN 0040-1951 doi: <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2019.01.004>

MacDonald R., 1974a - Nomenclature and geochemistry of the peralkaline oversaturated extrusive rocks. In Bailey D.K., Barberi F., Macdonald R. (Eds.), Oversaturated peralkaline volcanic rocks. Bull. Volcanol., 38, 498-516.

Microsoft 365. (2021). Excel (versión 18.0). Windows. <https://www.microsoft.com/es-mx/microsoft-365/excel>

Moreno-García, Vidal-Solano, Arredondo-Contreras, Paz-Moreno, Velderrain-Rojas (2022). [Ponencia] El Rift del Río Grande en Chihuahua, México: Diferencias mineralógicas y geoquímicas con el volcanismo félsico de la Sierra Madre Occidental. Congreso Nacional de Geoquímica XXXII-INAGEQ 2022.

Moreno-García, Vidal-Solano, Arredondo-Contreras, Robles-Robles (2022). [Póster] El Rift del Río Grande en Chihuahua, México: Diferencias mineralógicas y geoquímicas con el volcanismo félsico de la Sierra Madre Occidental. Reunión Universitaria de Investigación en Materiales XXV-RUIM 2022.

Moreno García, Vidal-Solano (2022). [Póster] El Rift del Río Grande en Chihuahua, México: Diferencias mineralógicas y geoquímicas con el volcanismo félsico de la Sierra Madre Occidental. Semana Cultural de Geología XLIII- 2022.

Papu D. Maniar, Philip M. Piccoli, (1989). Tectonic discrimination of granitoids. GSA Bulletin; 101 (5): 635–643. doi: [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1989\)101<0635:TDOG>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1989)101<0635:TDOG>2.3.CO;2)

Pearce, J., (1996). A user's guide to basalt discrimination diagrams. Trace element geochemistry of volcanic rocks: applications for massive sulphide exploration. Geological Association of Canada. Short Course Notes 12, 79–113.

Pearce, J.A., Harris, N.B.W., and Tindle, A.G., (1984). Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks: Journal of Petrology, v. 25, p. 956– 983. doi: <https://doi.org/10.1093/petrology/25.4.956>

Purdy David, Bultitude Bob, Brown Dominic, (2021). An inventory of peralkaline rocks in Queensland for evaluation of REE enrichment potential. Conferencia de Geociencias de Exploración de Australasia AEGC 2021 En: Brisbane.

Ramírez Peña C.F, (2014). Análisis del contexto tectónico del emplazamiento de intrusivos en el transpaís de la sierra madre oriental. Tesis de maestría de ciencias geológicas, Universidad Autónoma de Nuevo León.

Ricketts Jason W., Amato Jeffrey M., Martillo Michelle M., (2021). The Origin and Tectonic Significance of the Basin and Range–Rio Grande Rift Boundary in Southern New Mexico, USA. doi: <https://doi.org/10.1130/GSATG509A.1>

Robles-Robles, Vidal-Solano, Arredondo-Contreras, Moreno-García (2022). [Póster] Estrategias metodológicas para identificar al Rift del Río Grande en

Chihuahua, México. Reunión Universitaria de Investigación en Materiales XXV-RUIM 2022.

Robles-Robles, Vidal-Solano, Arredondo-Contreras, Moreno-García (2022). [Poster] Estrategias metodológicas para identificar al Rift del Río Grande en Chihuahua, México. Semana Cultural de Geología XLIII- 2022.

Sally Gibson, Le Maitre, R. W. (2002). *Igneous rocks a Classification and Glossary of Terms Recommendations of the International Union of Geological Sciences, Sub-Commission on the Systematics of Igneous Rocks*, Cambridge University Press, 236 p. doi: <http://dx.doi.org/10.1017/CBO9780511535581>

SGM. Servicio Geológico Mexicano. Recuperado el 22 de enero del 2023, de <https://www.gob.mx/sgm>

SGM (Servicio Geológico Mexicano) 2003, Carta Geológica-Minera CIUDAD JUAREZ H13-1, escala1:250 000.

SGM (Servicio Geológico Mexicano) 2002, Carta Geológica-Minera NUEVAS CASAS GRANDES H13-4, escala1:250 000.

SGM (Servicio Geológico Mexicano) 1998, Carta Geológica-Minera BUENAVENTURA H13-7, escala1:250 000.

SGM (Servicio Geológico Mexicano) 2000, Carta Geológica-Minera CIUDAD DELICIAS H13-11, escala1:250 000.

Shackley M. Steven, (2005). *Obsidiana: geología y arqueología en el suroeste de Estados Unidos*. Prensa de la Universidad de Arizona, Tucson. Recuperado el 3 de enero del 2023, de <http://swxrflab.net/swobsrcs.htm>

Shackley M. Steven, (2021). Catálogo de fuentes de Obsidiana del suroeste. Laboratorio de fluorescencia de rayos X de energía dispersiva (EDXRF). Recuperado el 3 de enero del 2023, de <http://swxrflab.net/index.html>

Shand, S.J. (1927) *Eruptive Rocks, Their Genesis, Composition Classification and Their Reaction to Ore-Deposits, with a Chapter on Meteorites*.

Shen, W., and Ritzwoller, M. H. (2016), Crustal and uppermost mantle structure beneath the United States, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 121, 4306– 4342, doi:[10.1002/2016JB012887](https://doi.org/10.1002/2016JB012887).

Seager, William R., Morgan, Paul. (1979). Grieta del Río Grande en el sur de Nuevo México, el oeste de Texas y el norte de Chihuahua. *Grieta del Río Grande: Tectónica y magmatismo*, 14, 87-106. doi: <https://doi.org/10.1029/SP014p0087>

Terri Cook, (2015). *Travels in Geology: Touring Texas' Trans-Pecos*. Recuperado de <https://www.earthmagazine.org/article/travels-geology-touring-texas-trans-pecos/>

Vidal-Solano, (2005). These: Le volcanisme hyperalcalin d'age miocene moyen du nord-ouest du mexique (sonora).

Villarreal-Fuentes Janet, Gilles Levresse, Angel F. Nieto-Samaniego, Paul Alexandre, Rodolfo Corona-Esquivel, (2016). Geochemistry and geochronology of the Sierra de Gomez Limestone-hosted U deposit, Chihuahua: Implications for distribution of Rio Grande rift mineral deposits in northern Mexico, Ore Geology Reviews, Volume 76, 2016, Pages 19-34, ISSN 0169-1368, doi: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.01.004>

Wilson, J.A. (1980). Geochronology of the Trans-Pecos Texas volcanic field., en: Región Trans-Pecos, Dickerson, Patricia W.; Hoffer, Jerry M.; Callender, Jonathan F., Sociedad Geológica de Nuevo México, Guía, 31.^a Conferencia de campo, págs. 205-211 doi: :10.56577/ffc-31.205

Winchester, J.A., Floyd, P.A. (1977). Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements, Chemical Geology, Volume 20, Pages 325-343, ISSN 0009-2541, doi: [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(77\)90057-2](https://doi.org/10.1016/0009-2541(77)90057-2)

ANEXO I.

Características geoquímicas de rocas hiperalcalinas	
Norma CIPW	Acmita
Minerales modales	aegirina, riebeckita, richterita, acmita, Arfvedsonita y Aenigmatita
Bajos contenidos	Ca, Sr, Co y Ba
Altos contenidos	Fe, Ta, Nb, Hf, Y, Zr, Zn y REE.

ANEXO II.

Parker y Henderson (2021, p. 2, Fig. 1)

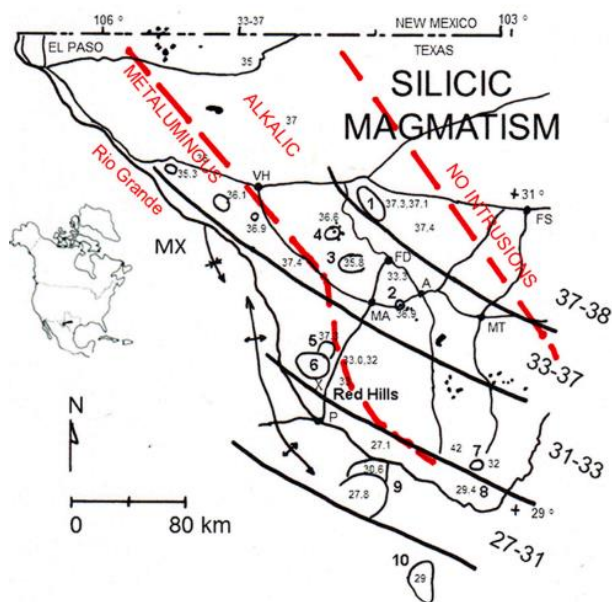


Fig. 1. Trans-Pecos Texas and adjacent Mexico showing retreat of silicic magmatism over the interval 38–28 Ma southwest into Mexico. Boundaries of Alkalic and Metaluminous belts of Barker (1977) shown in red. Black dots mark locations of alkalic intrusions generalized from Potter (1996) that may mark axis of asthenospheric upwelling. Major highways shown by black lines. Ages compiled from Henry and McDowell (1986), Henry et al. (1994), McDowell (2010), Parker et al. (2017) and Ritter and Cepeda (1991). Calderas indicated by circles. Calderas and localities discussed in text or in figure captions: 1 = Buckhorn Caldera; 2 = Paisano Volcano; 3 = Paradise Mountain Caldera; 4 = Muerto Caldera; 5 = Infiernito Caldera; 6 = Chinati Mountains Caldera; 7 = Pine Canyon Caldera; 8 = Burro Mesa lava; 9 = San Carlos Caldera Complex; 10 = Hechiceros Caldera. Axes of Laramide Chihuahua fold belt shown in Mexico. Laramide-age Red Hills porphyry deposit indicated by "X." Cities: FS = Fort Stockton; MT = Marathon; FD = Fort Davis; A = Alpine; P = Presidio; VH = Van Horn. (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

ANEXO III

Seager y Morgan (1979, p. 94, Fig. 5)

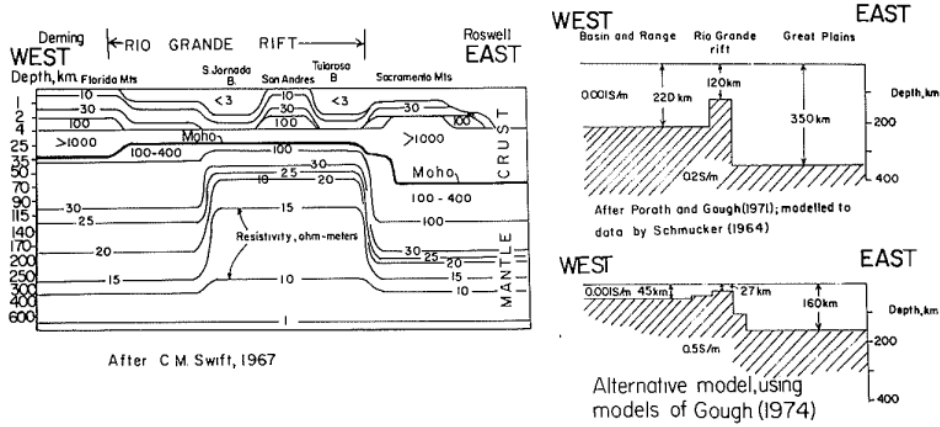


Fig. 5. Resistivity and conductivity models across the southern Rio Grande rift near latitude 33° N.

ture inferred from seismic data is characteristic of the East African rift system (Long, 1976; Fairhead and Girdler, 1971), the Rhinegraben (Mueller and others, 1973; Edel and others, 1975), and the Baikal Rift (Puzirev and others, 1973).

Villarreal-Fuentes *et al.* (2016, p. 32, Fig. 10)

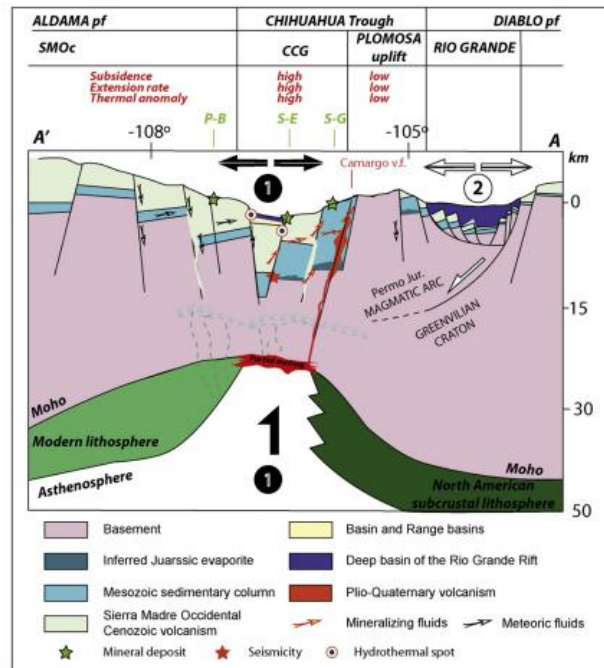


Fig. 10. Schematic crustal cross-section of southern Chihuahua. Cross section is based on de Voogd *et al.* (1986), Olsen *et al.* (1987), Russel and Snelson (1994), and Levander *et al.* (2011) and McLemore (1999) and (2011). Green stars indicate the location of mineral deposits. P-B: Peña Blanca U-Mn deposit, S-G: Sierra de Gomez U-deposit, S-E: Santa Eulalia Ag-Pb-Zn-Mn deposit, SMOc: Sierra Madre Occidental, CCG: Chihuahua Central Graben.

Gibson *et al.* (1992, p. 65, Fig. 2)

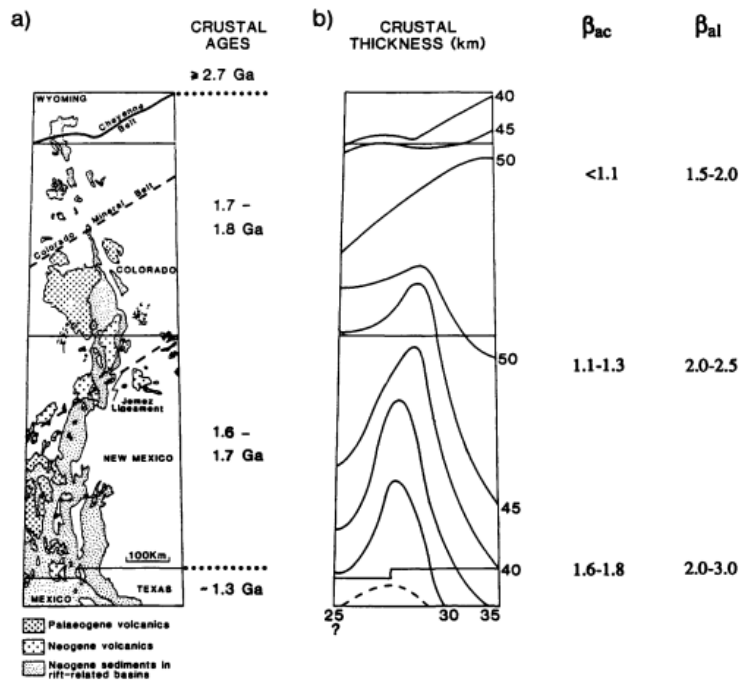


Fig. 2. (a) Schematic map of the Rio Grande rift showing distribution of Neogene and Palaeogene volcanics and also Neogene sediments in rift-related basins. Also shown are the major tectonomagmatic lineaments that transect the rift and the variation in crustal ages and thickness. (b) Shows crustal thickness contours across the region (slightly modified after Eaton 1987). The corresponding β values for the crust (β_{ac}) and lithosphere (β_{al}) show that extension of both the crust and lithosphere at the rift axis has been greatest in the south. The method of calculating β is discussed in the text. Lithosphere thicknesses are based on data from Iyer & Hitchcock (1989), Dalheim *et al.* (1989) and Bussod & Williams (1991).

ANEXO IV

Liu *et al.* (2019, p. 17, Fig. 2).

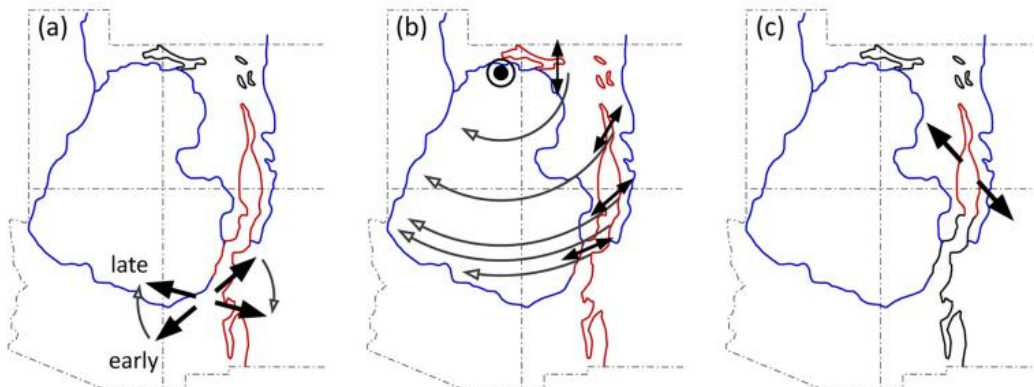


Fig. 2. Three kinematic models for the Rio Grande rift. (a) Far-field stress rotation model (Aldrich *et al.*, 1986; Morgan *et al.*, 1986). (b) "Colorado Plateau rotation" model (Chapin and Cather, 1994) (c) "Dextral shear" model (Wawrzyniec *et al.*, 2002). Red curves highlight the portions of the Rio Grande rift that is discussed in each model, and black curves for other rift portion. Blue lines denote the boundaries of the Colorado Plateau and the Rocky Mountains; grey dashed-and-dotted lines are state borders. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

ANEXO V

Ricketts *et al.* (2021; p.5, Fig.1).

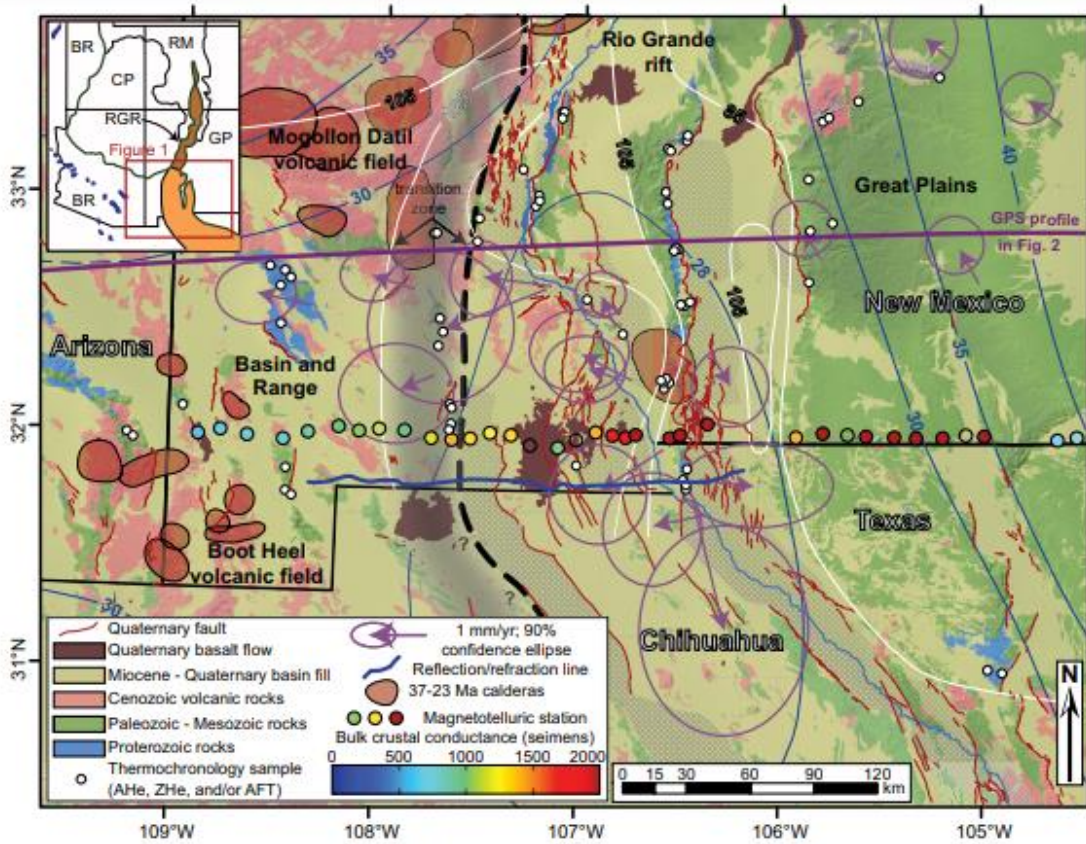


Figure 1. Geologic map of the southern Rio Grande rift (RGR)-Basin and Range Province transition. Map includes thermochronology data (Kelley and Chapin, 1997; Ricketts *et al.*, 2016; Biddle *et al.*, 2018; Gavel, 2019; Reade *et al.*, 2020), global positioning system (GPS) data (Murray *et al.*, 2019), reflection/refraction line (Averill, 2007; Averill and Miller, 2013), and magnetotelluric data recording bulk crustal conductance (Feucht *et al.*, 2019). Thick dashed black line is the boundary of Mack (2004). Cross-hatched areas show deep basins of the RGR (Seager and Morgan, 1979). Blue lines show crustal thickness (km), and white lines show heat flow (mWm^{-2}) (Keller *et al.*, 1990). AFT—apatite fission-track; AHe—apatite (U-Th)/He; ZHe—zircon (U-Th)/He. Inset shows metamorphic core complexes in blue and different models for the RGR-Basin and Range Province boundary, as discussed in the text. BR—Basin and Range; CP—Colorado Plateau; GP—Great Plains; RM—Rocky Mountains.

ANEXO VI

Recorte de Anexo de la carta Álamos de San Antonio H13-D54, escala 1:50,000, estado de Chihuahua

SERVICIO GEOLOGICO MEXICANO
GERENCIA REGIONAL NORTE

TABLA DE RESULTADOS PETROGRÁFICOS
CARTA ÁLAMOS DE SAN ANTONIO ESCALA 1:50,000
2008

CODIGO: GOL-48F751-04 REVISIÓN: 03-17-11/2003

TABLA DE RESULTADOS PETROGRÁFICOS

Carta: Álamos De San Antonio H13-D54

NUMERO IDENTIFICATIVO	NUMERO DE CAMPO	ZONA	X	Y	UNIDAD	TEXTURA	ESENCIALES	ACCESORIOS	MATRIZ O CEMENT.	ALTERACION	CLASIFICACION	ORIGEN	METAMORFISMO	FACTES	CLASE
SA-001	GSA-130	13R	609363	320283	To A-B	Vitrofica	Plagioclasa, Hornblenda	Minerales opacos	Vitrofica	Argilitización-Hematización	Vitrofido de plagioclasa y anfíbol	Ignea Extrusiva	.....	.....	.....
SA-002	GSA-140	13R	597975	3197898	To TR-Ig	Piroclástica	Vidrio, Cuarzo, Feldspato, Sanidino	Silice, Minerales opacos, Hematita	Vitroclástica	Silicificación-Hematización	Toba cristal-vitrea de composición riodelica	Ignea piroclástica	.....	.....	.....
SA-003	GSA-112	13R	612153	3199649	To A-B	Felítica con matriz microcristalina	Sanidino, Albita, Hornblenda, y Hematita	Apatito	Microcristalina	Hematización	Traquita de hornblenda	Ignea Extrusiva	.....	.....	.....
SA-004	GSA-112A	13R	612153	3199649	To A-B	Afanítica, Microcristalina	Andesina y Plioceno	Magrita y Apatito	Microcristalina	Oxidación	Andesita-Basítica de augita hematizada	Ignea Extrusiva	.....	.....	.....
SA-014	MP-01	13R	619150	3198707	To A-B	Porfirianítica con vesículas	Plagioclasa, Vidrio, Sanidino	Minerales opacos	Vitroclástica	Hematización	Traquiandésita	Ignea Extrusiva	.....	.....	.....
SA-015	MP-02	13R	619150	3198707	To A-B	Afanítica	Sanidino, Vidrio, Plagioclasa	Hornblenda	Microcristalina	Hematización	Traquita	Ignea Extrusiva	.....	.....	.....

Recorte de Anexo 2 de la carta La Coyota H13-D71, escala 1:50,000, estado de Chihuahua

CO-012	FVP-9	503524	3145600	To De-TDa	AFANITICA	OLIGOCLASA, BOTITA, APATITA Y MAGNETITA	SILICE Y HEMATITA	MICROCRISTALINA	OXIDACION Y SILICIFICACION	ROJITA DE BOTITA SILICIFICADA	ROCA IGNEA EXTRUSIVA				
CO-231	FVP-42	529949	3132467	To R-TR	AFANITICA	ANDESINA-LABRADORITA, OLIVINO, PIROXENO, APATITA Y MAGNETITA	HEMATITA Y BIDDINGITA	MICROCRISTALINA	OXIDACION	ANDESITA BASALTICA DE OLIVINO PIREXENO	ROCA IGNEA EXTRUSIVA				
CO-219	MHP-44	520998	3130463	To PR	AFANITICA	SANIDINO, CUARZO, ALBITA, OLIGOCLASA, BOTITA, MAGNETITA	HEMATITA	MICROCRISTALINA	OXIDACION	ROJITA DE BOTITA	ROCA IGNEA EXTRUSIVA				
CO-217	MHP-47	520520	3127705	To TR-9-R	PIROCLASTICA	VIDRIO VOLCANICO, FRAGMENTOS DE CRISTALES, FRAGMENTOS LITICOS	HELANDITA, MONTEBELLONITA	MICROCRISTALINA	OXIDACION	Toba vitro-cristalina	IGNEA PROCLASTICA				
CO-099	FVP-5	526258	3138777	To R-TR	CRISTALO-VITREA	FRAGMENTOS DE CRISTALES, VIDRIO Y FRAGMENTOS LITICOS	CRISTOBALITA Y HEMATITA, FELDSPATITA Y HEMATITA	VITREA	OXIDACION	Toba cristalovitrea	IGNEA PROCLASTICA				
CO-001	MHP170	500349	3148850	K vb Ar	GRANULAR	CUARZO Y FRAGMENTOS LITICOS	HEMATITA		OXIDACION	CUARCITA	METAMORFICA	REGIONAL DE BAJO GRADO			
CO-092	FVP243	515749	3136998	To R	AFANITICA FLUIDAL	SANIDINO, CUARZO Y OLIGOCLASA	CALCITA, ARCILLAS	FELDESPATO Y CUARZO	ZEOULITIZACION	ROJITA CON FLUIDO	IGNEO EXTRUSIVO				
CO-090	FVP223	513554	3138928	To R-TR	AFANITICA FLUIDAL	SANIDINO, CUARZO Y VIDRIO	HEMATITA	FELDESPATO Y VIDRIO	OXIDACION	Toba rojítica	PROCLASTICO				
CO-030	FVDA1	525975	3148475	To De-TDa	AFANITICA	OLIGOCLASA, ANDESINA Y CUARZO	BOTITA Y HORNBLENDA	MICROCRISTALINA	SILICIFICACION Y OXIDACION	DAICITA	EXTRUSIVO				
CO-100	FVDA2	526258	3138177	To R-TR	AFANITICA TOBACEA	ORTOCLASA, SANIDINO Y CUARZO	ANDESINA Y OLIGOCLASA	CRISTALOVITREA	SILICIFICACION Y OXIDACION	Toba rojítica	EXTRUSIVO				
CO-198	AVP224	517479	3128862	To De-TDa	AFANITICA FLUIDAL	SANIDINO, CUARZO Y OLIGOCLASA	EPIDOTA	FELDESPATO Y CUARZO	OXIDACION	ROJITA	EXTRUSIVO				
CO-120	AVP239	504749	3130168	To De-TDa	AFANITICA FLUIDAL	SANIDINO, CUARZO Y OLIGOCLASA	OXIDOS DE FIERRO	FELDESPATO Y CUARZO	OXIDACION	ROJITA DE BOTITA	EXTRUSIVO				
CO-029	FVP148	524927	3147631	To Tq	AFANITICA	SANIDINO, CUARZO Y OLIGOCLASA	EPIDOTA	FELDESPATO Y CUARZO	OXIDACION	ROJITA ALTERADA	EXTRUSIVO				