



UNIVERSIDAD DE SONORA

DIVISIÓN DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES

DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

TESIS

**ESTUDIO GEOLÓGICO Y GEOQUÍMICO DE ANOMALÍA DE LITIO EN
SUELOS DE LA REGIÓN NORTE DE SAHUARIPA, SONORA, MÉXICO**

PRESENTA

JESÚS RUÍZ NORIEGA

COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE

GEÓLOGO

HERMOSILLO, SON

SEPTIEMBRE, 2022

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 openAccess



UNIVERSIDAD DE SONORA

DIVISIÓN DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES

DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

TESIS

**ESTUDIO GEOLÓGICO Y GEOQUÍMICO DE ANOMALÍA DE LITIO EN
SUELOS DE LA REGIÓN NORTE DE SAHUARIPA, SONORA, MÉXICO**

PRESENTA

JESÚS RUÍZ NORIEGA

COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE

GEÓLOGO

SINODALES

PRESIDENTE M.C. Alma Patricia Sámano Tirado¹

SECRETARIA Dr. Raúl Ernesto Lugo Zazueta¹

VOCAL c.Dra. Alejandra Marisela Gómez Valencia²

VOCAL INVITADO Tomás Israel González Rodríguez³

¹Departamento de Geología de la Universidad de Sonora

²Departamento de Ingeniería Civil y Minas de la Universidad de Sonora

³Departamento de Ciencias Geológicas y Ambientales de la Universidad Ben-Gurion de Negev

HERMOSILLO, SON

SEPTIEMBRE, 2022

DEDICATORIA

Dedicado a mi padre

Jesús Ruiz Peña □, un millón de gracias no podría compensar por sí solo, todo lo que me diste sin pedir nada a cambio. Pero aun así quiero agradecerte por todo lo que soy
y por
ayudarme a encontrar mi camino.
¡Gracias!

Jesús Ruiz Noriega

Agradecimientos

Expreso mi agradecimiento a mi director de tesis Dr. Raúl Ernesto Lugo Zazueta, gracias por ayudarme a concluir con mi proyecto de tesis de la mejor manera posible.

También agradezco a mis asesores, primeramente, a la M.C. Alma Patricia Sámano Tirado, por guiarme en el transcurso de mis estudios y por formar parte de mi comité sinodal. Por otra parte, agradezco el apoyo del Dr. Tomás Grijalva Rodríguez por su asesoría en la base teórica de mi trabajo de investigación y la revisión de mi manuscrito de tesis. De la misma manera, agradezco a la c.Dra. Alejandra Marisela Gómez Valencia, por instruir y revisar mi trabajo de tesis.

Igualmente debo darle las gracias al geólogo Amehd Gallardo de la empresa Geosite Technologies, por proporcionar el equipo analítico de Fluorescencia de Rayos X, el cual fue de gran ayuda para concretar mi investigación. Así mismo, agradecer al M.C. Abraham Mendoza del Departamento de Geología por recibirme de la manera más atenta y por su apoyo en la identificación de las facies minerales en el Laboratorio de Difracción de Rayos X de la Universidad de Sonora. Por otra parte, agradezco al investigador Dr. Roberto Carlos Carrillo Torres del Departamento de Física de la Universidad de Sonora, por su apoyo y asesoría en la identificación de moléculas con el equipo de Espectroscopia Infrarroja de Rayos X.

Quiero agradecer a mis amigos cercanos de la carrera, Miguel Vidal, Efrén Corrales y Joel López, también a mis amigos de varios años José Guerrero, Alberto Fimbres, Donaldo Plata, Misael Córdova y Esteban Amaya.

Por último, quisiera recalcar la importancia de darle las gracias a mi familia, mi madre Patricia Noriega que nunca ha dejado de quererme, a mi padre Jesús Ruiz Peña, a mi hermano Ulises Ruíz por inspirarme a estudiar esta profesión y por apoyarme en la mayor parte de mis estudios, a mis hermanas Sara y Patty por siempre estar ahí apoyándome en cualquier cosa, y especialmente quiero dedicar este trabajo a mi papa Jesús Ruiz Peña que lamentablemente perdió la vida en el año 2021, me gustaría que me hubiera visto defender mi trabajo de tesis y recibir mi título, sin embargo, estoy seguro que desde donde está, estará muy orgulloso de mi.

Resumen

El litio es de auge en las investigaciones actuales y su búsqueda varía en la exploración en rocas magmáticas, rocas sedimentarias incluyendo suelos con arcillas y depósitos de salmueras. Particularmente al norte de Sahuaripa, municipio de Sonora, México, se presenta un suelo no consolidado rico en yeso con morfología lenticular, calcita y con anomalías de litio que rondan alrededor de 1,000 ppm. Estas anomalías con concentraciones potencialmente atractivas para la exploración de yacimientos de litio, están espacialmente relacionadas a estructuras geológicas que se encuentran enmarcadas dentro de las provincias *Basin and Range* y Sierra Madre Occidental. La cartografía geológica realizada en el área de estudio comprende la presencia de rocas ígneas extrusivas e intrusivas de composición félsica a intermedia que han experimentado algún grado de actividad hidrotermal, evidenciada por la presencia de minerales arcillosos (kaolinita-esmectita-montmorillonita-hectorita). Estas unidades se encuentran afectadas por fallas normales con un rumbo de 310° - 350° con echado de 50° - 80° hacia el NE.

Mediante el análisis de difracción de rayos X se determinó que la mineralogía principal de los suelos es yeso y calcita. La hipótesis desarrollada plantea que los fluidos hidrotermales actuaron de manera superficial o somera. Estos fluidos hidrotermales circularon por las fallas normales del área de estudio que cortan rocas ígneas félsicas, liberando el litio que posteriormente es transportado a la superficie o cerca de la superficie en cuencas hidrográficamente cerradas. Posteriormente, debido al clima árido, los fluidos en estos sedimentos empiezan a fijar el litio por medio del intercambio iónico con las arcillas presentes de estos suelos.

ÍNDICE

1	Introducción	10
1.1	Localización	12
1.2	Justificación	13
1.3	Objetivo	13
1.3.1	Objetivo general	13
1.3.2	Objetivos específicos	13
1.4	Metodología	14
1.4.1	Trabajo de campo y muestreo	14
1.4.2	Estudio petrográfico	14
1.4.3	Estudio geoquímico	15
1.4.4	Geología estructural	15
2	El litio y su importancia a nivel global	17
2.1	Contexto geológico y extracción de litio	20
2.1.1	Pegmatitas	20
2.1.2	Salmueras de litio	21
2.1.3	Arcillas	23
2.2	El litio y sus yacimientos en México	25
2.3	El litio en Sonora	25
3	Geología regional y tectónica	29
3.1	Mesozoico	29
3.2	Paleógeno	32
4	Geología de la región Norte de Sahuaripa, Sonora	33
4.1	Litología	33
4.1.1	Cretácico Inferior	36
4.1.2	Cretácico Superior	37
4.1.3	Paleógeno	43
4.1.3.1	Granitoides	43
4.1.3.2	Ignimbritas y derrames riolíticos	45
4.1.3.3	Suelos con anomalías de litio	45
5	Resultados	47
5.1	Geoquímica	47
5.1.1	Difracción de Rayos X (DRX)	47
5.1.1.1	Técnica analítica de Difracción de Rayos X	47
5.1.1.2	Análisis de Difracción de Rayos X	48
5.1.2	Fluorescencia de Rayos X	53
5.1.2.1	Técnica analítica de Fluorescencia de rayos X	53

5.1.2.2 Analisis de Fluorescencia de Rayos X	54
5.1.3 Espectroscopia Infrarroja (IR)	59
5.1.3.1 Tecnica analitica para la espectroscopia infrarroja	59
5.1.3.2 Analisis mineralogico por espectroscopia infrarroja (IR)	61
5.2 Geología Estructural	64
5.2.1 Fallas geológicas	65
5.2.2 Estratificación	70
6 Discusión	72
6.1 La importancia de los yacimientos de litio en Sonora	72
6.2 Las anomalias geoquímicas de litio	72
6.3 Los suelos ricos en litio	72
6.4 Modelo geológico del yacimiento de litio del Norte de Sahuaripa	73
7 Conclusiones	75
8 Bibliografía	77
9 Anexos	82

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Mapa de localización.	12
Figura 2.1. Propiedades físicas del litio.	17
Figura 2.2. Distribución espacial de los depósitos de litio.	19
Figura 2.3. Fotografía de pegmatita rica en litio.	21
Figura 2.4. Concentraciones de litio en hectorita.	22
Figura 2.5. Modelo de génesis de litio en calderas.	24
Figura 2.6. Localidades reportadas con anomalías de litio en Sonora.	26
Figura 2.7. Recursos y mapeo geológico del área La Ventana.	28
Figura 3.1. Mapa geológico regional.	30
Figura 4.1. Mapa geológico del área de estudio escala.	34
Figura 4.2. Mapa de la ubicación de las muestras petrográficas y geoquímicas.	35
Figura 4.3 Panorámica desde el Río Yaqui.	35
Figura 4.4. Foto panorámica mirando hacia el este, de la formación Lampazos.	36
Figura 4.5. Transición areniscas y lutitas.	37
Figura 4.6. Muestra de mano JR-11.	38
Figura 4.7. Fotomicrografía de Unidad Dacita (Muestra JR-11).	38
Figura 4.8. Afloramiento de la unidad Aglomerado.	39
Figura 4.9. Fotomicrografía de la muestra BT.	39
Figura 4.10. Foto de afloramiento de la Unidad Andesita.	40

Figura 4.11. Fotomicrografía de la muestra JR-16 de la unidad de andesita.	40
Figura 4.12. Foto de la muestra JR-16 correspondiente a la Unidad Andesita.	41
Figura 4.13. Fotomicrografía de la muestra JR-6 de la Unidad Basalto.	42
Figura 4.14. Foto del afloramiento de la unidad Basalto.	42
Figura 4.15. Foto de espécimen de la muestra JR-9 de la unidad Granodiorita.	43
Figura 4.16. Fotomicrografía de la muestra JR-9 de la unidad Granodiorita.	44
Figura 4.17. Fotomicrografía de la muestra JR-9 de la unidad Granodiorita.	44
Figura 4.18. Suelo tipo C.	46
Figura 4.19. Suelos tipo B con anomalías de 1000 ppm de litio.	46
Figura 5.1. Esquema de la ley de Bragg para la difracción de rayos X.	48
Figura 5.2. Difractograma y fotomicrografía de las muestras JR-7 y JR-8.	49
Figura 5.3. Difractogramas de las muestras de suelo JR-1, JR-3, JR-4 y JR-15.	50
Figura 5.4. Difractograma, foto y fotomicrografía de la muestra S1.	51
Figura 5.5. Difractograma y foto de la muestra S2.	52
Figura 5.6. Esquema de la fluorescencia de rayos X.	54
Figura 5.7. Analizador portátil de fluorescencia de rayos X.	54
Figura 5.8. SpectroScout, de Spectro Analytical.	54
Figura 5.9. Amplitud de la radiación electromagnética.	59
Figura 5.10. Parámetros importantes en la espectroscopia.	59
Figura 5.11. El espectro electromagnético.	60
Figura 5.12. Spectrum Two FT-IR Spectrometer PerkinElmer.	61
Figura 5.13. Diagramas resultantes de espectroscopia IR.	63
Figura 5.14. Falla normal cortando un dique granodiorítico.	65
Figura 5.15. Falla normal de alto ángulo afectando a lutitas.	66
Figura 5.16. Fallas con estrías medibles.	67
Figura 5.17. Panorámica con interpretación del fallamiento.	67
Figura 5.18. Afloramientos de zonas de falla intensas.	68
Figura 5.19. Proyección estereográfica de fallas y estratificación.	69
Figura 5.20 Plano de falla con estrías.	70
Figura 5.21. Contacto entre rocas volcánicas y calizas.	71
Figura 6.1 Mapa de las manifestaciones hidrotermales.	73
Figura 6.2 Modelo propuesto para la anomalía de litio en el área de estudio.	74
Anexo 1. Concentraciones de la muestra JR-4.	82
Anexo 2. Concentraciones de la muestra de suelo S2.	83
Anexo 3. Concentraciones de la muestra de suelo S1.	84
Anexo 4. Concentraciones de la muestra de suelo PLM-2.	87

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Sucesión estratigráfica de la concesión El Sauz.	.....	27
Tabla 2. Tabla con resultados de VANTA Olympus.	.....	55
Tabla 3. Continuación de resultados de VANTA Olympus.	.....	56
Tabla 4. Tabla con resultados del equipo ESPECTROSCOUT.	.....	57
Tabla 5. Continuación de resultados del equipo ESPECTROSCOUT.	.....	58
Tabla 6. Tabla de petrográfica de las muestras de roca y suelo del área de estudio.	.....	88

1 Introducción

En el universo los elementos químicos varían en abundancia y el litio es uno de los elementos que se considera en concentración moderada en la naturaleza, con 17 a 20 ppm en la corteza del planeta, mientras que en el océano se encuentra en 0.17 ppm. El litio posee una baja resistividad (o alta conductividad), y una alta electronegatividad. Dicha característica, le ha ubicado como un elemento de carácter estratégico en el contexto de la creación de nuevas tecnologías o producción de diversos dispositivos como (p.e. marcapasos, teléfonos móviles, relojes, cámaras fotográficas, reproductores de música portátiles, etc.), pero también, por su principal demanda en el desarrollo de baterías de diversa índole utilizadas para automóviles o aparatos electrónicos. Con el paso de los años se ha podido extraer el litio principalmente de pegmatitas, donde el mineral de mena es la espodumena con otros minerales asociados como eucryptita, petalita, lepidolita y amblygonita (British Geological Survey, 2016). Los yacimientos o depósitos que se han estudiado recientemente son salmueras (*brines*) y arcillas (Munk *et al.*, 2011; SRK Consulting Limited, 2015). Los países que tienen la mayor producción de litio son Argentina; en Puna, Australia; en Pilgangoora, Chile; en Atacama y China en Sichuan (U.S. Geological Survey, 2019; U.S. Geological Survey, 2022); estos extraen el litio en yacimientos tipo salmueras y pegmatitas (Christmann *et al.*, 2015). Es de llamar la atención que las mayores producciones tienen características geológicas diferentes, siendo uno muy joven de edad pliocena (Alonso, *et al.*, 1996) y con procesos geológicos relacionados a cuencas en superficie, y el otro con una geología más asociada a ambientes de procesos ígneos intrusivos de edad Mesoarcaica (Sweetapple, 2017). Consecuentemente, es muy interesante el hecho de que existen estos dos mecanismos geológicos para concentrar el litio en minerales de manera económica. Se puede añadir que los depósitos relacionados a arcillas son otro mecanismo que ha motivado estudios en años recientes. Por ejemplo, el caso de Bacadéhuachi, Sonora (SRK Consulting Limited, 2015) y la anomalía en McDermitt en Nevada (Benson *et al.*, 2017).

En México, se tienen reportadas anomalías en el rango de 66 a 3281 ppm de litio en localidades de los estados de Oaxaca, Puebla, Zacatecas, San Luis Potosí, Chihuahua, Jalisco, Coahuila, Michoacán y Sonora (Harp, 2020). Algunos sitios se están empezando a estudiar

como, por ejemplo, Teocaltiche en Jalisco con valores de 250 a 1600 ppm, Piaxtla en Puebla con valores de 250 a 3281 ppm de litio (SGM, 2020).

En el Estado de Sonora, se conocen 15 localidades con anomalías de litio, 13 en pegmatitas, 2 hospedados en sedimentos en Los Aros en Agua Prieta y una en Los Picos en Nogales, conteniendo entre 150 a 1,400 ppm de litio. Estas localidades están siendo estudiadas por el Servicio Geológico Mexicano (SGM, 2020). Una nueva localidad, es Bacadéhuachi, donde el litio se hospeda en sedimentos, con valores establecidos entre 800 a 2,650 ppm, planeando iniciar con la extracción en el año 2023 mediante un proceso que involucra entre otras cosas la calcinación y trituración de la roca para producir carbonato de litio (Rivera, 2022; SGM, 2020).

Alrededor del año 2010, la empresa Bacanora Minerals inicio la exploración en las zonas aledañas de Bacadéhuachi, donde descubrió que la mineralización de litio se encuentra en unidades de arcillas dentro del contexto regional del vulcanismo de la Sierra Madre Occidental (SMO) (SRK Consulting Limited, 2015). Esta clase de depósitos muestran características que lo hacen genéticamente compatible a lo que algunos autores describen como la formación de los que hospedan el litio en arcillas del tipo hectorita, y que han sido relacionado a ambientes ígneos de calderas y rocas félsicas (Benson *et al.*, 2017). Siendo este estudio muy reciente y relacionado a un elemento estratégico; como lo es el litio, es necesario profundizar en la investigación de este tipo de depósitos ya que representa una aportación fundamental al entendimiento de las condiciones de formación de estos depósitos.

Estas zonas, que se encuentran en la parte este-centro de Sonora, son áreas geológicamente relacionadas con eventos tectónicos diferentes en su evolución, en el que destaca el evento que generó la provincia volcánica y fisiográfica de la SMO, y el evento que conocemos como la provincia tectónica y morfológica del *Basin and Range*. Teóricamente, muchas de estas unidades, cuerpos estratiformes de rocas piroclásticas y lávicas asociadas al vulcanismo de la SMO en esta zona de Sonora, deben de estar deformadas debido a la tectónica extensional. Por lo tanto, es esencial adentrarnos en la geología estructural del área, y determinar que estructuras pueden estar asociadas en el origen de depósitos de litio.

El enfoque que tiene este trabajo es estudiar la mineralogía asociada a estas unidades de arcilla que hospedan el litio. Así mismo, inferir y/o determinar cualquier otro aspecto relacionado a la génesis y reconocimiento de estos tipos de anomalías. La localidad de

estudió, se localiza cerca en el municipio de Sahuaripa (Figura 1.1). La cual es parte de una franja tentativa a explorar y marcar como prospecto de exploración por empresas mineras como Bacanora Minerals (SRK Consulting Limited, 2015).

1.1 Localización del área de estudio

La zona de interés se encuentra en la parte este del estado de Sonora, cubre una extensión de unos 6 km² y localmente se encuentra al norte del municipio de Sahuaripa, Sonora. Se ubica en la parte noroeste de la sierra Los Chinos, justamente al este del Río Yaqui. Es accesible por la carretera que va de Hermosillo a Sahuaripa a 180 kilómetros con coordenadas 670768 m Este, 3247390 m Norte, con el datum WGS 84 EPSG: 32612 y la proyección Universal Transversa de Mercator con la zona UTM 12 R. Desde Sahuaripa, en la entrada sur del municipio, se toma una salida de terracería hacia el oriente y después hacia el norte, aproximadamente a 35 kilómetros hasta llegar al área de estudio (Figura 1.1).

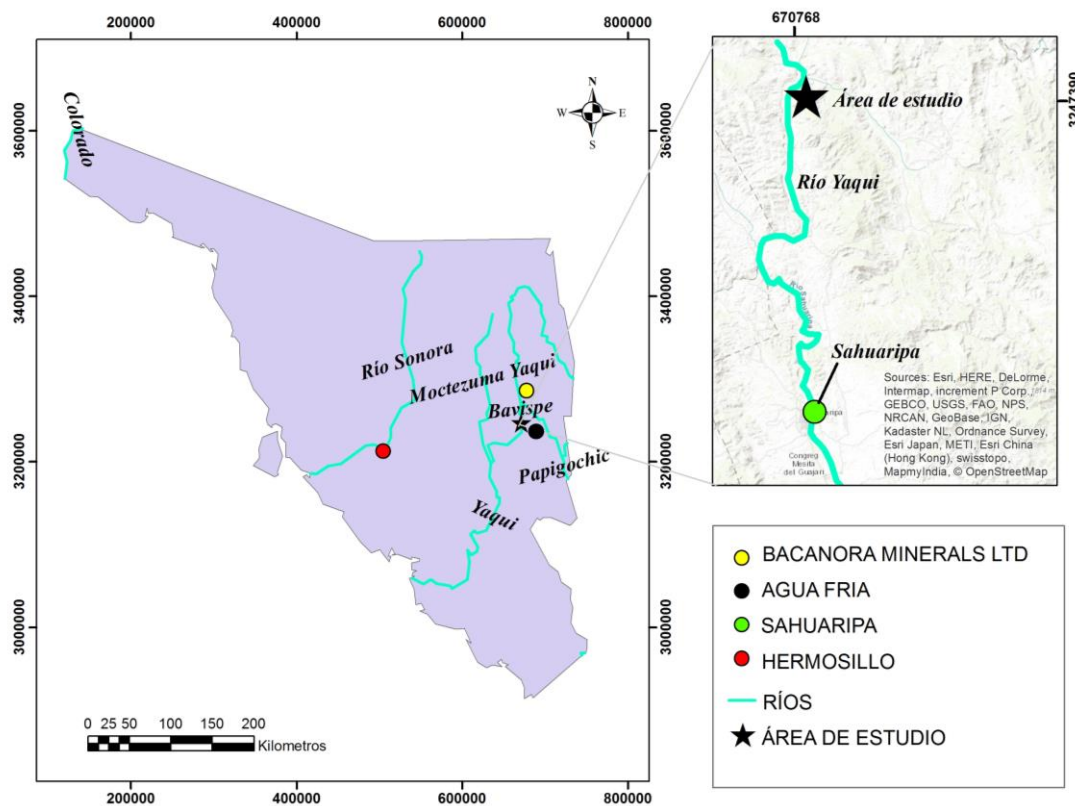


Figura 1.1 Mapa con la localización del área de estudio elaborado por medio de ArcGIS®. Datum WGS 84 EPSG 32612 con la zona UTM 12 R.

1.2 Justificación

El Departamento de Geología de la Universidad de Sonora ofrece la elaboración de un trabajo de tesis sobre algún tema en particular relacionado a la carrera de Geología para poder obtener el título de Geólogo y concluir con mis estudios. Debido a la relevancia del tema del litio en el contexto geológico actual el cual justifica el optar por elaborar un proyecto de tesis. El tema fue propuesto y asesorado por mi director de tesis Dr. Raúl Ernesto Lugo sobre un estudio Geológico y Geoquímico de anomalía de litio en suelos de la región Norte de Sahuaripa, Sonora, México.

De manera personal el sustentante eligió abordar este tema, ya que es muy interesante indagar en la temática que ha tomado mayor relevancia en la última década, además de expandir mis horizontes en cuanto a la aproximación de la geología económica y salir de la zona de confort de temáticas que han sido estudiadas tradicionalmente.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Elaborar un estudio geológico, geoquímico y estructural preliminar que pueda aportar al entendimiento general del origen geológico de la anomalía de litio que se encuentra al norte de Sahuaripa, Sonora, México.

1.3.2 Objetivos específicos

-Caracterizar geológica y geoquímicamente una zona que presenta una anomalía geoquímica de litio.

-Generar un mapa geológico-estructural que servirá para contextualizar qué ambientes geológicos, estructuras, asociación tectónica, entre otras características, están involucradas en la presencia de las anomalías de litio en el área de estudio.

1.4 Metodología

Para desarrollar el presente trabajo de tesis, se requirió realizar las siguientes actividades: trabajo de campo, muestreo de unidades litológicas y suelos, estudio petrográfico, análisis geoquímico de las muestras clave y un estudio de la geología estructural. A continuación, se describe la metodología utilizada.

1.4.1 Trabajo de campo y muestreo

Se realizó trabajo de campo con énfasis en la litología y en la parte estructural, además de la recolección de muestras para estudios de caracterización geoquímica. También se realizó como parte del trabajo de geología de campo un mapa geológico-estructural para comprender el contexto geológico en el que se sitúan las anomalías de litio del área de estudio. Basándose en la geología y estudios bibliográficos previos, se tomaron muestras que anteriormente habían resultado con concentraciones de alrededor de 1,000 ppm de litio, para de esta manera conocer la mineralogía asociada a estas anomalías. También se tomaron muestras de zonas de falla y rocas volcánicas asociadas a la mineralización. En total se tomaron 18 muestras de rocas y material no consolidado, para su análisis por difracción de rayos X, fluorescencia de rayos X, espectroscopia infrarroja y estudios petrográficos. En cada afloramiento se describieron las estructuras presentes, como son: fallas, vetillas, estratificación y estrías; el tipo de roca, textura, morfología, color, alteración, y se le asignó una clave a la muestra para seguir un control. Para las mediciones estructurales se utilizó una brújula tipo Brunton y se utilizó la técnica de la mano derecha para agilizar el trabajo al momento de escribir los datos. En conjunto con la bibliografía y mapas previos del área, se generó un mapa de esa zona a escala 1: 15,000.

1.4.2 Estudio Petrográfico

El estudio petrográfico consistió principalmente en tomar muestras de campo de un tamaño cercano a la palma de la mano, que sean espacialmente cercanas a las anomalías de litio y que contengan información de interés geológico de esa zona. Se prepararon las

muestras en el laboratorio para preparación de láminas delgadas del Departamento de Geología de la Universidad de Sonora para analizarlas al microscopio petrográfico en el laboratorio de petrografía del mismo Departamento de Geología de la Universidad de Sonora. Estas muestras son rebajadas a un grosor de 30 μm y adheridas a una lámina delgada de vidrio con su cubreobjeto que permiten la identificación mineralógica.

1.4.3 Estudio Geoquímico

Para este estudio geoquímico se tomaron muestras de suelo con contenidos de alrededor de 1000 ppm de litio, así como rocas de varias litologías para estudiar su composición mineralógica y elemental. Se optó por hacer un estudio de difracción de rayos X en muestras con anomalías de litio para conocer su mineralogía. Después se hizo un análisis elemental para analizar asociaciones elementales por medio de fluorescencia de rayos X en rocas y muestras de suelo con anomalías de litio. Por último, se llevó a cabo un estudio por espectroscopia infrarroja (FT-IR) en las muestras de suelo para detectar otras especies minerales existentes en las muestras de suelo que presentaban anomalías de litio. Para el estudio de FT-IR se tuvieron que pasar las muestras por un molino de discos perteneciente al Departamento de Geología de la Universidad de Sonora, para hacer más pequeña la partícula ya que es requerido para su análisis un tamaño de partícula no mayor a 50 μm .

Cabe destacar, que en este apartado fue de gran importancia el apoyo del Geólogo Manuel Campa Robles quien ayudó a corroborar las anomalías de litio por medio de un análisis multielemental. Además del uso de los equipos analíticos de los Departamentos de Geología y Física de la Universidad de Sonora. Adicionalmente, se utilizaron equipos de fluorescencia de rayos X a cargo del Geol. Amehd Gallardo de la empresa Geosite Technologies.

1.4.4 Geología Estructural

Para comprender mejor la evolución geológica del área de estudio se decidió hacer un estudio estructural. Se tomaron medidas estructurales con una brújula tipo Brunton verificando que se tuviera la correcta declinación magnética. Se midieron planos de falla, así como estrías y también planos de estratificación en rocas sedimentarias. Para tomar un dato

estructural primeramente se tiene que tomar en cuenta que tipo de estructura se está midiendo, si es falla, pliegue, actitud de dique o vetilla, fractura, foliación, etc., entonces dependiendo de la estructura se toma una metodología específica. Principalmente se miden planos y líneas. Se tomaron en cuenta estructuras relacionadas a la evolución tectónica-estructural del área cercana a la anomalía de litio. Después de recopilar las mediciones de campo, se llevó a cabo un análisis por medio de los softwares *Stereonet 10.1.1* y *FaultKin* (Allmendinger *et al.*, 2012), estos análisis nos llevaron a identificar grupos de fallas y posibles asociaciones espaciales con las anomalías de litio.

2 El litio y su importancia a nivel global

En el sistema periódico de los elementos químicos el litio es el tercer elemento, después del hidrógeno y el helio, siendo el primer elemento del grupo de los metales alcalinos. En la naturaleza el litio sólo se encuentra combinado en la forma de minerales y mayormente en salmueras (Comisión Nacional del Litio, 2015). Es un metal blanco plateado, relativamente blando y el más liviano de todos los metales. Este metal posee propiedades físicas y químicas de carácter singular (Figura 2.1), por una parte, su densidad de solo 0.534 g/cm^3 y su alto potencial electroquímico de 3.045 V. , lo convierte en uno de los componentes más demandados en la fabricación de baterías recargables de alta densidad energética (Comisión Nacional del Litio, 2015).

Símbolo	Li	
Número atómico	3	
Peso atómico	6.94	
Densidad a 20°C	534	kg m-3
Punto de fusión	180.54	°C
Punto de ebulición	1342	°C
Estructura cristalina	Cubica centrada en cuerpo	
Dureza	0.6	Escala de Mohs
Resistividad eléctrica	9.5	mΩ cm
Conductividad térmica	85	W m-1 K-1

Figura 2.1. Propiedades físicas del litio (British Geological Survey, 2016).

La facilidad con la cual el litio cede su electrón exterior (número atómico 3 y su configuración electrónica $1s^2 2s^1$), determina que sea un agente reductor súper potente y, como tal, reacciona rápidamente con los agentes oxidantes menos potentes (no ceden electrones fácilmente). Por ejemplo, reacciona con el nitrógeno a temperatura ambiente para formar el nitruro de litio (Li_3N) con el oxígeno del aire formando el óxido de litio (Li_2O), y

con el flúor genera la reacción más violenta y explosiva de todas formando fluoruro de litio, que es una sal blanca, cristalina, se utiliza en la industria del vidrio y cerámica. Debido a estas propiedades, el litio es empleado en sistemas de muy alta generación de energía electroquímica, por ejemplo, en las baterías de litio-cloro o de litio-azufre y varios otros tipos de pilas. El litio ocupa la posición número 32 entre los elementos de la corteza terrestre con una concentración promedio de aproximadamente 20 ppm. Además de ser encontrado en la corteza terrestre, se encuentra disuelto en el agua de mar y sus reservas están mayormente alojadas en salares, rocas y arcillas (Comisión Nacional del Litio, 2015).

En 1923 se dio la primera producción comercial de litio metálico en Alemania, usando la electrólisis de una mezcla fundida de cloruro de litio y cloruro de potasio (Tipler & Mosca, 2005).

En un futuro cercano, esta materia prima también será requerida en mayores proporciones para poner en marcha la industria automotriz con la construcción de más autos eléctricos. Debido a su potencial electroquímico, el litio se emplea para almacenar electricidad. Por ello, el 60 por ciento de los teléfonos móviles y el 90 por ciento de los ordenadores portátiles que se encuentran en el mercado mundial tienen una batería de iones de litio. (Bolivia, noticiero digital, 2017)

Debido a su alta reactividad, el litio no se encuentra en la naturaleza como un compuesto nativo de la misma manera que lo hace el oro. Se agrupa con otros elementos para formar compuestos, los cuales pueden precipitar como minerales o migrar en fluidos al estar en contacto con rocas, sedimentos, y minerales. Se conoce que la principal fuente de litio son las rocas ígneas intrusivas, las cuales están en contacto con aguas subterráneas que lixivian el litio. La abundancia promedio en la corteza es de 17-20 ppm de litio, en las rocas ígneas de 28-30 ppm y en las rocas sedimentarias puede llegar hasta 53 -60 ppm (Kunasz, 2006; Evans, 2014; British Geological Survey, 2016). La distribución en el planeta de las anomalías de litio es muy amplia y están presentes en los 5 continentes (Figura 2.2).



Figura 2.2. Distribución espacial de los depósitos de litio mayores a 100 kilotoneladas equivalentes de litio y sistemas volcánicos (ver cuadrados negros, Benson et al., 2017).

En los ensayos al fuego el litio tiene la característica de mostrar una flama de color rojo carmesí. De los minerales principales que contienen litio en formula química tenemos a los silicatos. De los silicatos tenemos a la petalita, espodumena, eucryptita, lepidolita, zinwaldita y manandonita. También tenemos minerales del grupo de los fosfatos que son la trifilita, litiofilita, ambligonita, fremontita y sicklerita (Dana, 1922).

Tkachev *et al.*, (2018) ha resaltado las características en la distribución de todos los recursos de litio redituables con respecto al tiempo geológico. Adjudican el tiempo geológico a los procesos para formar supercontinentes, p.e., Pangeano, Rodiniano, y Kenorano. De cierta manera algunos tipos de depósitos se dan más en determinados ciclos supercontinentales y podemos señalar como los más antiguos en este caso: Kenorano, Columbiano y Rodiniano. Estos son los ciclos antiguos que comprenden desde los 3.2 Ga hasta los 750 Ma. Los autores infieren que esos tres ciclos son mayormente importantes ya que solo en éstos es donde ocurren los depósitos con mayor ley mineral y número de depósitos. No es hasta el ciclo Pangeano cuando ocurren los depósitos tipo “*Rare Metal Granites*” con mineralización de Litio-Flúor. El ciclo Amasiano es conocido por ser el que generó el siguiente supercontinente y se puede relacionar fácilmente con la disgregación de

Pangea. En este ciclo denominado Pangeano, es donde se tiene mayor diversidad y es cuando aparecen los depósitos denominados como “*epithermal stratabound*” atribuidos al tipo sedimentario/hidrotermal. Se estima una edad del Mioceno para estos últimos depósitos. En el presente, es cuando se generan los salares o brines correspondiendo al ciclo Amasiano, aunque se entiende que estos tipos de depósitos pudieron haber existido desde el Paleoproterozoico, solamente han sido más difíciles de preservar y ya no son de roca dura consolidada (Tkachev *et al.*, 2018).

2.1 Contexto geológico y extracción de litio

2.1.1 Pegmatitas

En cuanto a los de procesos magmáticos y rocas intrusivas, hay una amplia gama de rocas asociadas, ya sean pegmatitas o granitoides (Figura 2.3), a procesos endógenos, relacionados a un ambiente tectónico de colisión continental, arco de acreción y básicamente de engrosamiento cortical. En Europa se ha vuelto a revisar los recursos de litio, se recopiló los diferentes tipos de depósitos en Europa agrupándolos en dos clases, los relacionados a procesos magmáticos, y los relacionados a procesos sedimentarios e hidrotermales. En los eventos magmáticos, aparte de la incorporación de litio, también se pueden incorporar elementos como el cesio y tántalo en pegmatitas. Los denominados *Rare Metal Granites*, son rocas graníticas con mineralización diseminada de Tierras Raras Ligeras, itrio, estaño, flúor y zircón. También existen vetas hidrotermales asociadas a cúpulas leucocráticas. Todos estos eventos geológicos relacionados a fluidos residuales ricos en estos elementos incompatibles son producto de los procesos de cristalización fraccionada (Gourcerol., *et al.*, 2019).



Figura 2.3. Fotografía de pegmatita rica en litio (tomada de British Geological Survey, 2016).

2.1.2 Salmueras de Litio

Las salmueras se definen como un líquido rico en sales y otros minerales que ocurren en el subsuelo y existen 3 tipos: Salmueras continentales, salmueras geotérmicas y salmueras de campos petrolíferos (SE, 2018). Starkey (1982) resalta que el litio proviene del intemperismo de rocas intrusivas, que después se va en solución por ríos y consecuentemente puede incorporarse al agua en el subsuelo como salmueras, o desembocar en otros cuerpos de agua como lagos, mares u océanos.

También es mencionado que el litio puede reemplazar al magnesio de manera que puede ser capaz de alcanzar valores altos antes mencionados. Para eso se define al ambiente como un ambiente sedimentario con facies dolomíticas y sulfatadas (Tardy *et al.*, 1972).

En el caso de Clayton Valley, Nevada, existe una cuenca en la zona del *Basin and Range* de Estados Unidos. Esta cuenca tipo “*graben*” tiene un basamento con rocas proterozoicas y paleozoicas con baja permeabilidad, y un relleno de rocas con alta permeabilidad del paleógeno. En esta zona, aparte de tener producción de salmueras (*brines*), se tienen arcillas de litio. Los factores determinantes en la formación de los salares con salmueras son:

- La tectónica: determina el establecimiento de cuencas cerradas (endorreicas).

- El volcanismo del Cenozoico: aporta los componentes químicos, mediante la lixiviación de rocas volcánicas y actividad fumarólica.
- El clima árido a semiárido: favorece la precipitación de los compuestos salinos mediante una alta tasa de evaporación ($10 \text{ L m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ en el Salar de Atacama) hacía el Altiplano, se reduce y aumenta la pluviosidad. (Esparza, 2015).

Un análisis de difracción de rayos X en las arcillas permite la formación de fases minerales como esmectita, illita/moscovita y clorita. Adicionalmente la parte no arcillosa contiene calcita, cuarzo, feldespato potásico, y clorita. Los contenidos de litio en estas muestras van desde las 900 a 1,200 ppm. Además, contienen otros elementos de interés como rubidio y cesio. Los autores proponen que la mineralización de litio está controlada por esmectita e illita, deducen que esta cuenca experimentó bajas temperaturas y poca o nula actividad hidrotermal en la zona de Clayton Valley (Descarreau *et al.*, 2012). Como se muestra en la figura 2.4, Barrie *et al.*, (2018) proponen un modelo basado en los datos de Descarreau *et al.*, (2012). Donde el mineral hectorita puede incorporar una mayor cantidad de litio, dependiendo de la concentración de litio en la salmuera y de una temperatura relativamente alta.

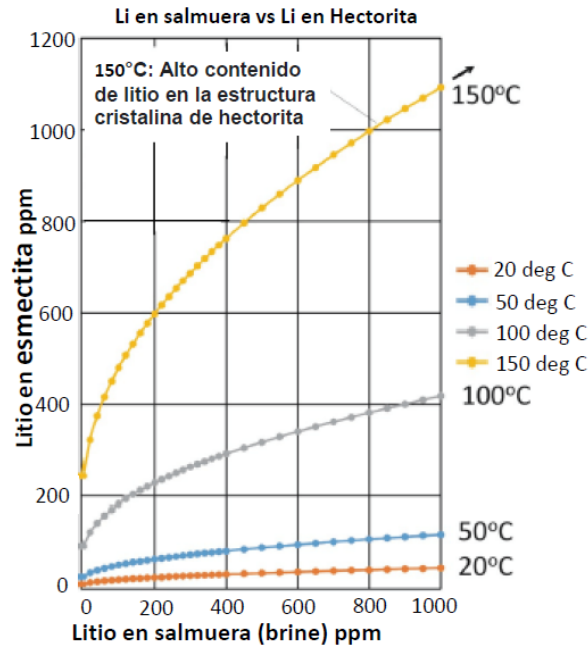


Figura 2.4. Concentraciones de litio en hectorita en equilibrio con salmueras a diferentes temperaturas (tomado de Barrie *et al.*, 2018).

2.1.3 Arcillas

En relación con los depósitos de procesos sedimentarios e hidrotermales, éstos se definen como secuencias sedimentarias afectadas o no, por procesos hidrotermales y el intemperismo supergénico. No obstante, aparte del litio, se permite la presencia de boro, manganeso, fierro, aluminio y galio. Las secuencias sedimentarias pueden ser siliciclásticas, clásticas, carbonatadas y bioclásticas, mismas que pueden ser afectadas por zonas de falla regionales importantes o son afectadas por soluciones resultantes de la desvitrificación de rocas volcánicas. El ambiente y el clima son agentes importantes para que precipiten los minerales que contienen litio Stanley *et al.* (2007),

En el contexto de los eventos asociados a procesos sedimentarios podemos mencionar la cuenca de Jadar en Serbia, uno de los depósitos de litio más importantes en Europa. Esta cuenca lacustrina paleo-evaporativa está conformada por dolomita, mármol, rocas siliciclasticas, unidades piroclásticas y lutitas petrolíferas. La unidad donde se hospeda la mineralización de litio-boro, está constituida por arcillas calcáreas, limolitas, areniscas y rocas clásticas que descansan de manera inconforme sobre rocas del basamento Cretácico conformado por rocas metasedimentarias, intrusivas, calizas y areniscas. El mineral donde se hospeda la mineralización se llama jadarita y se encuentran en forma de granos redondeados en una matriz de calcita, dolomita, feldespato potásico, rutilo, albita, ilmenita, pirita y moscovita de grano fino (Stanley *et al.*, 2007; Obradovic *et al.*, 1997).

Indagando en la fuente principal del litio, encontraremos que la corteza continental es la fuente principal. Las cortezas que pueden generar contenidos moderados de litio son las zonas cratónicas transicionales. La erupción de rocas riolíticas derivadas de fusión parcial, asimilación de corteza continental o cratones, son propensas a enriquecerse en litio y otros elementos incompatibles. Las calderas que son producto de la erupción de estas rocas riolíticas, pueden generar estructuras que favorecen a la depositación de sedimentos lacustre y posteriormente alterarse hidrotermalmente. En referencia al modelo esquemático (Figura 2.5), el agua meteórica interactúa en los productos extrusivos como lavas e ignimbritas, la actividad hidrotermal en los anillos de la caldera son los agentes que trasladan el litio hacia las arcillas, donde se almacenan. El litio se incorpora a la estructura cristalina al momento de formarse el mineral, a diferencia de la posible alteración hidrotermal (Starkey, 1982).

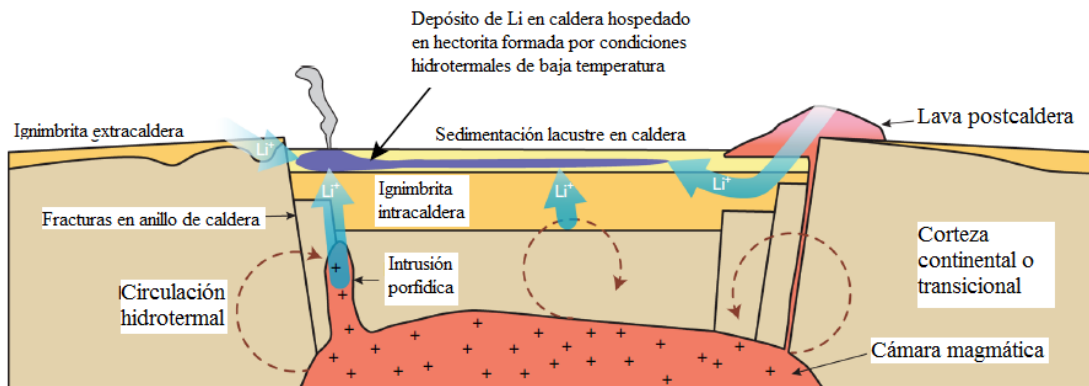


Figura 2.5. Modelo esquemático del sistema de una caldera hospedante de litio en hectorita (tomado de Benson *et al.*, 2017).

Glanzman *et al.*, (1978), estudiaron la caldera de McDermitt en Oregón y Nevada en Estados Unidos, hicieron estudios de difracción de rayos X en los sedimentos tobáceos y definieron zonas donde la mineralogía controla el contenido de litio. En las zonas de arcillas con clinoptilolita, feldespato y erionita, se reportaron valores de 0.36 % de litio. Las zonas con analcima, feldespato potásico y yeso, guarda valores de hasta 0.65 % de litio. Por último, las zonas con vidrio contienen los valores más bajos con un 0.07 % de litio. En estas unidades también se presentan fósiles como ostrácodos y gasterópodos, además de materia orgánica. Benson *et al.*, (2017) han hecho una de las aportaciones más importantes sobre la cuestión de la formación de estos yacimientos. Establecen que los ambientes de caldera son los más atractivos para explorar debido a nuevos prospectos de litio. En estas estructuras, la sedimentación lacustre es propicia para hospedar arcillas y mineralización de litio. Las rocas ígneas de composición félsica se asocian petrogenéticamente a contener más litio y se reconocen como la fuente de esta misma. El autor analizó los elementos traza en las inclusiones de vidrio en cuarzos de ignimbritas y lavas riolíticas de diferentes calderas en América. También, correlaciono los contenidos de litio con otros elementos incompatibles tales como el rubidio, y se demostró con modelos que estos magmas necesitarían menos de 50% de cristalización fraccionada para poder conseguir valores relativamente altos en litio. Es congruente que, en los líquidos más evolucionados, el litio no se pueda incorporar a los minerales formadores de rocas ígneas como cuarzo, plagioclasa, feldespato potásico, anfíbol, zirconio, apatito, etc. También existe una relación de elementos traza medidos fue el zirconio y que la relación entre zirconio y litio es inversamente proporcional.

2.2 El litio y sus yacimientos en México

De acuerdo con el Servicio Geológico Mexicano (Harp, 2020), hasta el momento en México tienen detectadas anomalías de litio en pegmatitas, sedimentos y salmueras. En Sonora se tienen anomalías en pegmatitas en Puerto Peñasco, Pitiquito, Tubutama, El Saric, Nacozari, Aconchi, Huásabas, La Colorada, Suaqui Grande, Onavas, Soyopa y Álamos (Figura 5.6). En Chihuahua se tienen anomalías de salmueras en Jiménez, Ascensión, Aldama y Cusihuiachi. En Coahuila en el municipio de Sierra Mojada y San Pedro se tienen anomalías de salmueras. En Zacatecas se tienen anomalías de salmueras en Jiménez del Teul, Villa Hidalgo y Fresnillo. En San Luis Potosí se tienen anomalías de salmueras en Santo Domingo, Villa de Ramos, Salinas, Moctezuma y Villa de Guadalupe. En Puebla se tienen anomalías de salmueras en Oriental y Tepeyahualco. También en Puebla se tiene anomalías de arcillas en Chietla, Izúcar de Matamoros y Tehuizingo. Por último, en Oaxaca se tienen anomalías de pegmatitas en los municipios de Santiago Tenango y Ocotlán de Morelos.

2.3 El Litio en Sonora

El estado de Sonora cuenta con varios prospectos que son reportados como anomalías por parte del Servicio Geológico Mexicano (Figura 2.6). Sin embargo, una de las localidades más estudiadas es la de Bacadéhuachi. Desde 2010, el proyecto de exploración ha sido realizado por Bacanora Minerals LTD. El Proyecto de Litio en Sonora efectuado por Bacanora Minerals LTD (SRK, 2015), está localizado a 11 kilómetros al sur de Bacadéhuachi, Sonora. La geología de la propiedad es dominada por tobas riolíticas, ignimbritas y brechas del complejo volcánico de la SMO. Estas rocas fueron sometidas a la tectónica extensional *Basin and Range* creando *horst* y *grabens*, así como medio *grabens*. Estos *grabens* fueron llenados con material fluvio-lacustre y rocas volcánicas. Se piensa que el volcanismo alcalino penecontemporáneo a la creación de los valles hayan contribuido con el litio (SRK, 2015).



Figura 2.6. Localidades reportadas como anomalías de litio en Sonora (tomado de Harp, 2020).

Esta mineralización de litio en el área de La Ventana consiste en arcillas que fijan el litio (Figura 2.7). Las unidades de litio tienen continuidad por 7 kilómetros a lo largo de un rumbo casi norte, y tienen un echado hacia el este (Figura 2.7). Hay dos unidades que se describen en Bacadéhuachi, la unidad inferior y unidad superior. La unidad inferior, está conformada de tobas y tobas retrabajadas, le subyacen flujos basálticos, brechas y rocas tobáceas. Sobreyaciendo a la unidad inferior está una capa de ignimbritas. Arriba de las ignimbritas se encuentra la unidad superior que consiste en arcillas, areniscas, material tobáceo y calcáreo (Tabla 2.7, SRK, 2015).

Unidad	Espesor ³ Real (m)	Unidad/Subunidad Descripción
Capping basalt <small>(Basalto tapón)</small>	Indeterminado	Basalto. Contiene cristales de olivino verdes. Vetillas de kaolinita/alunita (blanco/verde, en polvo).
Upper clay unit (Unidad de arcillas Superiores)	28.0 (14.10 – 40.39)	Arenisca de grano medio color rojo, con vetillas de calcita
		Arcillas tobáceas color gris pálido intercaladas con capas arenosas. Capas con FeOx esporádico (negras).
		Brechas color gris oscuro desplomadas. Matriz color oscura con fragmentos tobáceos. Calcita en masas.
		Matriz tobácea arcillosa y encerado, nódulos de sílice verde-amarillento.
		Arenisca café. Pobrementemente estratificada. Altamente calcárea. Arenisca tobácea color rojo de grano grueso. Matriz de arcillas. Suave
		Secuencia de grano fino de arcillas y nódulos de sílice color verde-rosado pálido. Encerado en algunas zonas. Calcita en masas.
Ignimbrite (Ignimbrita)	5.58 (1.29 – 11.89)	Ignimbrita: Toba lapilli soldada, color naranja. Localmente brechada
Lower clay unit (Unidad de arcillas inferiores)	27.78 (21.57 – 42.11)	Toba retrabajada color gris pálido con zonas de arcillas ricas en litio.
		Sedimentos tobáceos color verde pálido. Matriz con feldespato potásico, con cuarzo y biotita. Muy duros. Contiene toba lapilli.
Basement Volcanics <small>(Basamento Volcánico)</small>	Indeterminado	Basalto verde oscuro. Basalto andesítico y toba riolítica.

Tabla 1. Sucesión estratigráfica de la concesión El Sauz (tomado de SRK,2015).

El estudio de SRK (2015), reporta que sus contenidos de litio promedio están por encima de las 3,000 ppm y estos niveles altos de litio están correlacionados con altos contenidos en Mg, Ca, Ce, K, Rb y Sr. La media compuesta de la unidad inferior y superior es 1360 ppm y 3400 ppm de litio respectivamente. Se cree que este depósito se formó por la alteración hidrotermal, resultado del volcanismo alcalino, que afectó a los depósitos volcanoclásticos depositados en las cuencas(tabla 1).

La compañía Alix Resources realizó un estudio en Sonora, cerca de Bacadéhuachi y del área de estudio de este trabajo en el lote concesionado Agua Fría, donde definen la mineralización asociada a sedimentos volcanogénicos que contienen cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa, analcima, ankerita-dolomita y arcillas como montmorillonita. Concluyen que la arcilla montmorillonita concentra el litio; han trabajado para poder aislar el mineral y obtener un mejor concentrado de litio (Alix Resources Corp, 2017).

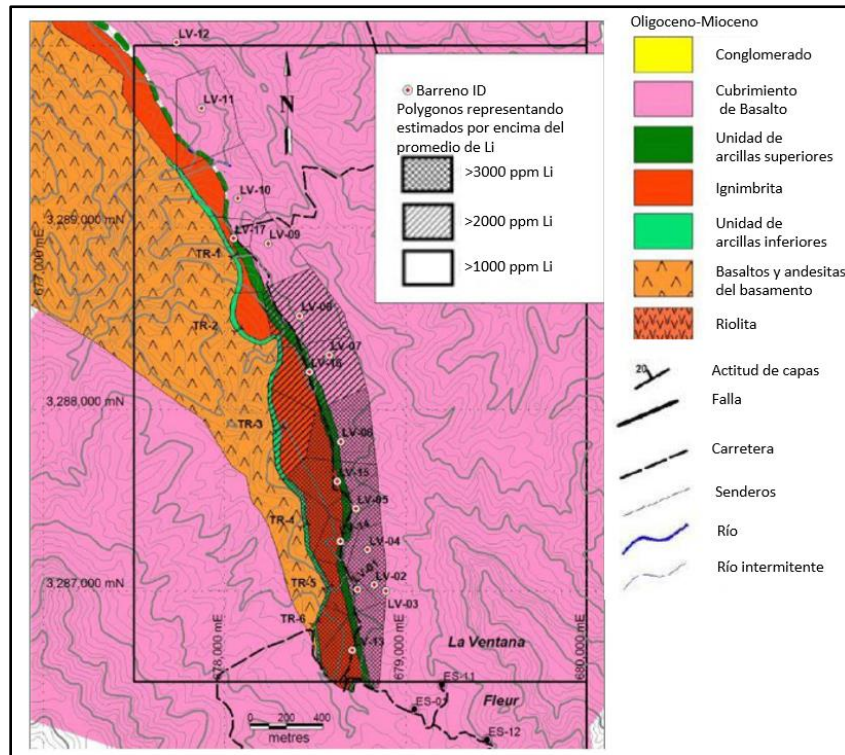


Figura 2.7. Recursos y mapeo geológico del área La Ventana de Bacanora Minerals en el municipio de Bacadéhuachi, Sonora (tomado de SRK, 2015).

3 Geología regional y tectónica

3.1 Mesozoico

En el norte de Sahuaripa, en la Sierra Los Chinos se encuentra un paquete de rocas desde el Cretácico inferior al Paleógeno, y esta a su vez, está conformada por tres formaciones descritas por Monreal y Longoria (2000b). La Formación Agua Salada, Formación Lampazos y Formación Los Picachos, son parte del Cretácico inferior en la Sierra Los Chinos. Para el Cretácico superior, se tiene otra unidad que litológicamente es caracterizada por la actividad volcanosedimentaria. En el área de la Sierra Los Chinos, la Formación Agua Salada consiste en areniscas y lutitas color negro con estratificación delgada a mediana. Estos estratos cuentan con algunos intervalos cerca de la cima de olistostromes de calizas fosilíferas. Se indica que, por la microfauna de radiolarios y foraminíferos planctónicos, la Formación Agua Salada se depositó en un ambiente marino pelágico.

La Formación Lampazos consiste en una alternancia entre calizas nodulares, lutitas color gris oscuro, y areniscas de estratificación delgada a mediana. La microfauna de la Formación Lampazos conformada por foraminíferos planctónicos, calpionelidos, foraminífero bentónico, ostrácodos, y radiolarios calcificados, son muy evidenciados por ambientes neríticos externos a pelágicos. La Formación Los Picachos se divide en tres partes: la parte inferior de conglomerado calcáreo con clastos de caliza fosilífera, e intercalaciones con estratos de arenisca y lutita. La parte de en medio consta de una alternancia de caliza fosilífera, lutita, conglomerado y arenisca. La parte superior está compuesta de calizas y lutitas de estratificación delgada, y de calizas fosilíferas masivas a medianas.

De acuerdo con la fauna y características texturales, Monreal y Longoria (2000b) definieron su ambiente de depósito de aguas someras neríticas. En el Cretácico superior, se tiene discordantemente una unidad que aflora en la Sierra Los Chinos, se define como una unidad de carácter volcanosedimentario, y está caracterizada por limolitas y areniscas arcillosas de color gris bronceado claro a rojizo, con intercalaciones de tobas y aglomerados

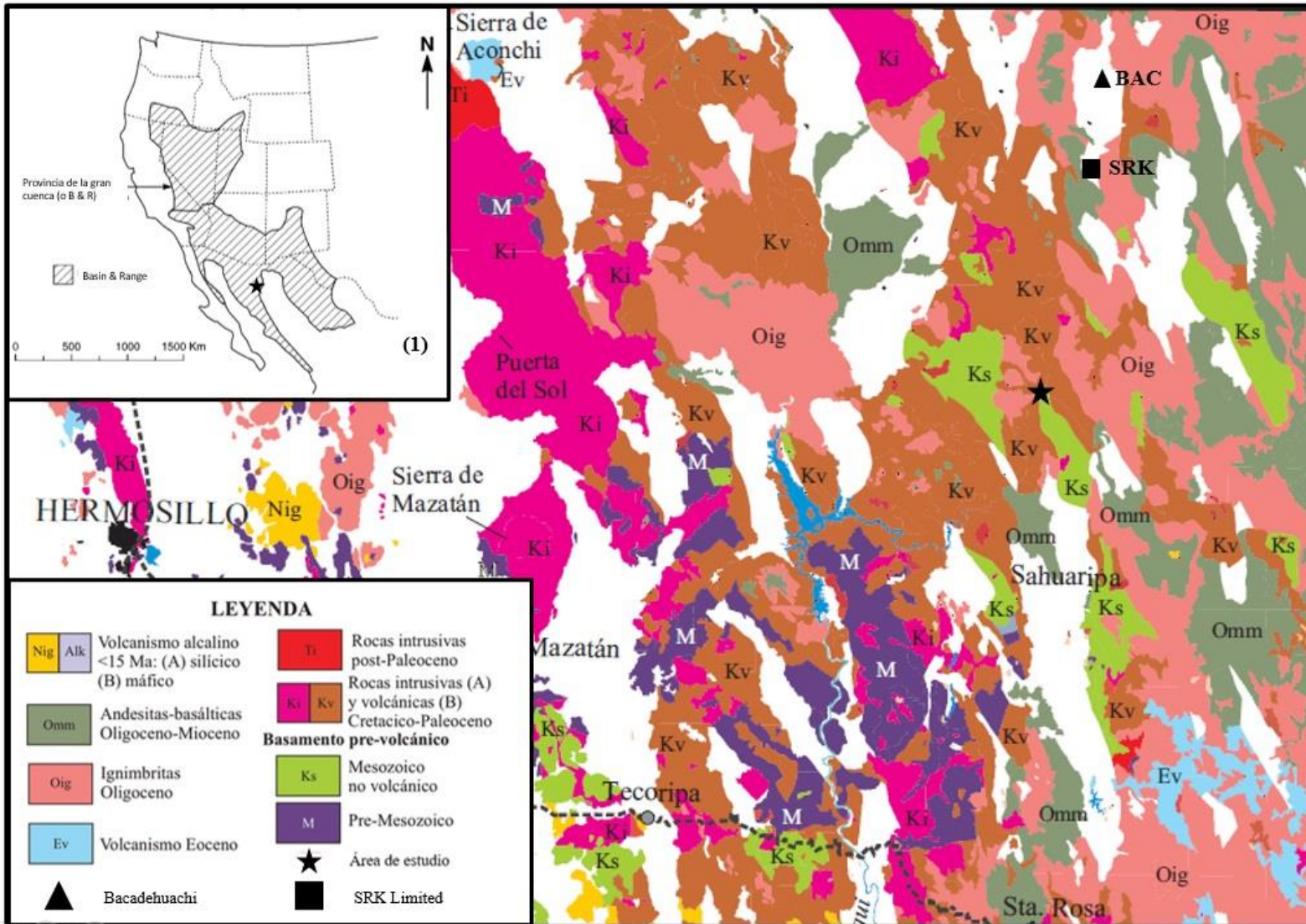


Figura 3.1. Mapa geológico regional (Ferrari et al., 2005). (1) Recuadro interior muestra la Provincia Basin and Range y la ubicación del área de estudio con una estrella (Tomado de Bagtzoglou y Amvrossios, 2003). Explicación, BAC: Bacadehuachi; SRK: SRK Limited Proyecto Bacanora Lithium.

de color gris morado y gris verdoso, con andesitas claras bronceadas. En el Triásico tardío, empieza la subducción de la antigua placa oceánica Farallón debajo del continente de América del Norte, cuando apenas estaba empezando a separarse el supercontinente de Pangea (Dickinson, 2009). Para el final del Cretácico, hace aproximadamente 70 m.a., comienza la deformación Laramide en el oeste de América del Norte generando un gran volumen de rocas plutónicas y la deformación dúctil como lo son los pliegues (Valencia-Moreno *et al.*, 2011), asociados a las rocas cretácicas de la Sierra Los Chinos.

El Cretácico superior es conformado por rocas volcanosedimentarias, posiblemente asociadas con la Formación Tarahumara. Se disgrega en rocas andesíticas, areniscas, tobas andesíticas y calizas. La parte volcánica de la Formación Tarahumara es comúnmente conformada por brechas y aglomerados, así como rocas volcánicas de composición andesítica a latita, con textura afanítica con escasos fenocristales de plagioclasa y con una fuerte piritización, mostrando pequeños cristales de pirita en toda la formación (Wilson y Rocha, 1949). En la Sierra Los Chinos, se reporta que la unidad vulcanosedimentaria se compone de limolitas, areniscas de estratificación delgada con intercalaciones de tobas, aglomerados y andesitas. La parte superior, se conforma por una secuencia de limolitas intercaladas con calizas, areniscas y lentes de conglomerados; la parte media de areniscas arcillosas, calizas margaceas, limolitas y tobas arenosas con algunas andesitas y aglomerados, mientras que en la parte inferior se tienen limolitas con nódulos arenosos y areniscas tobáceas color rojo-café (Monreal y Longoria, 2000b).

Pubellier (1987), interpreta que en el área de Sahuaripa-Arivechi se desarrollaron 4 eventos tectónicos importantes que se describen de manera muy resumida; el primero en el Jurásico dado por el depósito de clastos gruesos de conglomerados en el Cretácico inferior, la segunda, responsable del cabalgamiento de unidades Mesozoicas, con una base Paleozoica sobre rocas del Cretácico inferior con transporte hacia el nor-noreste; otra fase en el Paleógeno con pliegues recostados hacia el suroeste, producto de la orogenia Laramide, y la última fase constada por dos eventos extensionales que parten desde el Mioceno.

3.2 Paleógeno

En Sonora, la gran parte de la porción central es dominada por una geología del Cretácico-Paleógeno conformada del arco magmático que produciría grandes cantidades de rocas plutónicas de composición granítica-granodiorítica, así como de cuarzomonzonita, a su vez también, en su versión extrusiva que después serían agrupadas con el Complejo Volcánico Inferior (CVI) (McDowell y Keizer, 1977). Damon *et al.* (1983) dijo que las rocas plutónicas en esta región del noroeste tienen un rango de edades de entre 90 a 40 m.a. Estos cuerpos cortan gran parte de las litologías descritas anteriormente. Sobreyaciendo al CVI por inconformidad, en el Oligoceno-Mioceno se deposita el “Supergrupo Volcánico Superior”, compuesto de más rocas piroclásticas como ignimbritas y tobas (McDowell y Keizer, 1977). Estas se encuentran como secuencias de grandes espesores compuestas de ignimbritas, intercalaciones con lavas, tobas y sedimentos retrabajados y tobáceos que forman morfológicamente estas sierras de la SMO (McDowell y Clabaugh, 1979).

Todo este vulcanismo bimodal, con grandes volúmenes de ignimbritas silíceas, indica que la Formación de la SMO estuvo llevada de la mano por procesos de asimilación y cristalización fraccionada en gran escala, para poder formar estos grandes volúmenes de magmas félsicos (Figura 3.1, Ferrari *et al.*, 2005).

En el Mioceno temprano, se tienen las rocas de la suite SCORBA, que se definen como coladas Basáltico-Andesíticas intercaladas después de cada pulso ignimbrítico asociadas a la *suite* de Andesitas Basálticas Sur Cordilleranas o SCORBA, por sus siglas en inglés. Las rocas SCORBA se depositaron en el ambiente extensional que se empezaba a formar en el *Basin and Range*. Petrográficamente son lavas afíricas a porfíricas con fenocristales de plagioclasa, augita, ortopiroxeno, olivino y óxidos de Fe (Cameron *et al.*, 1989).

4 Geología de la región Norte de Sahuaripa, Sonora

4.1 Litología

El área comprende varios grupos o tipos litológicos, formaciones, estructuras, y secuencias que van desde el Cretácico inferior hasta el Paleógeno. Según el Servicio Geológico Mexicano, en el área de estudio afloran rocas sedimentarias, volcanosedimentarias, volcánicas e intrusivas con edades que varían entre el Cretácico inferior-Terciario Paleoceno y el Cuaternario. En la porción oriental de la sierra Los Chinos afloran rocas sedimentarias marinas de edad Aptiano-Albiano. La deformación dúctil-frágil asociada posiblemente a un evento de deformación compresiva mesocretácica, se manifiesta en forma de pliegues orientados noroeste-sureste en las rocas sedimentarias marinas del Aptiano-Albiano de la sierra Los Chinos. En el Cretácico superior-Paleoceno se depositó una secuencia de rocas volcanosedimentarias constituidas por andesita, aglomerado volcánico andesítico, toba andesítica y escasa toba riolítica, riolita, lutita, arenisca, caliza y conglomerado de la Formación Tarahumara. El contacto con las rocas más antiguas es discordante y por falla normal y están intrusionadas por las rocas del batolito laramídico y pórfidos asociados, y cubiertas discordantemente y en contacto tectónico por las rocas volcánicas y sedimentarias del Terciario. Las unidades anteriores están afectadas por intrusiones de granito y granodiorita de edad Paleoceno-Eoceno, que conforman parte del batolito laramídico, ampliamente distribuido en Sonora. En el área de estudio está expuesto un pórfido cuarzomonzónico del Eoceno que intrusiona a las unidades más antiguas, afectado por alteración hidrotermal y al igual que las rocas del batolito, está se asocia a la mineralización polimetálica con oro en la región. El arco del Eoceno se ha considerado como un evento magmático aparte. Estas rocas se encuentran representadas por un paquete de dacita-riolita. El Oligoceno está representado por rocas volcánicas de composición riolítica, constituidas por toba riolítica, toba lítica y cristalina, lavas y brechas riolíticas. La deformación frágil se manifiesta como dos sistemas de fallas normales de edad terciaria, posiblemente Oligoceno-Mioceno, asociadas al evento extensional de Sierras y Valles. Un sistema presenta orientación NW-SE, que corta y desplaza a otro con rumbo NE-SW. El contacto con las rocas anteriores es discordante y por falla normal, con la Formación Báucarit. Los sedimentos continentales del Pleistoceno incluyen conglomerado polimíctico

y arenisca débilmente consolidados, que afloran únicamente en la porción sur (Gaytán-García *et al.*, 2011).

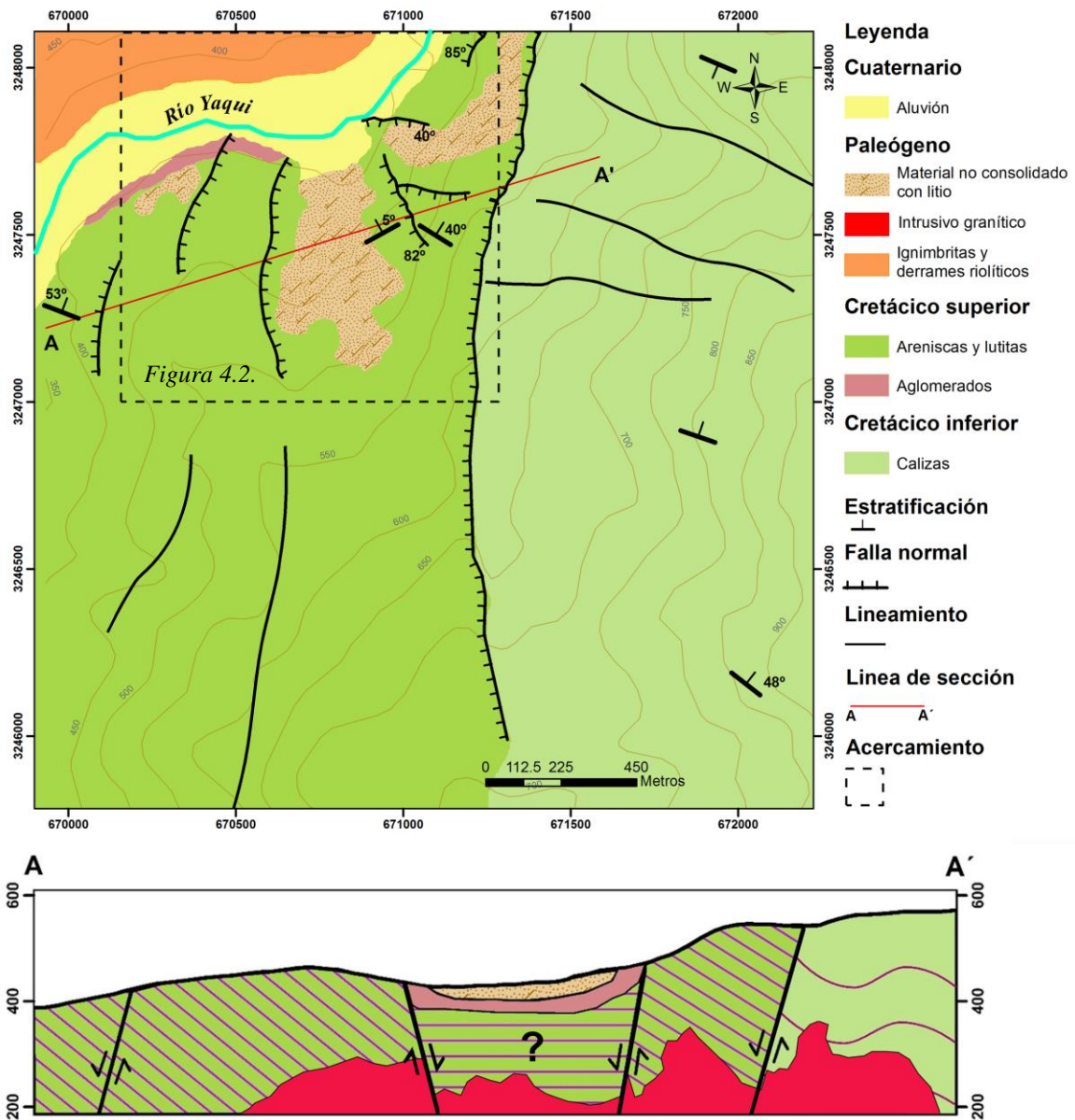


Figura 4.1. Mapa geológico del área de estudio escala 1:15,000 y sección geológica-estructural (Modificado de Santa María Díaz y Monreal, 2008).

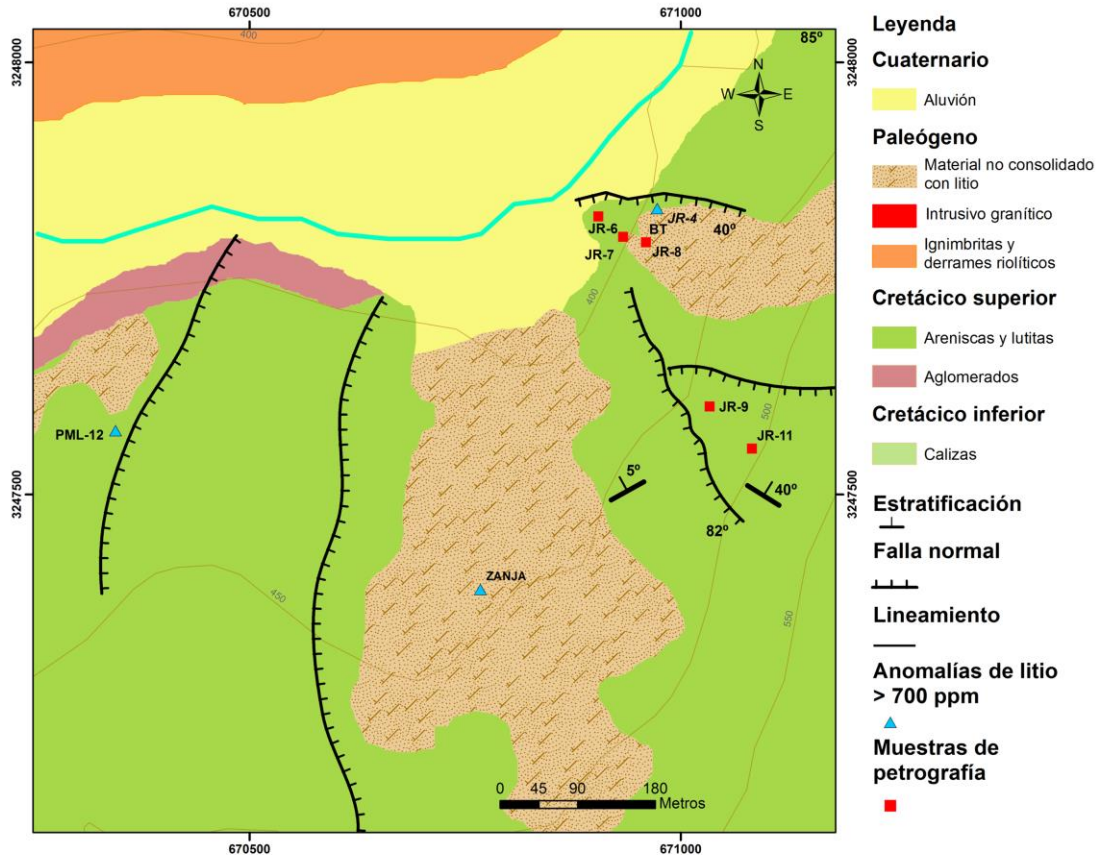


Figura 4.2. Mapa de la ubicación de las muestras petrográficas y geoquímicas (Modificado de Santa María Díaz y Monreal, 2008).



Figura 4.3 Panorámica desde el Rio Yaqui mirando hacia el NE 20 grados, sección de la Formación Lampazos y la unidad Cretácico vulcanosedimentaria compuesta por rocas sedimentarias y volcánicas.



Figura 4.4. Foto panorámica mirando hacia el noreste, de la formación Lampazos, la línea punteada discontinua de color roja corresponde a la actitud de la estratificación.

4.1.1 Cretácico inferior

En el área de la Sierra Los Chinos, en el Cretácico inferior se tiene a la formación Lampazos, que consta de calizas con estratificación gruesa (Figura 4.2). La Formación Lampazos consiste en una alternancia entre calizas nodulares, lutitas color gris oscuro, y areniscas de estratificación delgada a mediana. La microfauna de la Formación Lampazos conformada por foraminíferos planctónicos, calpionelidos, foraminífero bentónico, ostrácodos, y radiolarios calcificados, son muy evidenciados por ambientes neríticos externos a pelágicos (Monreal y Longoria, 2000b). La caliza generalmente presenta un color gris oscuro y textura micrítica en muestra de mano, es visible en la secuencia una estratificación de mediana a delgada con intercalaciones de lutita y arenisca (Gaytán-García *et al.*, 2011).

4.1.2 Cretácico superior

El Cretácico superior, está representado por una secuencia vulcanosedimentaria correlacionada con la Formación Tarahumara (Gaytán-García *et al.*, 2011). Esta secuencia, está dominada por lutitas y areniscas de grano fino. Las areniscas presentan laminaciones más gruesas con respecto a las lutitas que también presentan un color azul claro (Figura 4.5). En la bibliografía se reportan algunas zonas en las que esta secuencia está plegada, pero en el campo no se identificó alguna estructura de plegamiento, posiblemente por la escala de esta deformación (Santa María Díaz y Monreal, 2008). En los afloramientos de esta secuencia, siempre se encuentra basculada, con un echado entre 40°-50° (Figura 4.5).

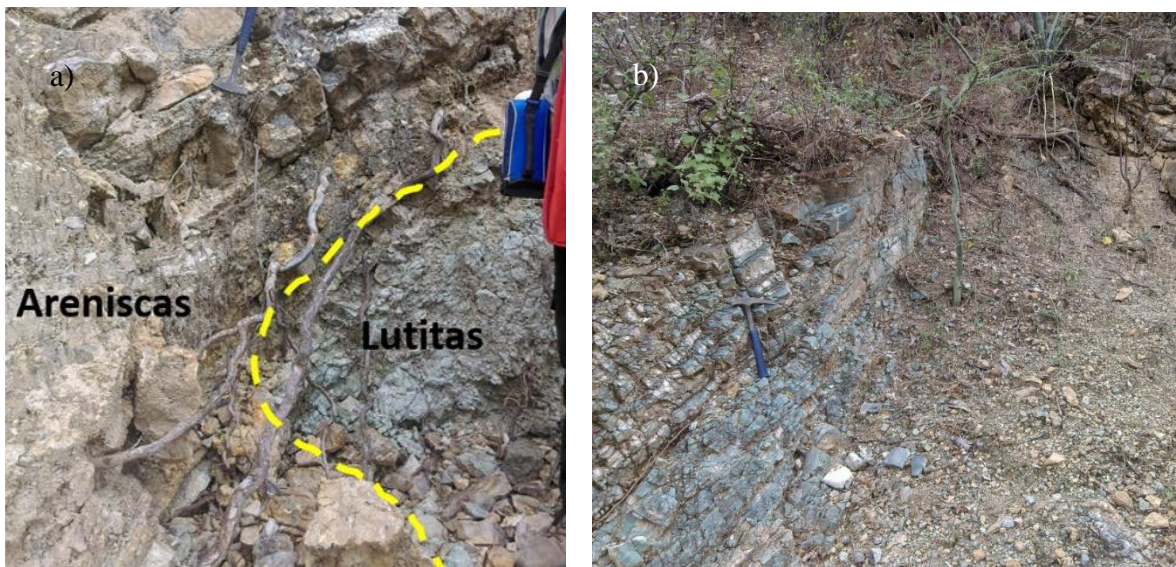


Figura 4.5. a) Transición (con línea amarilla) de areniscas (parte superior) a lutitas (parte inferior); b) Capas de lutitas color azul basculadas 40°

Pocas zonas del área de estudio exhiben lavas dacíticas interestratificadas con rocas sedimentarias. Sin embargo, es posible encontrar flujos laminados como el que se aprecia en la muestra JR-11 (Figura 4.6), que corresponde a esta unidad de composición dacítica. Este flujo, presenta óxidos de hierro y calcita en fracturas rellenas a nivel de afloramiento. Microscópicamente y a nivel afloramiento, se observa una textura fluidal, constituida mineralógicamente por plagioclasas sódica de 0.1 milímetros, feldespatos potásicos de 0.5 milímetros, y cuarzo de 0.05 milímetros (Figura 4.7). A nivel de afloramiento, se observan fracturas irregulares de grosor de 0.1 milímetros, rellenas de óxidos de hierro.



Figura 4.6. Muestra de mano JR-11, que corresponde a la Unidad Dacita. Se observa en superficie fresca un flujo laminado. Presenta fracturas irregulares rellenas de óxidos de hierro(hematita) y calcita, las cuales cortan la estructura primaria (flujo).

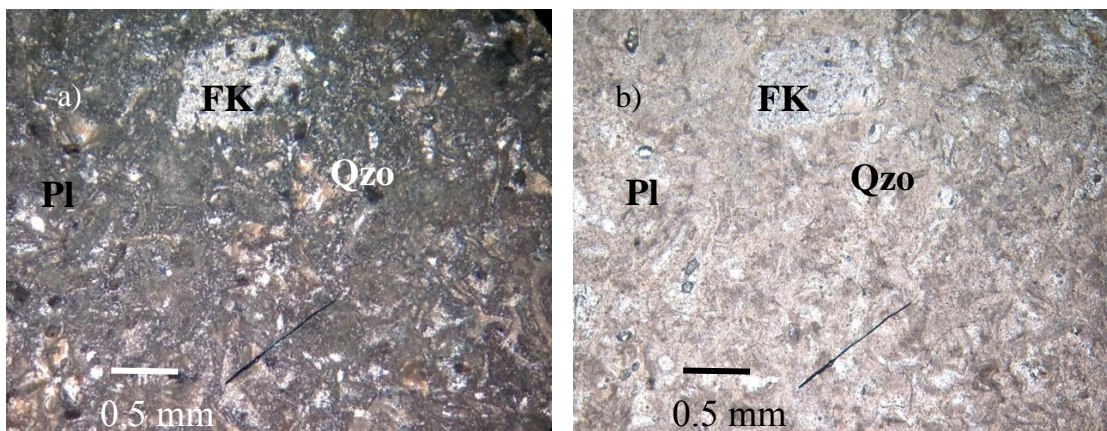


Figura 4.7. Fotomicrografía de Unidad Dacita (Muestra JR-11): a) tomada con luz polarizada, y b) tomada con luz natural. Flujo de composición dacítico-riolítico con poca plagioclasa(Pl) y algunos cristales de sanidino, tomado con el objetivo de 4x de la muestra JR-11, en la cual se observan cristales de feldespato potásico(Fk) alterándose a arcillas, óxidos de hierro(Ox) y silicificación (para mayor detalle ver Tabla 6 en anexos).

La porción volcánica de esta secuencia vulcanosedimentaria, está representada por aglomerados. Estos aglomerados, principalmente muestran fragmentos de rocas volcánicas de composición riolítica-andesítica, y que llegan a medir entre 20 y 30 centímetros en su eje largo (Figura 4.8a). En la parte noroeste del área de estudio, los aglomerados parecen estar parcialmente alterados, presentando una coloración muy oscura con tonalidades verdes, probablemente alterado a clorita. Probablemente la asociación de clorita con menor calcita y óxidos de fierro corresponde a la alteración propílica. (Figura 7.8b).

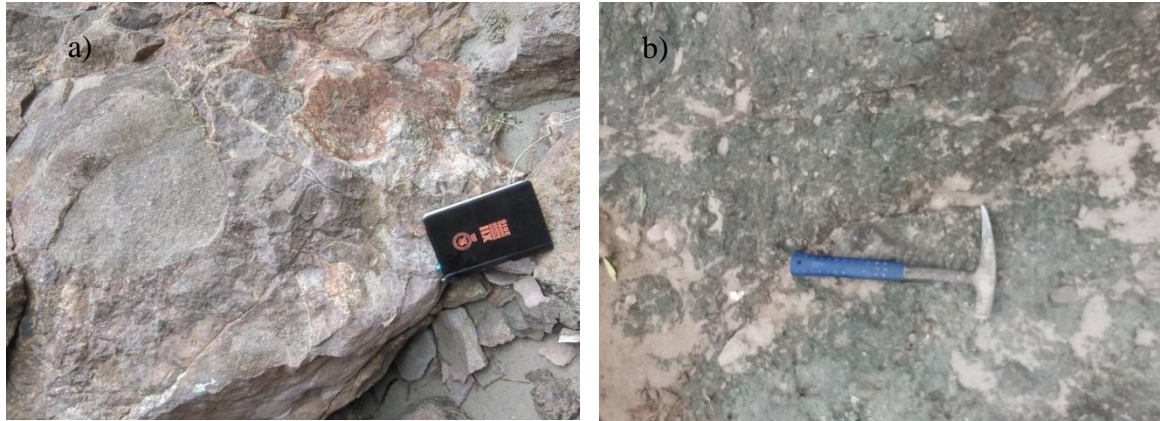


Figura 4.8. Afloramiento con un espesor de 5 a 7 metros de la unidad Aglomerado: a) Afloramiento de la unidad de aglomerado mostrando fragmentos de rocas; y b) afloramiento de la unidad aglomerado, parcialmente alterado a clorita.

A continuación, se mencionan algunas observaciones petrográficas de algunas muestras de la unidad Aglomerado. El aglomerado es de color pardo rosado, con abundante óxido de hierro y fragmentos que en promedio varían de entre 1 a 2 centímetros. Los fragmentos pueden llegar a medir 10 centímetros. Los fragmentos de rocas volcánicas contienen cristales euhedrales que pueden ser visibles y en promedio alterados pseudomorfo a arcillas y hematita. Las fracturas están rellenas de calcita y óxidos (Figura 4.9).

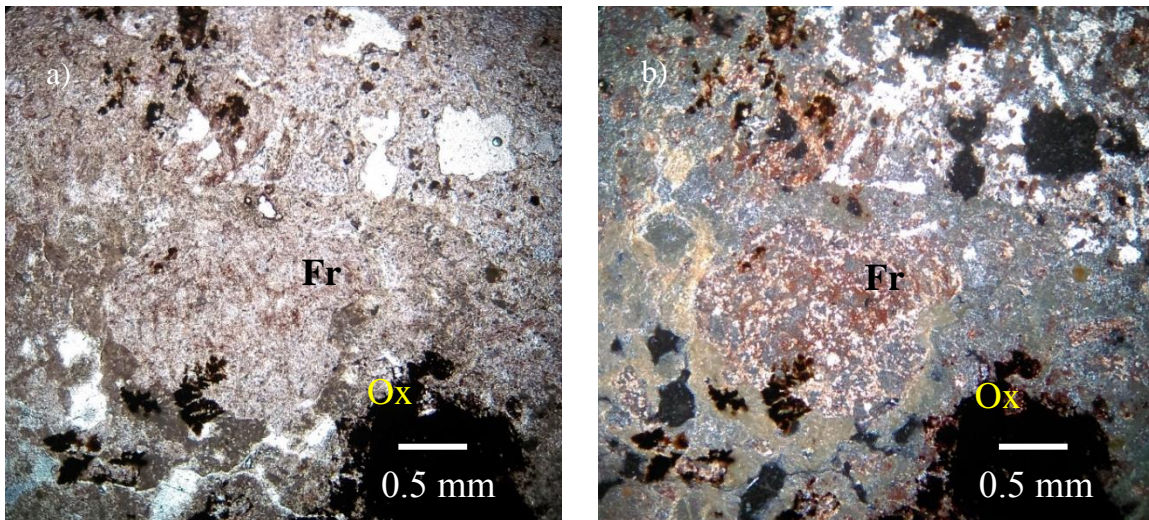


Figura 4.9. Fotomicrografía de un aglomerado o brecha volcánica de la unidad Aglomerado. Foto tomada con el objetivo de 4x de la muestra BT que corresponde a la unidad Aglomerado del Cretácico superior en a) luz natural y b); luz polarizada con abundantes minerales opacos como hematita(Ox) y fragmentos de roca (Fr), (para mayor detalle ver Tabla 6 en anexos).



Figura 4.10. Foto de afloramiento de la Unidad Andesita que corresponde a una roca volcánica de composición andesítica del Cretácico superior.

A lo largo de algunos afloramientos del Rio Yaqui, al sur del área de estudio, aflora otra unidad volcánica de composición andesítica (Figura 4.10), con una extensión aproximada de 5 metros, que posiblemente subyace a la unidad de aglomerados. La unidad de andesita porfídica contiene fenocristales de feldespato potásico, plagioclasa y anfíbol. El tamaño de los cristales varía entre 1-2 milímetros, por lo que se asignó el carácter de una roca ígnea extrusiva de composición intermedia. Otra característica petrográfica es que presentan vetillas de calcita con espesores aparentes de 0.1 milímetros (Figura 4.11.b).

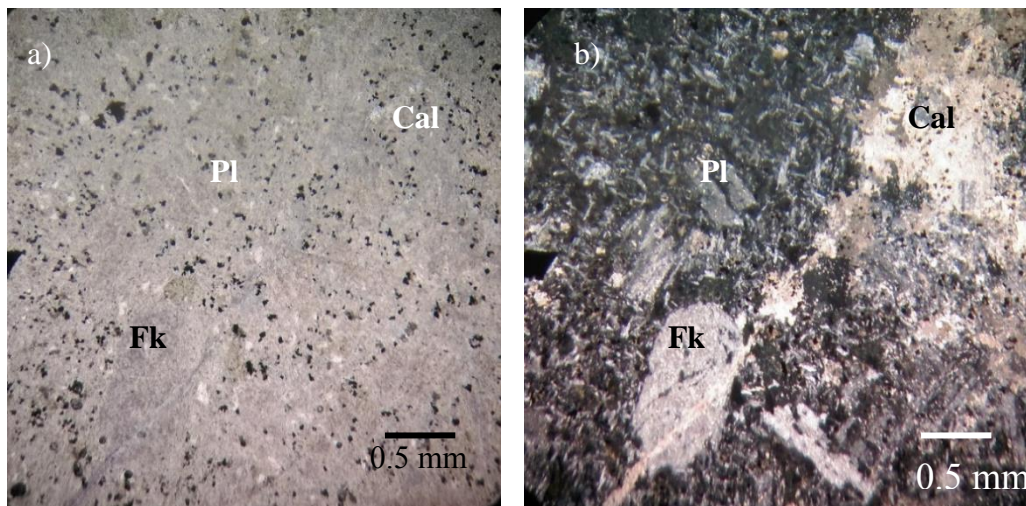


Figura 4.11. Fotomicrografía de la muestra JR-16 que corresponde a la unidad de andesita porfídica. Objetivo de 4x en a) luz natural y b) luz polarizada. Presentan fenocristales de feldespato potásico (Fk), plagioclasa (Pl) y minerales secundarios como calcita (Cal) en vetillas, (para mayor detalle ver Tabla 6 en anexos)..

La alteración presente en la muestra JR-16 es moderada, con presencia de calcita, clorita, epidota, y cristales secundarios de pirita y arcillas. Las estructuras de vetillas muestran un grosor aparente de 0.1 a 0.3 milímetros.

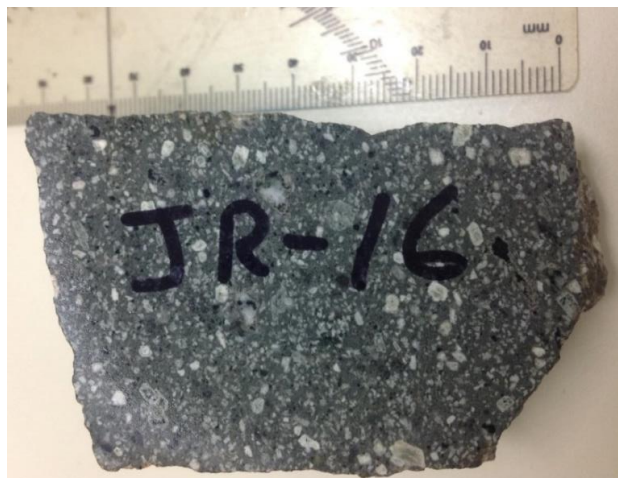


Figura 4.12. Foto de la muestra JR-16 correspondiente a la Unidad Andesita. Asociación mineral de FA > Pl > Qzo > Anf con abundantes fenocristales de FA que promedian 0.5 centímetros de tamaño.

En una zona del Rio Yaqui aflora un basalto porfídico, (Figura 4.14), ligeramente vesicular, con plagioclasa cálcica y una débil alineación de fenocristales indicando la textura fluidal. Un basalto con mineralogía primaria de Pl > FA > Ol > Ox Fe y mineralogía secundaria de Cl + Ep + Cal. El tamaño de los fenocristales de plagioclasa varía entre 0.1 milímetros a 0.5 milímetros, los piroxenos y otros accesorios como olivino y magnetita están en el rango de 0.1 milímetros a 0.05 milímetros (Figura 4.13). La alteración principal de calcita sigue presente, lo más abundante es magnetita y hematita. Esta unidad litológica es afectada por fallamiento de tipo normal el cual presenta espejo de falla con estrías.

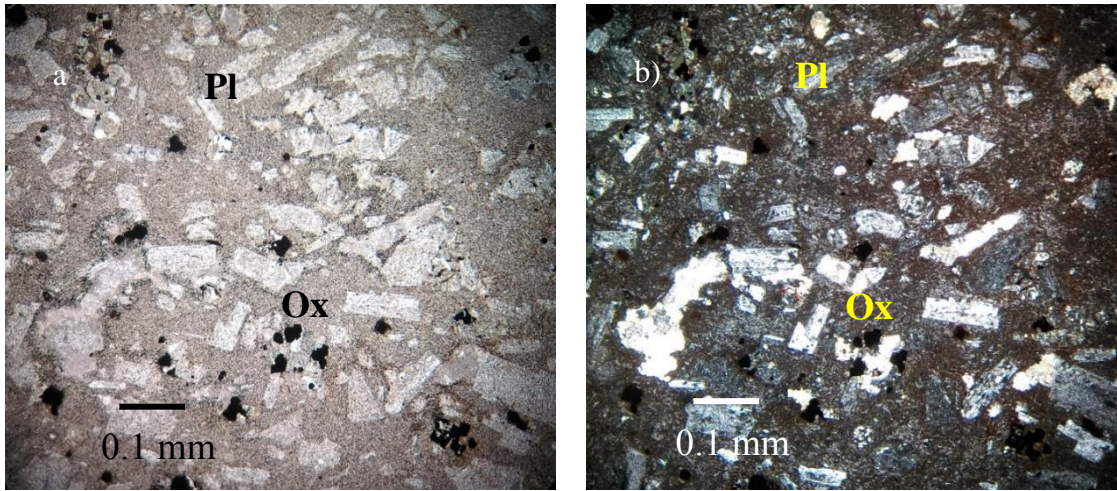


Figura 4.13. Fotomicrografía de la muestra JR-6 perteneciente a la Unidad Basalto, tomada con el objetivo de 10x: a) Fotomicrografía de un basalto en luz natural donde se aprecia cristales de plagioclasa cálcica (Pl) y óxidos de hierro (Ox) y b) fotomicrografía de un basalto en luz polarizada mostrando una matriz oxidada, (para mayor detalle ver Tabla 6 en anexos).



Figura 4.14. Foto del afloramiento de la unidad Basalto. Muestra una superficie planar que corresponde a un espejo de falla con estrias medibles y óxidos de hierro.

4.1.3 Paleógeno

4.1.3.1 Granitoides

En campo, las relaciones de corte marcan que este dique hipabisal es más joven que la unidad del Cretácico vulcanosedimentario. La mineralogía primaria corresponde a una roca intrusiva de composición granodiorítica con intensa alteración incluyendo la alta presencia de arcillas, aun así, se lograron identificar cristales de cuarzo de 0.4 milímetros, plagioclasa de 0.5 milímetros, feldespato potásico de 0.5 centímetros, biotita de 0.2 centímetros, anfíboles y piroxenos de alrededor de 0.3 milímetros (Figura 4.15).



Figura 4.15. Foto de espécimen de la muestra JR-9 que corresponde a la unidad Granodiorita. Corte con superficie fresca del intrusivo granodiorítico hipabisal, donde se aprecia el tamaño de los fenocristales y la coloración salmón producida por una fuerte alteración a arcillas.

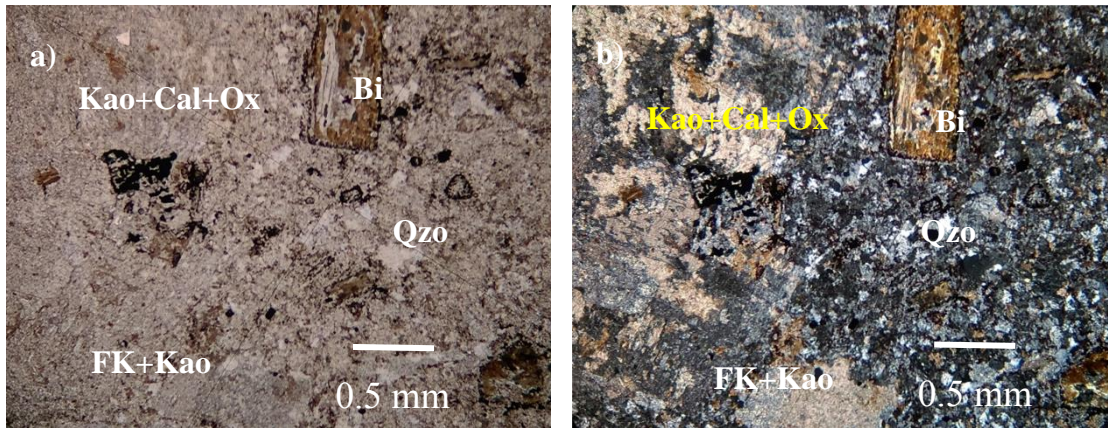


Figura 4.16. Fotomicrografía de la muestra JR-9 que corresponde a la unidad Granodiorita. Tomada con el objetivo óptico de 4x en a) luz natural y b) luz polarizada. Se muestra la mineralogía esencial como cuarzo (Qzo), plagioclasas (Pl), biotita (Bi) y feldespato potásico (Fk) y mineralogía secundaria de calcita (Cal), arcillas (Kao) y óxidos (Ox). Para mayor detalle ver Tabla 6 en anexos.

La alteración es moderada con cristales de calcita reemplazando a plagioclasas y feldespatos, alterados a arcillas. También se presentan bordes de oxidación en los fenocristales de biotita y anfíboles (Figuras 4.16 y 4.17).

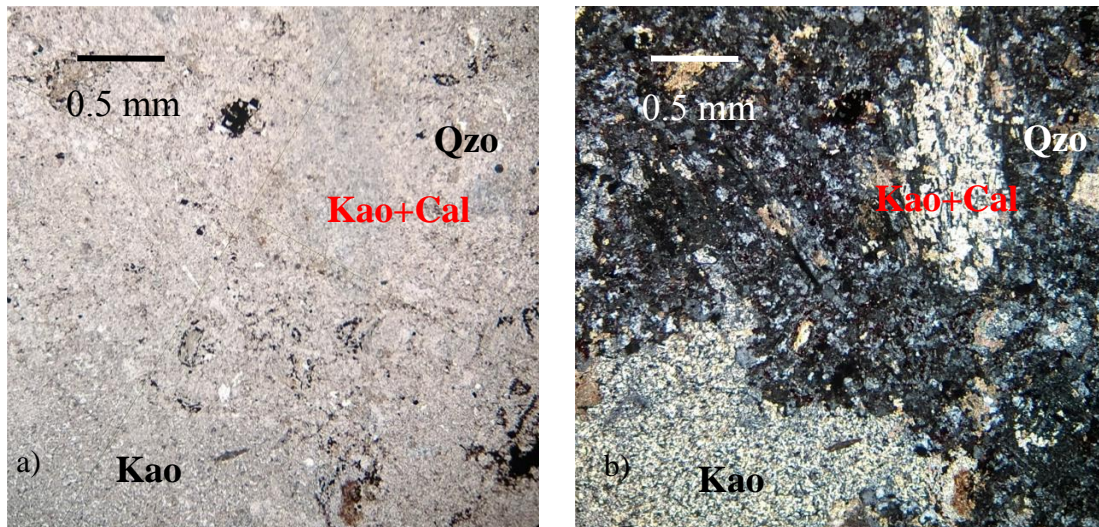


Figura 4.17. Fotomicrografía de la muestra JR-9 que corresponde a la unidad Granodiorita. Tomada con el objetivo de 4x a) luz natural y b) luz polarizada. Muestra cristales de feldespato alterándose en su totalidad a arcillas y plagioclasas alterándose a calcita. También se observan pocos fantasmas de anfíboles, (para mayor detalle ver Tabla 6 en anexos).

4.1.3.2 Ignimbritas y derrames riolíticos

Del otro lado del Río Yaqui afloran ignimbritas y derrames riolíticos que no se pudieron describir, debido a que no fue posible acceder al lugar donde afloran. Según Gaytán-García *et al.*, (2011), son un paquete de dacitas-riolitas del eoceno y que se encuentran falladas y en contacto con unidades más antiguas. En el área de estudio, se describe una unidad de riolitas-dacitas del eoceno que consisten en una secuencia de rocas volcánicas representadas por dacitas, tobas andesíticas, riolitas, areniscas tobáceas y en menor proporción ignimbritas; presentan alteración hidrotermal como argilización, sericitización, silicificación, y supergénica representada por oxidación.

4.1.3.3 Suelos con anomalías de litio

Los suelos se diferencian en 5 capas principales, estas son llamadas horizontes O, A, B, C y K. En el área de estudio se reconocieron los horizontes tipo B y C. Los suelos son la capa superficial de la corteza terrestre compuesto de minerales, rocas, materia orgánica, organismos vivos, agua y aire. El suelo tipo B se caracteriza por la acumulación de arcillas y materia orgánica; y el tipo C por clastos de la roca madre (Bienes y Ramón, 2009). Los suelos en el área de estudio, donde se identificaron las anomalías de litio, se caracterizan por presentar un color crema, con algunos cristales de yeso y calcita (Figura 4.18, 5.4c), siendo muy deleznable, aunque puede presentarse en formas consolidadas con cavidades producto de restos de raíces. Por otro lado, en el material deleznable se encuentran raíces intactas (Figura 4.19b). Este material poroso se clasifica como suelo del horizonte tipo C, con fragmentos de rocas del basamento u otras del área, como calizas, aglomerados, y andesitas. Varios de estos depósitos deleznales no consolidados contienen entre 900 a 1,000 ppm de litio (Figura 4.19 a). Para fines prácticos de empate del material de suelo con los geoquímicos, las imágenes representativas del suelo, incluyendo la petrografía, podrán consultarse en la Figura 5.4.



Figura 4.18. Suelo tipo C que corresponde a la Unidad de material no consolidado con matriz calcárea, minerales blancos de yeso y clastos de otras rocas.

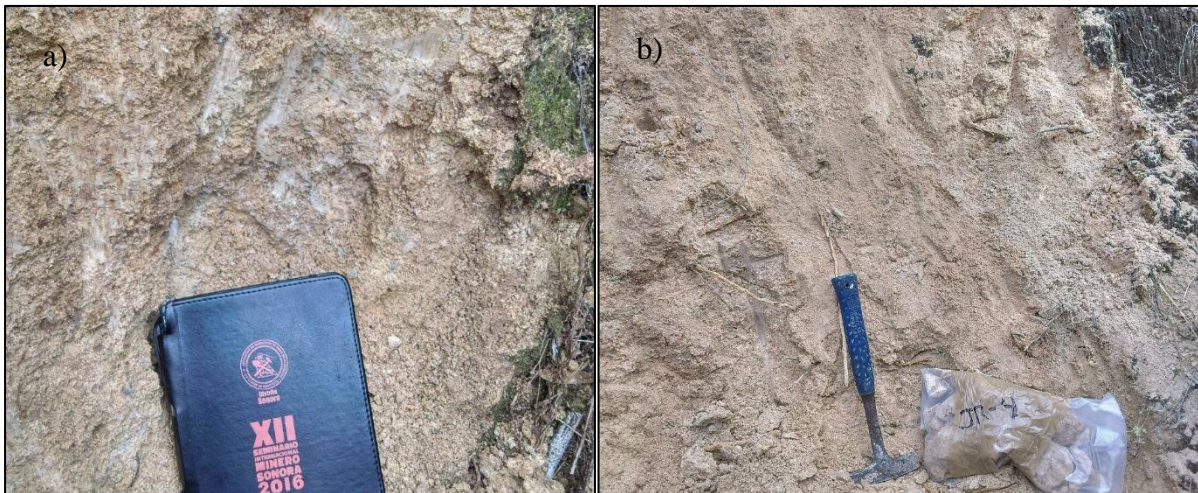


Figura 4.19. Suelos tipo B pertenecientes a la Unidad de material no consolidado: a) Suelo con material rico en yeso, carbonatos y un poco de materia orgánica. Contiene anomalías de 1000 ppm de litio. b) Otro horizonte rico en litio y raíces de vegetación.

5 Resultados

5.1 Geoquímica

En este trabajo, se emplearon métodos geoquímicos para establecer un análisis mineralógico y las concentraciones de los elementos químicos en suelos y rocas. Para el análisis mineralógico, se utilizó la técnica de difracción de rayos X, con el difractómetro del Departamento de Geología de la Universidad de Sonora, marca Bruker, Modelo Advance D8, con el filamento de cobre ($\text{Cu K}\alpha \sim 1,5406 \text{ \AA}$). Para la determinación de las concentraciones se utilizó el analizador SpectroScout, un espectrómetro de fluorescencia de rayos X por energía dispersiva (ED-XRF) portátil de Spectro Analytical y el Analizador Vanta de fluorescencia de rayos X (XRF) portátil de Olympus.

5.1.1 Difracción de Rayos X (DRX)

5.1.1.1 Técnica analítica de difracción de rayos X

La difracción de rayos X es una de las técnicas más ampliamente utilizadas en geología para identificar minerales, especialmente minerales de carácter arcilloso. Esta técnica complementa muy bien el análisis petrográfico. La difracción, se basa en la interferencia de un haz de rayos X con la red cristalina. Las longitudes de onda empleadas dependen del metal utilizado en la fuente, siendo el más común el cobre ($\text{Cu K}\alpha \sim 1,5418 \text{ \AA}$). Se toma un filamento de cobre que se encuentra en un tubo al vacío, al que se le induce una corriente de alto voltaje, haciendo que los electrones se aceleren y produzcan rayos X. Cuando este rayo interactúa con la estructura cristalina de los materiales, ocurre una dispersión de los mismos rayos que inciden sobre la muestra. La relación entre la longitud de onda y el ángulo de difracción está dada por la ley de Bragg, que se expresa por la siguiente ecuación: $n\lambda = 2d \sin \theta$, que describe la dirección en la que un haz de rayos X es reflejado o difractado por los átomos regularmente espaciados en una estructura cristalina (Figura 5.1). En la ecuación, 'n' es un número entero pequeño, λ es la longitud de onda del haz de rayos X incidente; d, la distancia inter reticular o espaciado entre los planos del cristal; y θ es el ángulo de incidencia o de reflexión.

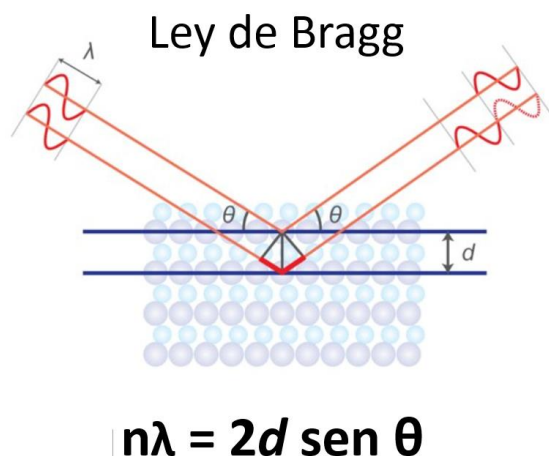


Figura 5.1. Esquema de la ley de Bragg para la difracción de rayos X. (Rigaku, 2022)

El software del equipo de DRX produce un difractómetro registrando los ángulos en los cuales el rayo X es difractado del material, generando un patrón que es manifestado en cuentas o intensidades absorbidas (Pozo *et al.*, 2004). En este trabajo se utilizó el difractómetro del Departamento de Geología de la Universidad de Sonora, marca Bruker, Modelo Advance D8, con el filamento de cobre (Cu $K\alpha \sim 1,5406 \text{ \AA}$).

5.1.1.2 Análisis de difracción de rayos X

Se tomaron muestras de suelo y roca para determinar las fases minerales presentes. De las muestras de suelos, se tomaron 6 muestras (JR-1, JR-3, JR-4, JR-15, S1 y S2), 3 de éstas (JR-4, S1 y S2) poseen valores anómalos de litio. La muestra JR-7 es evidencia de la alteración que afecta a un gran volumen de roca en esa área (Figura 5.2a). En lámina delgada, se observan todos los cristales de plagioclasa totalmente reemplazados a arcillas, que, en este caso, la difracción de rayos X dio como resultado kaolinita (Figura 5.2a). Los otros picos negros del difractograma corresponde a ruido dentro de la muestra. La calcita también está presente como mineral asociado de la alteración. La muestra JR-8 también presenta arcillas, aunque en menor magnitud en comparación con la muestra JR-7 (Figura 5.2b). La muestra JR-4 contiene valores de 950 ppm de litio, en conjunto, todas estas muestras comparten características mineralógicas, no obstante, no todas contienen valores atractivos de litio. La

mayoría de las muestras no se encuentran de manera consolidada, son más parecidas a un suelo semi-consolidado y húmedo. Mineralógicamente todas las muestras son muy similares composicionalmente hablando, ya que contienen yeso, calcita, en ocasiones cuarzo y compuestos de yeso, como el caso de la muestra JR-4 (Figura 5.3c).

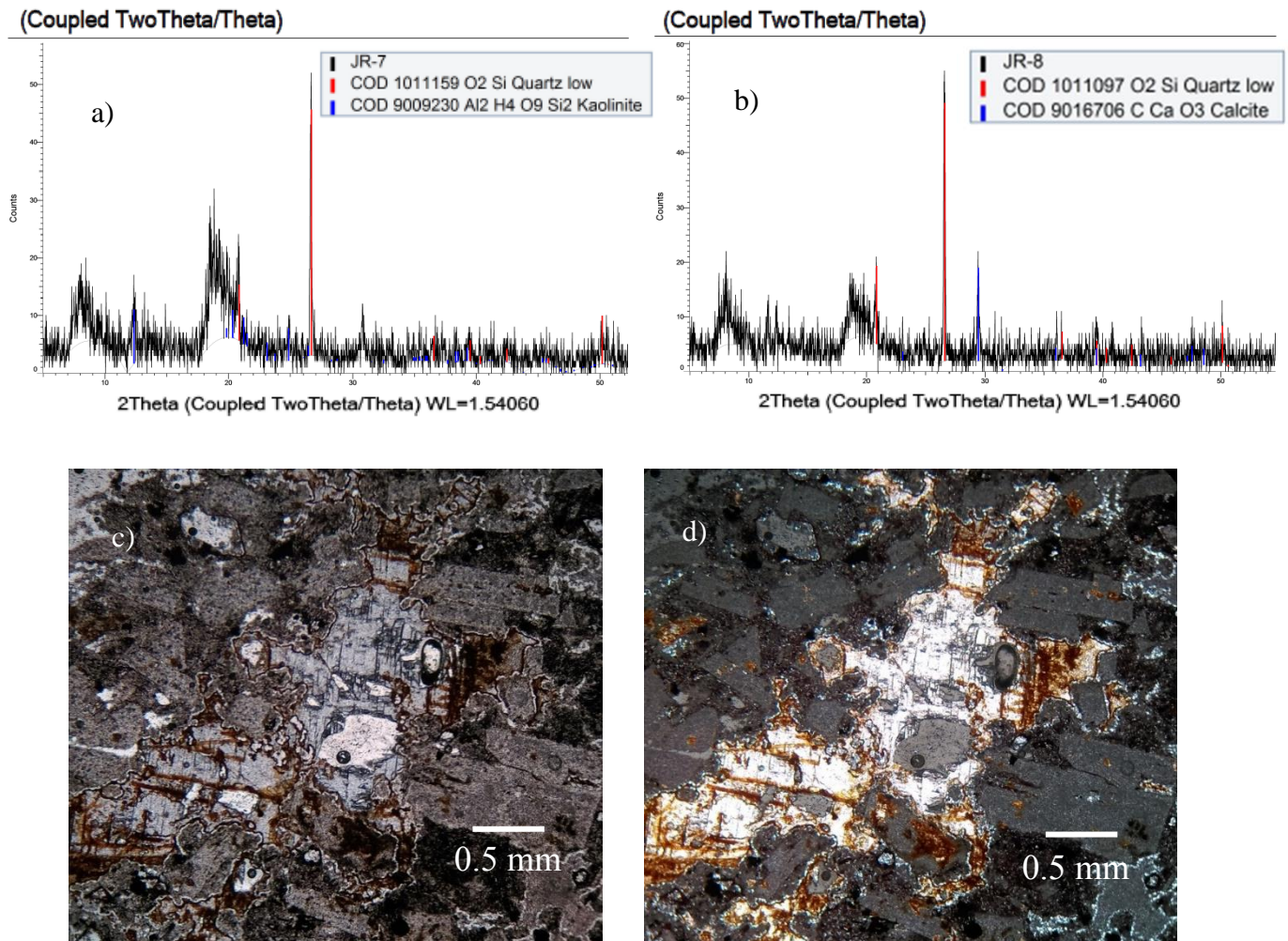


Figura 5.2. Difractograma y fotomicrografía de las muestras JR-7 y JR-8, correspondientes a la unidad Granodiorita: a) y b) difractograma de las muestras JR-7 y JR-8 respectivamente correspondientes a la unidad Granodiorita. El difractograma de la muestra JR-7 dio como resultado una mineralogía de cuarzo bajo y kaolinita, mientras que la muestra JR-8 dio como resultado cuarzo bajo y calcita. c) y d) fotomicrografía de la muestra JR-7 en luz natural y luz polarizada.

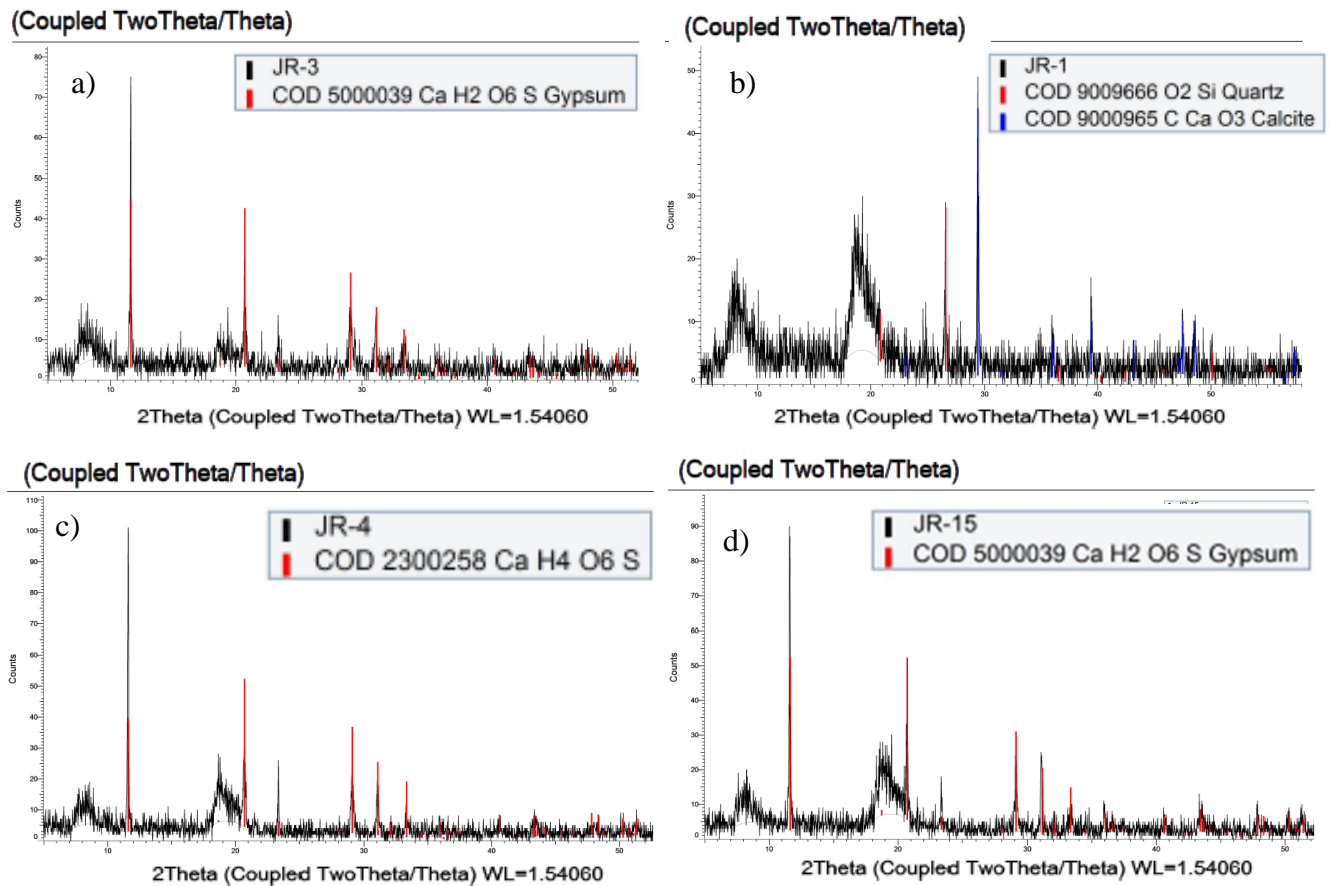


Figura 5.3. Difractogramas de las muestras de suelo JR-1, JR-3, JR-4 y JR-15 correspondientes a la unidad de suelo Material no consolidado. a), b), c), y d) son muestras de la unidad Material no consolidado con características similares a muestras con valores elevados de litio en ppm.

En el difractograma se muestra un espectro con varios picos que pueden corresponder a ruido, si no se muestra en color, mientras que los picos identificados en color azul o rojo corresponden a especies minerales identificadas (Figura 5.2; 5.3; 5.4; 5.5).

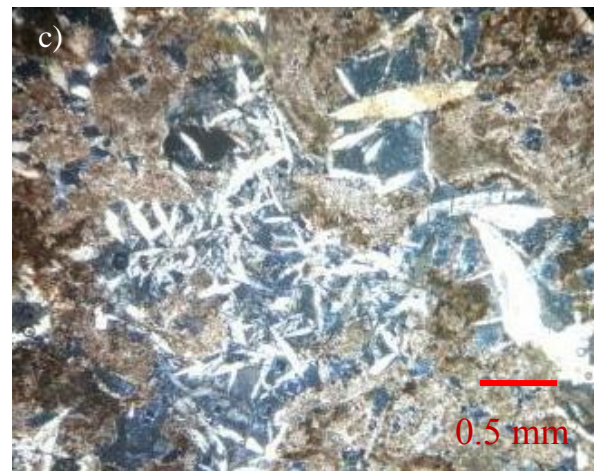
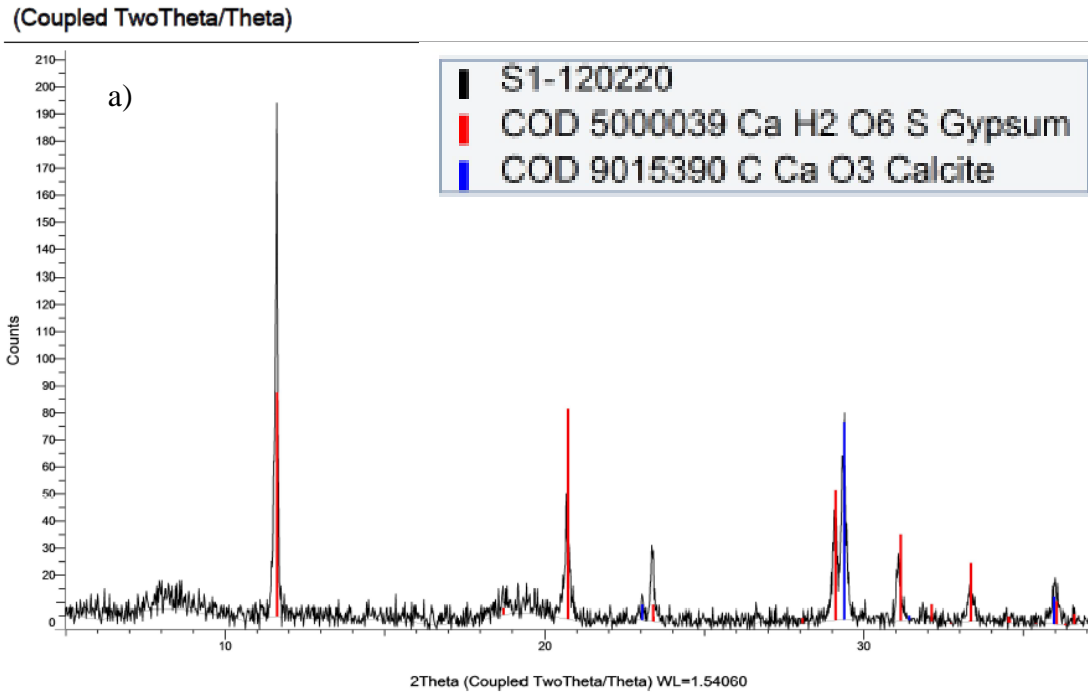


Figura 5.4. Difractograma, foto y fotomicrografía de la muestra S1 correspondiente a la unidad de suelo Material no consolidado. a) Difractograma congruente con la mineralogía de calcita y yeso en la muestra de mano S1, b) fotografía de la muestra de mano S1 mostrando cristales blancos de yeso. c) Fotomicrografía de la muestra S1 con cristales de yeso con habito laminar, perteneciente a la unidad de Material no consolidado.

La mineralogía de las muestras se compone de calcita, yeso y cuarzo. Una característica del yeso es que presenta un habito similar al de la 'rosa del desierto' (Figura 5.4c). La rosa del desierto es un yeso con habito lenticular y es característico de los ambientes sedimentarios evaporíticos (Poch *et al.*, 2010).

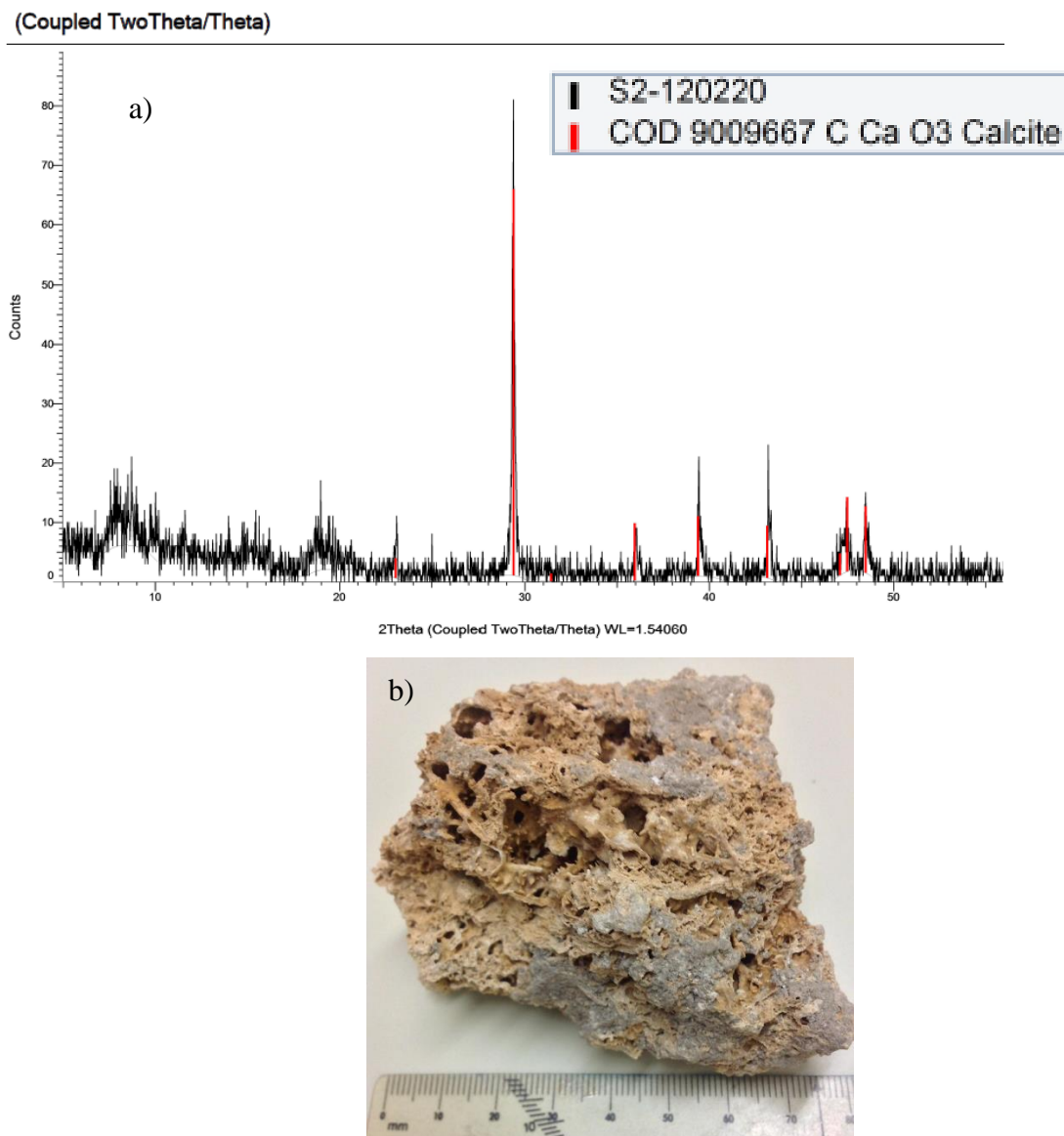


Figura 5.5. Difractograma y foto de la muestra S2 correspondiente a la unidad de suelo Material no consolidado: a) Difractograma de la muestra S2 mostrando una mineralogía esencial de calcita; b) Muestra S2 perteneciente a la unidad Material no consolidado.

La muestra S2 en su mayoría tiene una composición dominada por calcita y yeso. Lo más interesante, son las estructuras fosilizadas de raíces de arbustos (Cannon *et al.*, 1975) (Figura 5.5b). En la muestra S2 se puede apreciar manchas grises que indican una relación con la muestra S1 (Figura 5.5b) (Figura 5.4b). Esta relación es el resultado de rocas ricas en

carbonatos, al ser intemperizadas forman minerales de yeso, mostrando estas manchas de coloración más oscura (Török y Ákos, 2008).

5.1.2 Fluorescencia de rayos X

5.1.2.1 Técnica analítica para la fluorescencia de rayos X

De las 18 muestras, 2 se utilizaron para estudios geoquímicos de las rocas volcánicas, 5 para difracción de rayos X, y las otras 11 muestras para láminas de secciones delgadas. La digestión empleada para las muestras de litio se llama “Digestión multi-ácido de mineral”. En el análisis por fluorescencia de rayos X (XRF) se determina cuantitativamente la composición elemental de los materiales. En espectrometría de XRF, los primeros fotones de rayos X son emitidos para colisionar con los electrones de los átomos que componen a la muestra. Los fotones emitidos colisionan con los electrones de los orbitales internos siendo expulsados del elemento. Cuando colisionan, un electrón de la capa externa tendrá que ingresar hacia el orbital interno emitiendo una energía denominada fotón de rayos X secundario. El rayo X secundario (o fluorescente) son característicos de un material que ha sido excitado al ser «bombardeado» con rayos X de alta energía o rayos gamma. Tanto los rayos X como los gamma pueden ser suficientemente energéticos para desprender electrones fuertemente ligados en los orbitales internos del átomo (Figura 5.6). Tal remoción electrónica deja en condición inestable a la estructura electrónica del átomo, y los electrones de orbitales más elevados caen hacia el orbital energéticamente más bajo, que luego ocupan los huecos de los electrones internos desprendidos. En esta caída, o transición, se libera energía mediante emisión de un fotón. El valor de la energía emitida es igual a la diferencia de energía entre los dos orbitales involucrados. Cada elemento químico emite radiación de forma única y característica permitiendo conocer la composición elemental del material que se analiza. El término fluorescencia se usa para denominar el fenómeno por el cual la absorción de la radiación a una energía específica genera la reemisión de radiación a una energía diferente, generalmente menor.

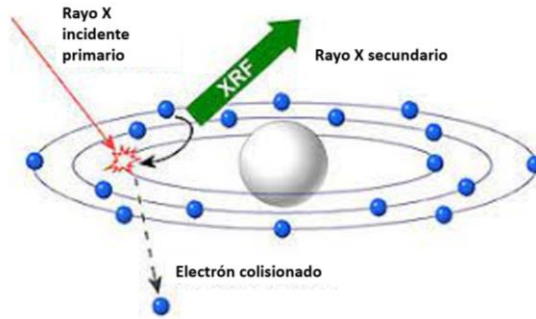


Figura 5.6. Esquema de la fluorescencia de rayos X (Montgomery, 2016).



Figura 5.7. Analizador portátil de fluorescencia de rayos X (XRF) (Vanta).



Figura 5.8. Espectrómetro de fluorescencia de rayos X de energía dispersiva (ED-XRF) SpectroScout, de Spectro Analytical.

5.1.2.2 Análisis de fluorescencia de rayos X

En la mayoría de los análisis de las muestras de suelo (ver tablas 4 y 5), con anomalías alrededor de 1,000 ppm de litio, se puede observar que algunos elementos como el Sr y S mantienen concentraciones muy por arriba o alrededor de 1,000 ppm. Las abundancias de calcio y azufre se deben al contenido de yeso y calcita. Los elementos como el K y Al corresponden a las arcillas presentes como kaolinita y montmorillonita. En los análisis del equipo VANTA Olympus, aparece anomalías de oro de alrededor de 6 ppm (ver tablas 2 y

3), podría ser otro indicio de la actividad geotérmica de Sonora y las anomalías de oro en la región (Almirudis *et al.*, 2018; Gaytán-García *et al.*, 2011).

MUESTRA- ID	S2(SUELO)	S2A(POLVO)	S2B(SUELO)	S2C(SUELO)	JR-9	JR-7	BT	JR-11	JR-16	JR-17
Li	900	900	900	900						
Mg	0	0	0	0	0	0	0	0	2.3992%	1.685%
Al	3615	3004	9310	3935	8.039%	12.262%	10.861%	6.702%	10.164%	9.903%
Si	8575	9440	3.141%	2.1272%	3.0278%	26.796%	25.887%	34.993%	23.372%	23.444%
P	0	0	0	0	763	565	695	0	986	1375
S	6661	3.479%	5.8268%	2.6297%	0	495	192	1121	0	0
K	401	830	2684	1900	2.4664%	1.625%	1.755%	3.590%	8165	7029
Ca	35.555%	14.8028%	29.588%	31.988%	2.5447%	3.3644%	2.938%	4156	3.335%	5.258%
Ti	349	0	882	0	2701	4486	5607	739	5503	6250
V	0	0	0	0	0	175	163	0	204	194
Cr	63	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mn	42	55	84	295	361	374	2453	34	785	576
Fe	1489	1882	6119	11918	2.3823%	3.881%	2.452%	9366	5.261%	4.973%
Co	0	0	0	0	82	93	72	0	172	141
Ni	17	0	14	0	16	14	22	21	31	26
Cu	0	0	0	0	20	27	32	13	32	40
Zn	10	17	17	0	73	101	142	44	53	60
As	3	2	4	7	4	17	20	21	0	0
Se	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Rb	3	5	18	0	98	42	122	149	45	30
Sr	2757	1486	3102	2914	367	395	93	119	764	693
Y	0	0	0	0	10	14	14	13	17	18
Zr	19	0	33	22	158	125	140	115	135	129
Nb	0	0	0	0	0	3	5	6	4	0
Mo	6	4	8	10	0	0	6	4	6	0
Ag	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cd	29	0	29	0	19	0	24	0	0	18
Sn	0	0	0	0	23	0	0	0	0	0
Sb	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ba	0	104	111	113	775	523	274	1146	300	514
La	0	0	0	148	168	0	0	0	0	0
Ce	241	0	210	184	294	272	295	204	0	0
Pr	0	0	311	240	0	0	0	0	0	0
Nd	570	0	0	391	541	0	522	0	0	580
W	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Au	6	0	7	0	0	0	0	0	0	0
Hg	0	0	0	0	8	11	10	8	0	7
Pb	5	0	6	0	17	15	7	17	7	12
Bi	0	64	0	0	0	0	0	0	0	0
Th	0	0	23	42	25	26	18	24	15	13
U	0	0	0	0	0	5	0	11	0	0

Tabla 2. Tabla con concentraciones de elementos en partes por millón resultante del análisis de fluorescencia de rayos x con el equipo VANTA Olympus.

Para este trabajo se utilizaron dos instrumentos de fluorescencia de rayos X. Se utilizó un equipo Vanta Olympus y SpectroScout (Figura 5.8, Figura 5.7). Dan resultados en porcentajes y ppm. Los valores mayores a 10,000 ppm se muestran en valores porcentuales (%). Los resultados obtenidos se muestran en las Tablas 2, 3, 4 y 5.

MUESTRA ID	JR-6	JR-3 (SUELO)	JR-2 (SUELO)	JR-2 (SUELO)	JR-15 (SUELO)	PLM-5 (SUELO)	PLM-2 (SUELO)	JR-4 (SUELO)	S1 (SUELO)	S2 (SUELO)
Li								950	1000	900
Mg	8676									
Al	9.807%							2936	4532	
Si	26.234%							9374	1.706%	
P	981	1907	734	1296	1546	153	1600	0	0	434
S	0	39.183%	33.817%	32.276%	36.413%	943	20.05%	1.087%	3.959%	3.915%
K	1.225%	482	1852	2136	4125	2.332%	1.158%	244	1446	1616
Ca	4.231%	26.857%	25.244%	25.957%	23.458%	21.388%	29.097%	32.28%	30.565%	65.406%
Ti	4913	12	158	205	392	3573	1165	491	0	37
V	109	0	2	4	9	67	17	0	0	0
Cr	0	26	20	20	23	32	29	71	0	14
Mn	394	10	45	53	40	691	180	114	0	52
Fe	4.309%	296	2313	3389	5998	3.983%	1.642%	1614	2777	1731
Co	147	10	12	4	35	126	7	0	0	2
Ni	16	14	13	10	13	22	21	21	16	8
Cu	15	1	0	1	4	22	8	0	0	3
Zn	63	8	15	20	21	58	29	0	12	9
As	4	4	12	13	4	38	12	4	5	3
Se	0	4	2	3	1	2	1	0	0	2
Rb	31	0	8	6	18	76	33	6	6	2
Sr	389	5196	4516	5385	2481	297	2354	3028	2815	3525
Y	19	3	0	4	3	11	2	0	0	0
Zr	149	7	35	19	34	121	61	22	27	23
Nb	3	6	6	7	6	11	0	0	0	5
Mo	0	25	20	24	9	13	12	0	8	19
Ag	0	1	6	2	0	4	3	0	0	1
Cd	27	3	4	4	4	1	1	30	0	3
Sn	28	2	2	9	4	3	4	0	0	9
Sb	0	0	2	5	3	11	3	35	0	12
Te		27	24	36	3	9	22			30
Ba	765	8	51	61	339	354	67	106	134	42
La	0	68	24	27	3	103	80	0	0	4
Ce	0	8	19	51	110	6	22	0	0	11
Pr	0	16	61	70	50	255	17	0	0	57
Nd	0	58	34	38	52	792	356	0	555	41
Ta		2	1	3	0	3	5			3
W	0	8	5	8	8	0	1	0	0	1
Au	4	6	6	7	5	3	5	6	6	5
Hg	9	1	3	6	4	6	1	0	0	6
Tl		3	1	1	2	3	5			3
Pb	16	1	4	4	6	10	2	5	0	3
Bi	0	19	32	29	18	0	12	0	0	8
Th	16	20	14	17	4	12	4	14	34	27
U	0	18	25	26	1	4	14	0	0	5

Tabla 3. Continuación de la tabla con concentraciones de elementos en partes por millón resultante del análisis de fluorescencia de rayos X con el equipo VANTA Olympus.

MUESTRA ID	SI- POLVO (SUELO)	SI- (SUELO)	BT	JR-2 (SUELO)	JR-3 (SUELO)	JR-4 (SUELO)	JR-6	JR-7	JR-9	JR-11
Li	1000	1000				950				
Na ₂ O	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400
Na	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
MgO	170	170	170	170	170	170	610	170	170	170
Mg	100	100	100	100	100	100	370	100	100	100
Al ₂ O ₃	38	38	5.61%	38	38	38	5.576%	7.964%	4.5%	3.929%
Al	20	20	2.969%	20	20	20	2.95%	4.22%	2.38%	2.079%
SiO ₂	8025	2365	19.88%	6332	2301	3986	22.91%	24.05%	28.57%	32.74%
Si	3751	1106	9.293%	2960	1075	1863	10.71%	11.24%	13.35%	15.3%
P ₂ O ₅	6.9	6.9	420	6.9	6.9	6.9	494	604	600	6.9
P	3	3	183.2	3	3	3	215.4	263.7	261.6	3
S	3.208%	1.822%	94.3	2.585%	3.306%	5.235%	10	235.8	10	360.5
Cl	305.4	177	30	30	30	30	30	30	30	30
K ₂ O	1350	338	1.59%	1870	24	844	1.46%	2.583%	2.8%	4.7%
K	1120	280	1.316%	1553	20	701	1.213%	2.144%	2.323%	3.90%
CaO	39.61%	37.1%	9.395%	28.16%	30.1%	31.81%	6.32%	1.306%	4.092%	3429
Ca	28.31%	26.55%	6.715%	20.13%	21.51%	22.73%	4.53%	9335	2.925%	2451
Sc	0	0		0	0		0	0		0
TiO ₂	140.5	13	1.13%	922	13	13	7495	9355	3846	755
Ti	84.2	8.1	6772	553	8.1	8.1	4492	5607	2305	452
V	5.1	5.1	119.6	5.1	5.1	5.1	145.8	177.7	51.1	42.6
Cr	22.4	3	3	3	3	3	3	3	3.1	2.2
MnO	42.5	31.4	5784	272.9	12.1	17.3	507.1	1936	463.3	30.3
Mn	32.9	24.3	4480	211.4	9.3	13.4	392.8	1500	358.8	23.5
Fe ₂ O ₃	5603	2315	3.792%	9114	173.4	1833	5.847	6.261%	3.457%	4719
Fe	3919	1619	2.652%	6374	121.3	1282	4.09%	4.379%	2.418%	3301
Co	3.9	2.6	19.7	4.4	1.2	2.4	7.5	16.2	5.9	2.4
Ni	6.9	7.5	14.3	7.2	1.3	2.4	4.2	8.6	7.2	1.5
Cu	7	12.6	32.4	9.7	0.9	1	9.8	22.3	17	4
Zn	24.2	21.7	163	36.2	9.4	9.2	54.6	89.4	54	25.8
Ga	2.2	2.7	21.7	2.5	2.3	2.5	14.5	23.6	12.8	7
Ge	1.1	1.1	0.9	1.2	1	1.1	1	1.1	1	0.7
As	1	0.8	27.3	13.7	0.7	0.8	2.9	10.4	1.1	12.2
Se	0.8	0.8	0.6	0.8	0.7	0.8	0.7	0.6	0.6	0.5
Br	14.7	10.3	0.4	4	3.4	4.9	0.4	0.4	0.4	0.5
Rb	4.8	1.8	75.1	12.7	1.8	6	29.9	51.9	86.3	139.6
Sr	3128	2590	98.8	6469	3550	4071	366.8	150	313.6	95.1
Y	0.6	0.6	15.6	0.6	0.6	0.7	20.2	18.6	10.9	13.8
Zr	3.3	2.8	120.4	4.2	3	3.6	136.6	170.9	142.5	85.1
Nb	8.6	0.9	9.9	3.3	0.8	2.5	8	11.4	8.9	11.1
Mo	12.1	6.5	6.6	5.4	4.9	3.6	1.9	2.1	1.3	0.9

Tabla 4. Tabla con valores en ppm y % de elementos y óxidos mayores en partes por millón resultante del análisis de fluorescencia de rayos x con el equipo ESPECTROSCOUT.

MUESTRA ID	JR-15 (SUELO)	JR-16	JR-17	PLM-2 (SUELO)	PLM-5 (SUELO)	S-2 (SUELO)	S-2 (POLVO)
Li						900	900
Na ₂ O	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400
Na	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
MgO	170	3120	990	170	170	170	170
Mg	100	1880	590	100	100	100	100
Al ₂ O ₃	38	4.227%	4.081%	38	38	38	38
Al	20	2.237%	2.16%	20	20	20	20
SiO ₂	5769	15.14%	16.12%	7060	1.194%	4446	3374
Si	2696	7.075%	7.536%	3300	5582	2078	1577
P ₂ O ₅	6.9	271	928	6.9	6.9	6.9	6.9
P	3	118.1	405.1	3	3	3	3
S	3.366%	154.4	94.7	1.033%	10	3100	3592
Cl	30	30	30	30	30	30	567.5
K ₂ O	2117	9811	7437	6713	1.159%	24	24
K	1757	8145	6174	5573	9619	20	20
CaO	23.47%	10.3%	10.43%	32.64%	25.46%	52.29%	43.78%
Ca	16.77%	7.362%	7.456%	23.33%	18.19%	37.37%	31.29%
Sc	0		0		0		0
TiO ₂	372	1.027%	1.217%	1516	7124	13	13
Ti	223.2	6158	7293	909	4270	8.1	8.1
V	5.1	179.6	196.7	20.8	111	5.1	5.1
Cr	3	16.3	6.3	3	14.4	3	3
MnO	53	1198	991.3	241.2	792.6	106.7	55.8
Mn	41	927.8	767.7	186.8	613.8	82.6	43.2
Fe ₂ O ₃	5916	7.788%	7.491%	8542	4.807%	3680	2299
Fe	4138	5.45%	5.24%	5975	3.362%	2574	1608
Co	3.2	8.7	8.6	4.1	7.9	3.6	2.6
Ni	1.1	19.5	14.8	7	18.4	6.8	12.5
Cu	0.9	27.7	37.6	4.6	15.5	1.2	3.7
Zn	21	51.6	59.8	34.4	61.4	37.5	8.5
Ga	2.4	16.3	14.8	4	10.7	3.3	2.4
Ge	1	1	0.9	1.1	1.1	1.3	1.1
As	0.6	1	0.65	6.3	28.3	0.9	0.9
Se	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	1	0.8
Br	5.3	0.4	0.4	1.9	1.8	10.5	10.1
Rb	23.5	41.8	26.3	32.3	57.8	0.7	1.8
Sr	2447	709.6	602.5	915.3	275.3	2559	2656
Y	2.1	14.2	18.8	2.5	14.2	0.7	0.6
Zr	34.7	111.1	122.5	50.9	97.7	3.5	2.8
Nb	6.3	5.7	5.7	4.9	6.6	1.1	3.7
Mo	8.3	1.3	1.3	5.3	1.5	4.2	7.7

Tabla 5. Continuación de la tabla con concentraciones de elementos y óxidos mayores en partes por millón resultante del análisis de fluorescencia de rayos x con el equipo ESPECTROSCOUT.

5.1.3 Espectroscopia Infrarroja

5.1.3.1 Técnica analítica para la espectroscopia Infrarroja (IR)

En este estudio se empleó el equipo de espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier, Spectrum Two FT-IR (Figura 5.12). Esta técnica analítica nos ayudó a identificar vibraciones particulares de moléculas, mismas que sirven como “huellas dactilares” y permiten su identificación. Para entender la espectroscopia se tiene que entender la luz. Toda la luz es clasificada como radiación electromagnética (Figura 5.11) y consiste en alternaciones entre campos eléctricos y magnéticos. En la espectroscopia IR y Raman solo se considera el campo eléctrico (Figura 5.9). Los parámetros importantes son la longitud de onda, frecuencia y número de ondas y están relacionados por la siguiente expresión (Figura 5.9) (Larkin, 2018).

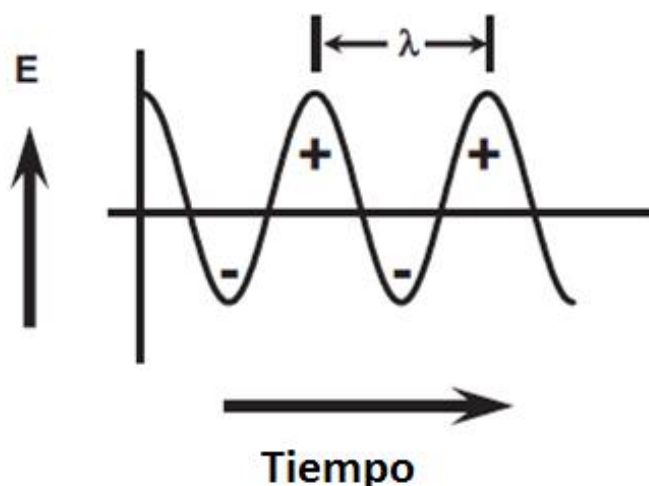


Figura 5.9. Amplitud del vector eléctrico de la radiación electromagnética como una función con respecto al tiempo. Imagen tomada de Larkin, 2018.

$\bar{\nu}$ Numero de onda

ν Frecuencia

c Velocidad de la luz

n Índice de refracción del medio

λ Longitud de onda

$$\bar{\nu} = \frac{\nu}{(c/n)} = \frac{1}{\lambda}$$

Figura 5.10 Expresión donde se relaciona los parámetros importantes en la espectroscopia (Larkin, 2018).

Cuando la luz infrarroja pasa a través de una muestra, algunas longitudes de onda van a ser absorbidas mientras que otras débilmente atraviesan la muestra sin ser afectadas. Enlaces moleculares específicos absorben una cantidad de energía específica y estas pérdidas de energía corresponden a los picos que resultan en el análisis. Las absorciones de FTIR nos proveen mejor entendimiento y una fácil interpretación de los resultados para muchas sustancias (Thermoscientific, 2018).

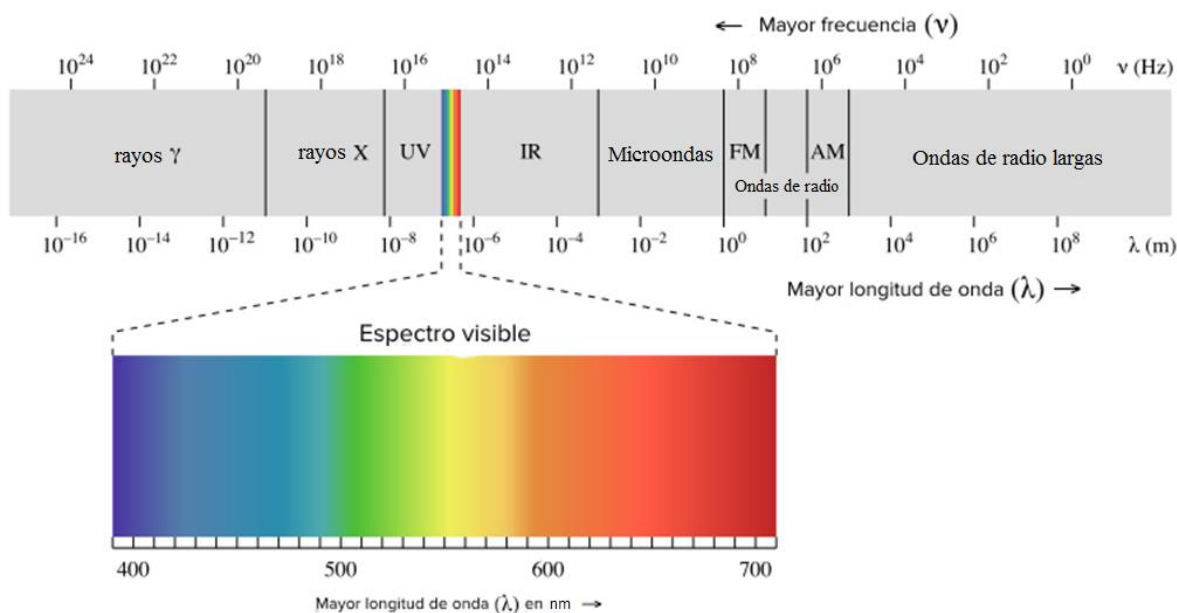


Figura 5.11. El espectro electromagnético. Imagen tomada de la ChemWiki de UC Davis (Universidad de California en Davis), CC-BY-NC-SA 3.0.

La espectroscopia de absorción infrarroja (IR), nos brinda información sobre los enlaces químicos, ya que las moléculas absorben la radiación infrarroja según su vibración molecular.

El espectro vibracional de la molécula se considera como una propiedad física única, y, por tanto, son característica de la molécula analizada. Así, entre otras aplicaciones, el espectro IR se emplea en la identificación de muestras desconocidas mediante la comparación con espectros de referencia.

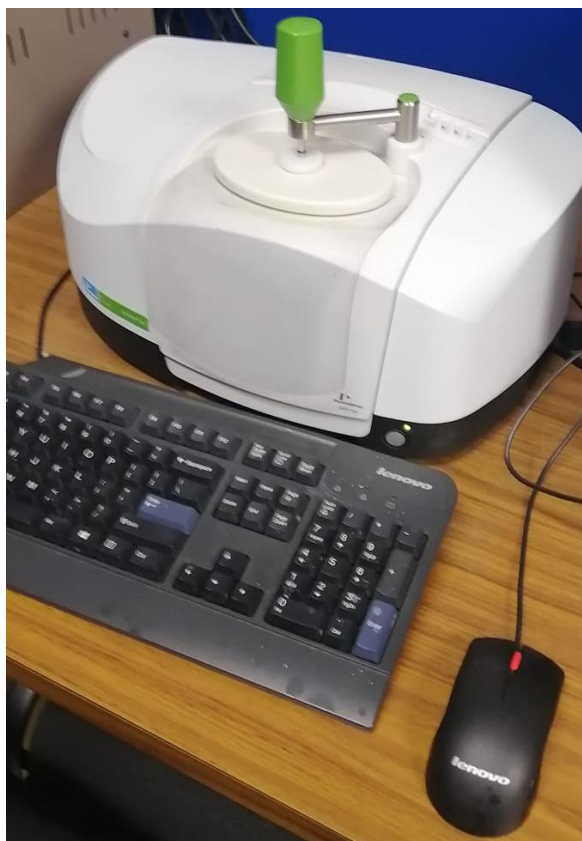


Figura 5.12. Equipo Spectrum Two FT-IR Spectrometer PerkinElmer®.

5.1.3.2 Análisis mineralógico por espectroscopia Infrarroja (IR)

Los grupos funcionales identificados por FTIR como se muestra en la figura 5.13. Las bandas de vibración registradas a $3,691-3,619\text{ cm}^{-1}$ corresponden también al estiramiento O-H, mientras que los picos en $3,530-3,400\text{ cm}^{-1}$ corresponden al balanceo de los enlaces O-H (enlaces de hidrógeno) entre intercapas, que mantienen las hojas tetrahedra y octahedra. Los picos en $1,683$ y $1,620\text{ cm}^{-1}$ corresponden al movimiento de tijero H-O-H.

Las bandas en $1,111$ y $1,006\text{ cm}^{-1}$ se asignan al estiramiento de Si-O-Si de los tetraedros, vibración que se toma como evidencia de una fase tridimensional de la montmorillonita (Zhang *et al.*, 2003). Los picos localizados en la región $3,400 - 3,854\text{ cm}^{-1}$, se puede atribuir al estiramiento de la red molecular OH (Si-OH, Al-OH) y al OH del agua físicamente adsorbida (Taha *et al.*, 2017). La banda presente a $1,417$ o $1,418\text{ cm}^{-1}$ se asigna a la deformación de las vibraciones de los grupos OH en los límites de los tetraedros Si-O. Las

fluctuaciones de los anillos Si-O-Si en los tetrahedros SiO₄ y en las vibraciones de los enlaces Fe-O en la red molecular se manifiestan en el rango de 700 – 450 cm⁻¹ (Ma *et al.*, 2003; Lou *et al.*, 2015), mientras que los picos de vibraciones localizadas dentro del rango 422 – 793 cm⁻¹ se deben a la frecuencia de estiramiento Si-O-Al y Si-O-Mg; de forma particular la banda a 668 cm⁻¹ se debe a Al-OH, y 873 cm⁻¹ a (Al, Mg)-OH (Lou *et al.*, 2015).

La disminución en la banda de estiramiento Si-O-Si y el aumento en la banda OH se atribuye al aumento en la humedad de las muestras, cambio que se presenta especialmente en las muestras JR-1, S1 y S2.

En general la mayoría de las muestras tienen bandas en 1,111 y 1,006 cm⁻¹ asignadas a la presencia de montorillonita (Zhang *et al.*, 2003). A excepción de la muestra S2, que muestra una banda a 1,417 o 1,418 cm⁻¹ asignada a deformaciones en la estructura cristalina.

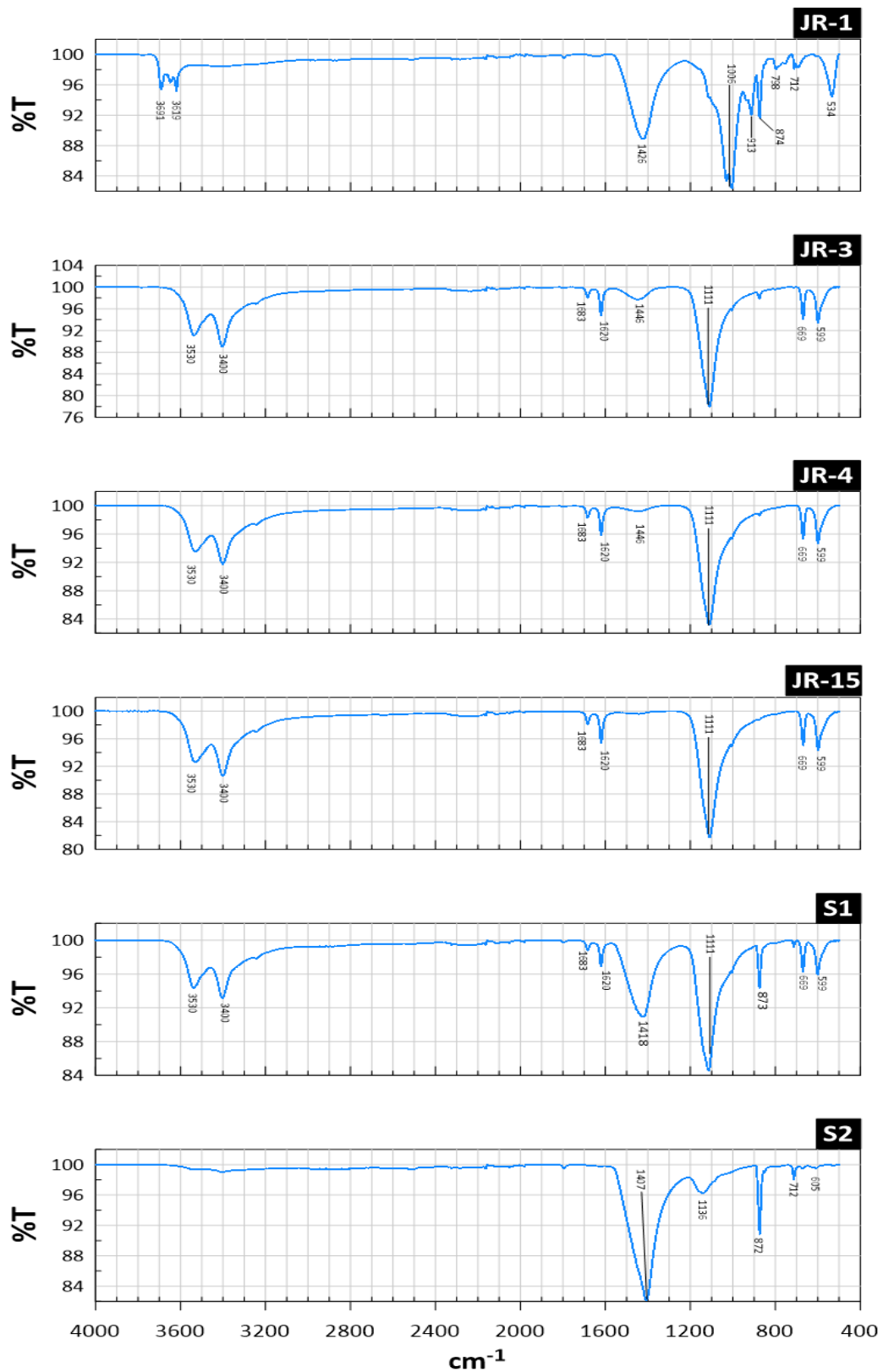


Figura 5.13. Diagramas de vibraciones registradas por espectroscopia IR.

5.2 Geología Estructural

De acuerdo con Gaytán-García *et al.*, (2011), las rocas del Cretácico inferior que afloran en la carta registran una historia rica en procesos geodinámicos, entre las principales se tienen a las estructuras laramídicas y post-laramídicas, las cuales consisten en pliegues y fallas normales con dirección noroeste-sureste y vergencia al suroeste. La deformación frágil se manifiesta mediante, fallas normales, fracturamiento, lineamientos y lineamientos curvos. En las fallas normales se determinaron dos orientaciones estructurales, entre las que destacan la NW-SE, con inclinaciones que varían de 25° a 88° al NE, y de 20° a 55° al SW. Se tiene otro sistema de fallamiento normal orientado al NE-SW con inclinaciones que varían de 50° a 72° al NW, y de 42° a 72° al SE. Estos sistemas de fallas definen un patrón estructural de fosas, semifosas y pilares tectónicos, como el pilar Los Chinos, de la Sierra Los Chinos. El área de estudio está ubicada en una región en donde los rasgos geomorfológicos son típicos de la tectónica de Sierras y Valles. Esta tectónica es de carácter distensivo ocurrida durante el Oligoceno-Mioceno, o quizás antes, en el Eoceno. Produjo fallamiento normal regional, los bloques caídos formaron fosas que fueron rellenadas por depósitos originados por la erosión de pilares rocosos adyacentes, transportados por redes fluviales.

Algunos lineamientos pueden ser interpretados como ejes de pliegues, ya que cuentan con capas con echados en direcciones opuestas, como se exhibe en el mapa geológico (Figura 4.1). En la literatura, se tiene reportado que el Cretácico superior también se encuentra plegado y cabalga al Cretácico inferior, en cambio, en el área de estudio no se llegó a observar esto. Las estructuras más evidentes en el área son fallas normales de alto ángulo, con la mayoría de sus estrías con dirección cercana hacia el echado. Gaytán-García *et al.*, (2011), menciona al menos tres eventos de deformación con el primero siendo la deformación compresiva en las rocas marinas de la Sierra Los Chinos, manifestando pliegues con orientación NW-SE. La deformación frágil presenta dos eventos que son dos sistemas de fallas fallas normales del oligoceno-mioceno posiblemente asociados al evento *Basin and Range*, uno NW-SE que desplaza a otro NE-SW.

Dentro de los datos estructurales medidos en el área de estudio destacan la presencia de fallas normales. De esas fallas normales se pudo identificar y medir un par de estructuras

principales o fallas mayores, que por su magnitud son de gran importancia para la evolución tectónica del área de estudio. Las mediciones con la brújula fueron realizadas siguiendo la regla de la mano derecha. La información estructural se presenta primeramente las fallas geológicas, seguido de la estratificación medida en litologías del área.

5.2.1 Fallas geológicas

Se midieron fallas geológicas, siendo las fallas normales las presentes en el área de estudio. En el área se observan fallas normales, de las cuales se midieron 12, de las cuales fue posible identificar en algunas de estas indicadores cinemáticos (*pitch*). El *pitch* o cabeceo en geología estructural se define como el ángulo agudo formado por la estria y el rumbo del plano de la falla medida. Se describirán las fallas principales identificadas en el área (Figura 5.14), así como las gráficas de tendencias estructurales mediante digramas de roseta y de planos en la red estereográfica del programa *Stereonet 10.1.1* (Allmendinger *et al.*, 2012).

Se identificó una estructura mayor, la cual se muestra en la (Figura 5.15). Es una falla normal que cuenta con un espesor de alrededor de 1 metro. Se caracteriza por un intenso brechamiento y la presencia de superficies de falla con estrias. Su actitud tiene un rumbo de 150° con echado de 70° hacia el SW y con un *pitch* de 56° NW. La estructura está delimitada por un pequeño valle (ver Figuras 5.21, 5.23c y d).



Figura 5.14. Falla normal cortando un dique granodiorítico, orientada NE-SW de alto ángulo con extensión hacia el NW.

Con las fallas normales que pudimos medir en la vertiente, se pudo interpretar que probablemente se extrapolan hacia el lado oeste de la vertiente, como se puede observar a distancia algunos rasgos morfológicos en el afloramiento (Figura 5.15, 5.21 y 5.23d)



Figura 5.15. Falla normal de alto ángulo con estrias medibles y echado hacia el SW. La falla se encuentra afectando a lutitas.

En la porción aledaña a la falla anteriormente descrita se localiza otra falla normal menor, caracterizada por una zona de falla (Figura 5.18) muy brechada con rumbo general E-W y un echado de alto ángulo ($>80^\circ$). Se determinó que esta falla está siendo cortada por la falla normal mayor ($150^\circ/70^\circ$) que delimita el pequeño valle antes mencionado (Figura 5.19d). El espesor aproximado de la zona de falla es de 2 a 3 metros. No se encontraron indicadores cinemáticos de esta falla (*pitch*).



Figura 5.16. a) Aglomerado cortado por una falla de bajo angulo. b) Espejo de falla con estrias medibles y oxidos en basálto, la actitud es 103/40.



Figura 5.17. Interpretación del fallamiento normal que cortan rocas igneas y sedimentarias del area de estudio. Panorámica observada a unos 80 metros de distancia. La longitud de esta foto es aproximadamente 150 metros.



Figura 5.18. a) Fotografía de contacto por falla normal entre rocas volcánicas (derecha) y rocas sedimentarias (izquierda). Tomada a 15 metros de distancia del afloramiento, mirando hacia el oeste; b) Zona de falla con rumbo E-W, con un espesor aparente de 2 a 3 metros.

Muchas de las estrias medidas son estructuras que no se comportan de manera local. En el área de estudio las estrias son líneas que se prolongan en los planos de falla con rumbo NW-SE (ver Figura 5.19c). Usando el programa de *Stereonet 10.1.1* (Allmendinger *et al.*, 2012) se calculó la tendencia preferencial en los rumbos de las fallas normales medidas en el área de estudio. Se determinó un rumbo de N20-30°W (Figura 9.6.). El Software también permite determinar la dirección promedio de todas las fallas medidas en el campo y dando un rumbo promedio de 156.6° (azimut; Figura 5.19a).

El pitch de las estrias puede ser de carácter casi oblicuo a la dirección del echado, en el rango de 30° a 60°, por lo menos 70° veces en dirección al echado. Se puede observar en la figura 5.19c, un par de planos de fallas con orientación NE-SW con extensión NW-SE, este par son fallas normales secundarias (Figura 5.19c) influenciadas por las fallas principales.

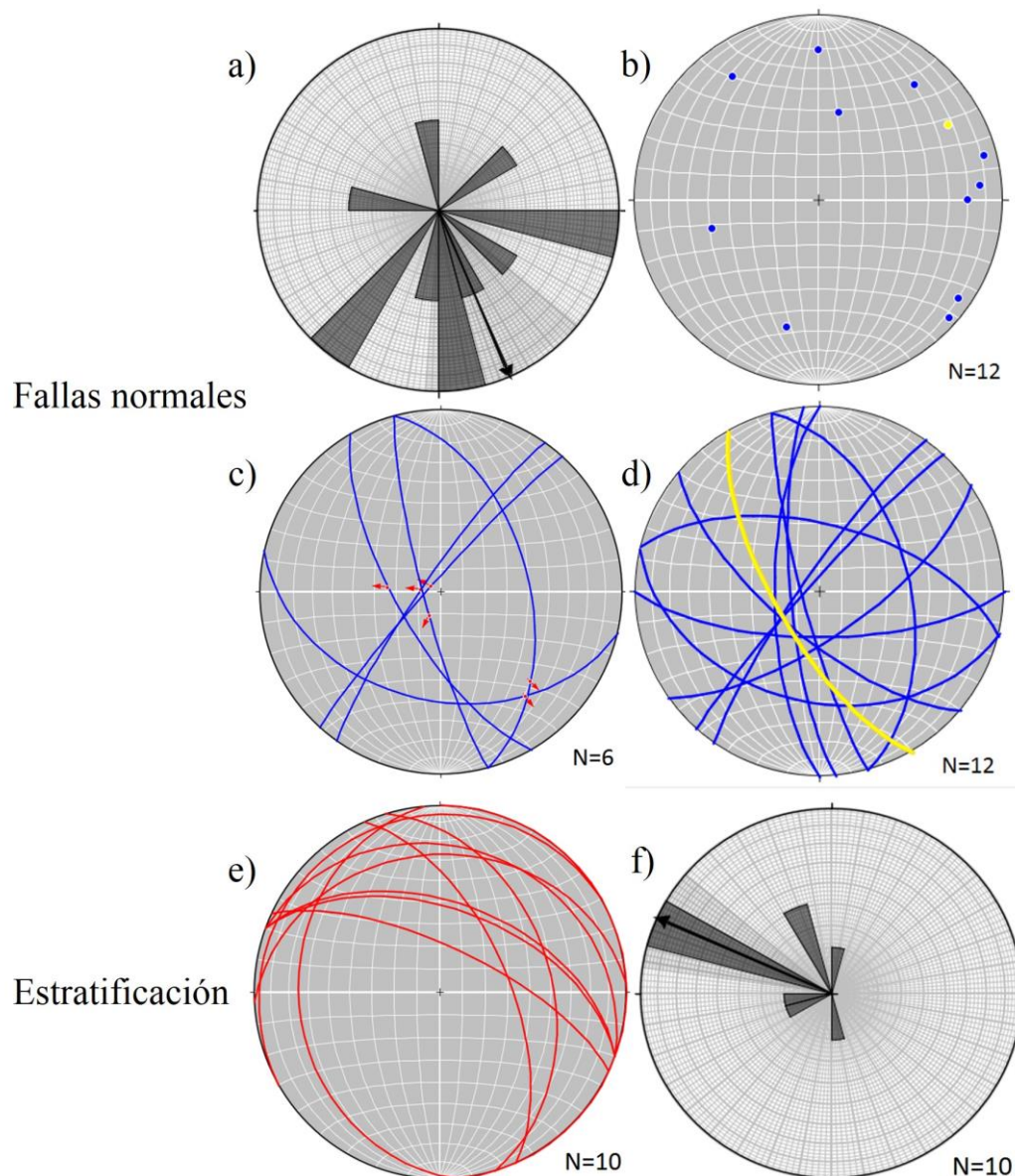


Figura 5.19. a) Diagrama de rosa para graficar el vector promedio 156° de orientación de las fallas. b) Proyección estereográfica (Schmidt) de polos de los planos de falla del área de estudio (hemisferio sur). c) Proyección estereográfica (Schmidt) con medidas estructurales de estrías en planos de falla normales. d) Proyección estereográfica (Schmidt) con la orientación y echado de todas las fallas normales que pudieron medirse en el área de estudio. e) Proyección estereográfica (Schmidt) con las actitudes de los planos de estratificación de las rocas sedimentarias en el área de estudio, principalmente lutitas y areniscas. f) Diagrama de rosas de la estratificación del área de estudio. El vector promedio es $294.1^\circ \pm 16.2^\circ$ azimutales Stereonet 10.1.1 (Allmendinger et al., 2012).

Mediante la red estereográfica con proyección de Schmidt (Figura 5.19a), se graficaron todas las fallas del área de estudio. Es evidente que hay estructuras que se orientan en los

cuatro cuadrantes. La mayor parte de las mediciones están orientadas NW-SE, el resto están orientadas NE-SW y E-W. Es importante señalar la orientación de estas estructuras, dado que la mayor parte están asociadas a carbonatos y óxidos. La figura 5.16 es un ejemplo de las fallas asociadas a una mineralización de óxidos de hierro y calcita, el afloramiento tiene un plano de falla con una actitud de 103° (azimut) de rumbo y con un echado de 40° hacia el SW con estrías medibles y un pitch de 38° SE.

Con la conversión de planos a polos, es muy conveniente visualizar las posibles familias de fallas del área de estudio. En el mejor de los casos, se estiman tres familias de fallas, dos orientadas NW-SE y una orientada NE-SW (Figuras 5.23b. y 5.23d)

5.2.2 Estratificación

En cuanto a la estratificación de las rocas sedimentarias, fueron 10 mediciones de estratificación (Figura 5.19e), no hay tanta diferencia en cuanto a rumbo aunque en el echado sí la hay, que posiblemente este relacionada con alguna estructura de plegamiento o falla rotacional. No se ha reportado deformación ductil pero el rumbo de las capas nunca sesgó lo suficiente para interpretar algún pliegue. El echado de las capas varia de 25° a 50° grados y el rumbo promedio es de 294.1° (azimut; Figura 5.19f). Probablemente el basculamiento de las capas fue influenciado por la extensión *Basin and Range* NW-SE.

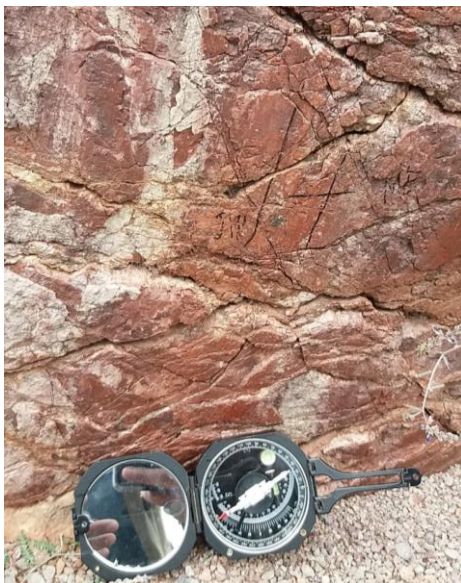


Figura 5.20. Plano de falla con estrías medibles en una unidad de calizas.



Figura 5.21. Contacto por discordancia entre rocas volcánicas y calizas.

En las zonas con areniscas y lutitas, la estratificación es mediana con un promedio de unos 15 centímetros. Por otro lado, las calizas de la Formación Lampazos y algunas areniscas tienen estratificación mediana a gruesa con algunos estratos llegando a medir de 60 centímetros a casi un metro de espesor (Figuras 5.20 y 5.21).

6 Discusión

6.1 La importancia de los yacimientos de Litio en Sonora

Con la reciente transición a energías limpias y el cuidado del medio ambiente, se busca generar más producción de carros eléctricos y la demanda de litio para producir baterías para carros aumentara. Desde que se anunció el descubrimiento del litio en Bacadéhuachi municipio de Sonora, México, dio paso al interés de empezar campañas de exploración. Una de las características importantes de las anomalías de litio estudiadas en este trabajo es que pueden estar ligadas espacialmente a una anomalía más grande ya que son la evidencia de que en esa zona estuvo circulando fluidos ricos en litio.

6.2 Las anomalías geoquímicas de litio

El posible rango de edad de este material va desde del Paleógeno al Cuaternario, debido a la poca consolidación que se presenta. Estudios posteriores para determinar la génesis de los fluidos para la formación del yeso en referencia a su origen volcánico o sedimentario sería de gran ayuda. Almirudis *et al.*, (2018), estudió las zonas geotérmicas de Sonora, describiendo un panorama activo hacia la franja este del estado, en localidades como Granados, Huásabas, Arivechi, Bacadéhuachi y Mátape (Figura 6.1). El área de estudio se encuentra cercano a estructuras y geográficamente cerca de las demás áreas de aguas termales. El carácter geoquímico dado por anomalías de S, K, Ca, P y Na sugiere una posible fuente hidrotermal en el área de estudio (SRK, 2015). Ver en Anexo las figuras 9.1, 9.2 y 9.3.

6.3 Los suelos ricos en litio

El material de cobertura con contenidos de litio está constituido principalmente por yeso y calcita. Dicho material se comporta de tres formas: 1) Suelo no consolidado color café (Figura 4.18); 2) Precipitados de calcita en raíces fosilizadas color café oscuro (Figura 5.4b) y 5.5b) Agregados de calcita color oscuro y con cristales euhedrales de yeso (Figura 5.4c).

La presencia de vegetación fosilizada es otra característica del ambiente casi superficial donde se generó la anomalía de litio.

6.4 Modelo geológico del yacimiento de litio del Norte de Sahuaripa

El litio solamente se concentrará de forma económica en cuencas cerradas que reciben recargas de aguas meteóricas y aguas subterráneas provenientes de otras cuencas. La cobertura o suelo, contiene precipitados de calcita en forma de raíces fosilizadas que llegan a contener hasta 1,000 ppm de litio. Esto nos indica que dichos fluidos con posible contenido de litio afectaron la cobertura del suelo y su vida vegetal. La posible actividad de los intrusivos de edad Eoceno también podría haber aportado al gradiente geotérmico y activar la circulación de aguas termales y también del litio.

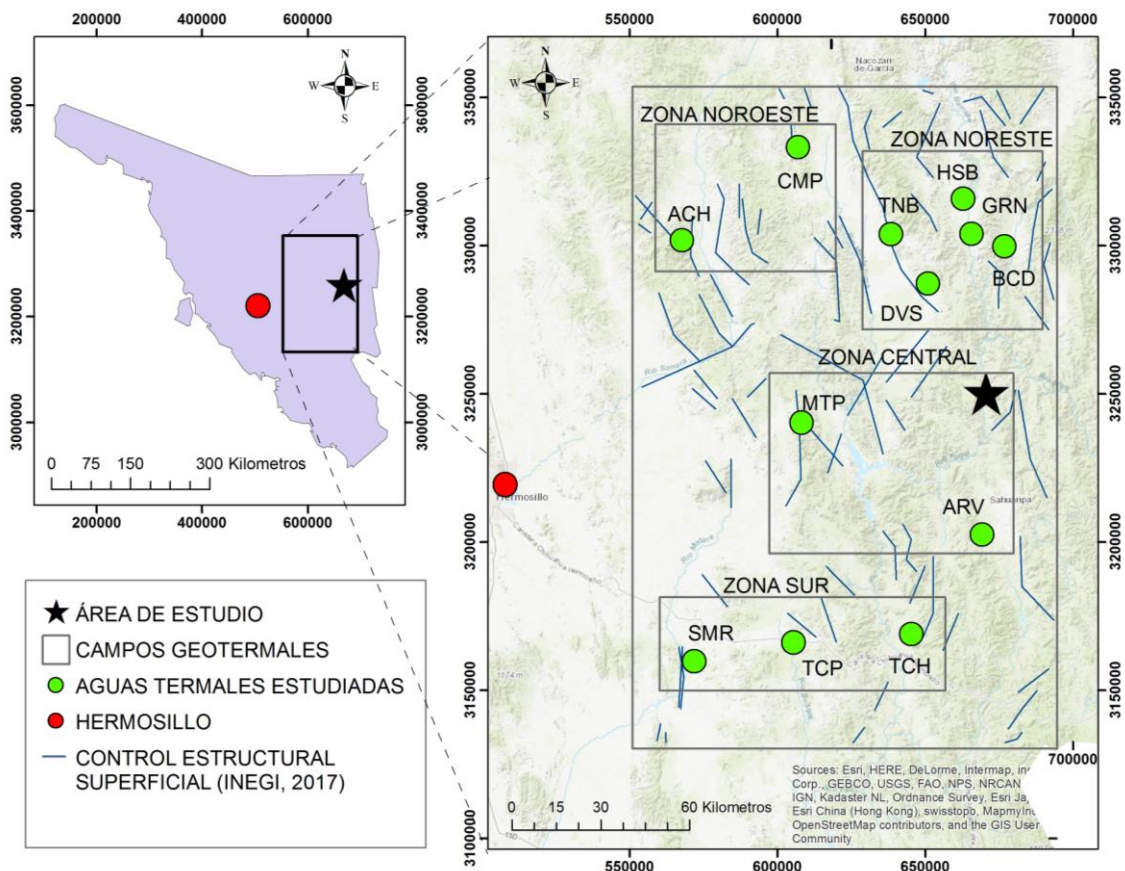


Figura 6.1. Mapa elaborado por medio de ArcGIS® de las manifestaciones hidrotermales contemporáneas del estado de Sonora. Acercamiento a la franja centro-este. Abreviaturas: HSB. Huásabas; BCD. Bacadéhuachi; CMP. Cumpas; GRN. Granados; ARV. Arivechi; SMR. San Marcial; TCP. Tecoripa; TCH. Tonichi; DVS. Divisaderos; TNB. Tonibabi; MTP. Mátape y ACH. Aconchi (tomado de Almirudis et al., 2018).

El suelo con anomalías altas en litio es rico en yeso y calcita. Éstos son producto de la lixiviación de rocas ricas en calcio, probablemente las calizas localizadas en el área (Török, 2008). El movimiento de las aguas subterráneas acarrió iones de litio de las rocas ígneas del área, estas aguas utilizaron algunas zonas de debilidad como las zonas de falla asociadas al desarrollo de cuencas *Basin and Range* que crearon cuencas idóneas para su depositación (Figura 6.2). El origen del azufre se mantiene a discusión en cuanto a su origen volcánico o sedimentario.

Se reconoce que la alteración también es manifestada en la mayoría del área de estudio. Sin embargo, donde se ubica la muestra JR-9 y JR-11 (ver figuras 4.2. y 4.19) en la parte central del área de estudio, próxima a una falla normal de relativamente gran escala (Figura 5.15 y 5.23d), existe una fuerte alteración, donde la roca es mayormente arcilla, en este caso kaolinita (Figura 4.19).

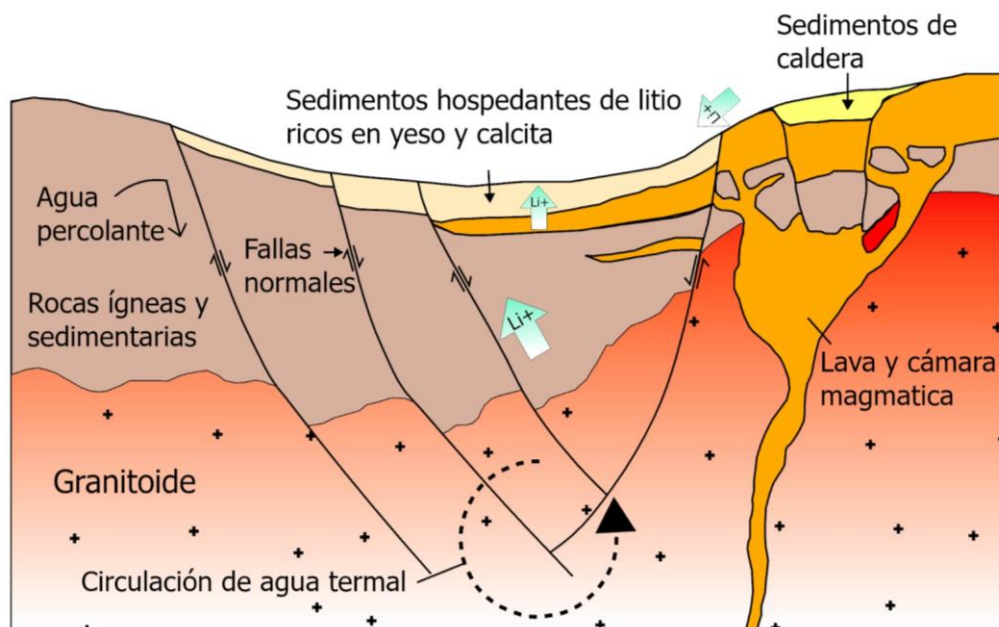


Figura 6.2. Modelo propuesto para la anomalía de litio en el área de estudio, en Sahuaripa, Sonora, México.

7 Conclusiones

En el análisis de las anomalías de litio en el área de estudio de este proyecto de tesis en suelos de la región norte de Sahuaripa se logró determinar características geológicas, estructurales, geoquímicas y petrográficas. En cuanto a las características petrográficas se generaron observaciones en referencia al grado de alteración de volumen de roca asociado a fallas normales importantes dentro del área de estudio. Una fuerte alteración a kaolinita y calcita en rocas intrusivas y extrusivas de composición félsica a intermedia favorece la idea de la proveniencia del litio de la actividad hidrotermal en contacto con rocas volcánicas félsicas. La geología estructural sirvió de gran ayuda para interpretar estructuras importantes asociadas al evento *Basin and Range* como los conductos por los que circularon fluidos de cierto grado hidrotermal y que afectaron a un considerable volumen de roca. En los resultados geoquímicos se tienen valores interesantes en cuanto al K, Ca, Na y S, inclusive Au. La actividad de estas aguas entonces podría tener un origen volcánico-magmático y otras asociaciones de los orígenes del azufre y el yeso.

La mineralogía de los suelos analizados derivada del análisis de difracción de rayos X en apoyo con la petrografía, se compone principalmente de yeso y calcita. También el análisis mediante IR indica la presencia de arcilla (montmorillonita). El yeso muestra una morfología lenticular importante que indica ambientes de evaporación. En general, se concluye que el ambiente de la anomalía de litio en el área de estudio corresponde a un ambiente somero-superficial de depósitos no consolidados, evaporativos, ricos en materia orgánica, yeso, calcita y menores contenidos de arcilla, con un componente de circulación de fluidos hidrotermales, cuya actividad se ve favorecida por fallas normales importantes. Tal escenario que se propone es favorable para la presencia de la anomalía de litio del área estudiada.

Se recomienda para estudios posteriores el realizar muestreo sistemático en suelos con potencial de anomalías de litio ya detectadas utilizando mallas de 1 a 5 metro de separación. Llevar a cabo un análisis estructural asegurando estructuras tentativas que se asocien con las anomalías en suelos. Realizar exploración geoquímica en cauces tributarios y aledaños al área de estudio. Realizar un análisis mediante microscopía electrónica de barrido en minerales de yeso, calcita, arcilla y matriz, que ayuden a identificar la mena de litio. Así como también realizar fechamiento isotópico en yeso por los métodos U/Th y K/Ar, el cual se propone tiene asociación espacial y temporal con la anomalía de litio.

8 Bibliografía

- Alix Resources Corp., (2017). Lithium Extractions up to 99% from Agua Fria, Sonora, México, pp.1.
- Allmendinger, R. W., Cardozo, N. C., and Fisher, D. (2012). Structural Geology Algorithms: Vectors & Tensors: Cambridge, England, Cambridge University Press, 289pp.
- Almirudis, E., Santoyo, E., Guevara, M., Paz-Moreno, F., Portugal, E. (2018). Chemical and isotopic signatures of hot springs from east-central Sonora State, Mexico: A new prospection survey of promissory low-to-medium temperature geothermal systems. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. 35, Pp.116-141. 10.22201/cgeo.20072902e.2018.2.397.
- Alonso, H., Risacher, F. (1996). Geoquímica del Salar de Atacama, parte 1: origen de los componentes y balance salino. *Revista Geológica de Chile* 23 (2): 113-122. doi://dx.doi.org/10.5027/andgeoV23n2-a01
- Bagtzoglou., Amvrossios. (2003). Perched Water Bodies in Arid Environments and Their Role as Hydrologic Constraints for Recharge Rate Estimation: Part 2. The Case of Yucca Mountain. *Environmental Forensics*. 4, pp. 47-62. 10.1080/15275920303491.
- Barrie, C. T., Peek, B., Whittaker, P., (2018). Lithium Clay Deposits of the Zeus Property, Eastern Clayton Valley, Nevada, <https://doi.org/10.1002/essoar.10500719.1>, pp. 3, 6, 9, 13.
- Benson, T.R., Coble, M.A., Rytuba, J.J., (2017). Lithium enrichment in intracontinental rhyolite magmas leads to Li deposits in caldera basins. *Nat Commun* 8, pp. 270 doi:10.1038/s41467-017-00234-y.
- Bienes., Ramón. (2009). Técnicas Experimentales e Instrumentales de Análisis en Edafología 2da Edición: Capítulo 2 El perfil del suelo: formación y clasificación. p.17-54.
- British Geological Survey, (2016). Lithium Profile, www.mineralsuk.com, pp. 1-8
- Cameron, K. L., Nimz, G. J., Kuentz, D., Niemeyer, S., Gunn, S., (1989). Southern Cordilleran basaltic andesite suite, southern Chihuahua, Mexico; a link between Tertiary continental arc and flood basalt magmatism in North America: *Journal of Geophysical Research in North America*. pp. 7817
- Cannon, H.L., Harms, T.F., and Hamilton, J.C. (1975). Lithium in Unconsolidated sediments and plants of the Basin and Range Province, Southern California and Nevada. *Geological Survey Professional Paper 918*. Department of the Interior, pp. 13-24
- Christmann, P., Gloaguen, E., Labbe, J., Melleton, J., Piantone, P., (2015). Global Lithium Resources and Sustainability Issues. En Chagnes, A., Swiatowska, J., (Ed), *Lithium*

- Process Chemistry: Resources, Extraction, Batteries, and Recycling pp. 18. Orleans, Francia: Elsevier.
- Comisión Nacional del Litio, 2015. Litio: Una fuente de energía, una oportunidad para Chile. 2015. Comisión Nacional del Litio. Ministerio de Minería.
- Damon, P.E., Shafiqullah, Muhammad, Clark, K. F., (1983). Geochronology of the porphyry copper deposits and related mineralization of Mexico. *Canadian Journal of Earth Sciences* 20(6), pp. 1064.
- Dana, E. S., (1922). *A Textbook Of Mineralogy With And Extended Treatise On Crystallography And Physical Mineralogy*. 3era Ed., pp. 563.
- Descarreau, A., Vigier, N., Palkova, H., Petit, S., Vieillard, P., and Fontaine, C., (2012). Partitioning of lithium between smectite and solution: An experimental approach: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 85, pp. 314-325.
- Dickinson, R.W., (2009). Anatomy and global context of the North American Cordillera. *The Geological Society of America Memoir* 204, pp. 18.
- Bolivia, noticiero digital. (2017). Litio en Bolivia. <https://www.eabolivia.com/economia/7055-litio-en-bolivia-el-oro-del-futuro.html>
- Esparza, (2015). *Estudio Del Mineral Litio En Chile y Otros Países*. 2015.
- Evans, R.K., (2014). Lithium. *Critical Metals Handbook* Capitulo 10 John Wiley & Sons Ltd, Chichester, UK, pp. 10-20
- Ferrari, L., Valencia-Moreno, M., Bryan, S., (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 Volumen Conmemorativo Del Centenario Temas Selectos De La Geología Mexicana Tomo LVII, numero. 3, 2005, pp. 343-355*
- Gaytán-García, J., Yáñez-Davila, D., Rodríguez-Vega, A., Durán-García, H., Castro-Escarrega, J. J., (2011). Carta Geológica-Minera Badesi H12-D36, Sonora, México. Consejo de Recursos Minerales. Servicio Geológico Minero, pp. 8-36.
- Glanzman, R. K., McCarthy J. H., Rytuba J. J., (1978). Lithium In The McDermitt Caldera, Nevada And Oregon. *U.S. Geological Survey, Energy Vol. 3, pp. 352*
- Gourcerol, B., Gloaguen, E., Melleton, J., Tuduri, J., Galiege, X., (2019). Re-assessing the European lithium resource potential – A review of hard-rock resources and metallogeny: *Ore Geology Reviews* 109, pp. 494-499, 516.
- Harp, F., M., 2022. Generalidades del litio, impartida por Maestra Flor de María Harp del Servicio Geológico Mexicano.
- Henry, C. D., Aranda-Gómez, J. J., (2000). Plate interactions control middlelate Miocene proto-Gulf and Basin and Range extension in the southern Basin and Range: *Tectonophysics* 318, pp. 4.

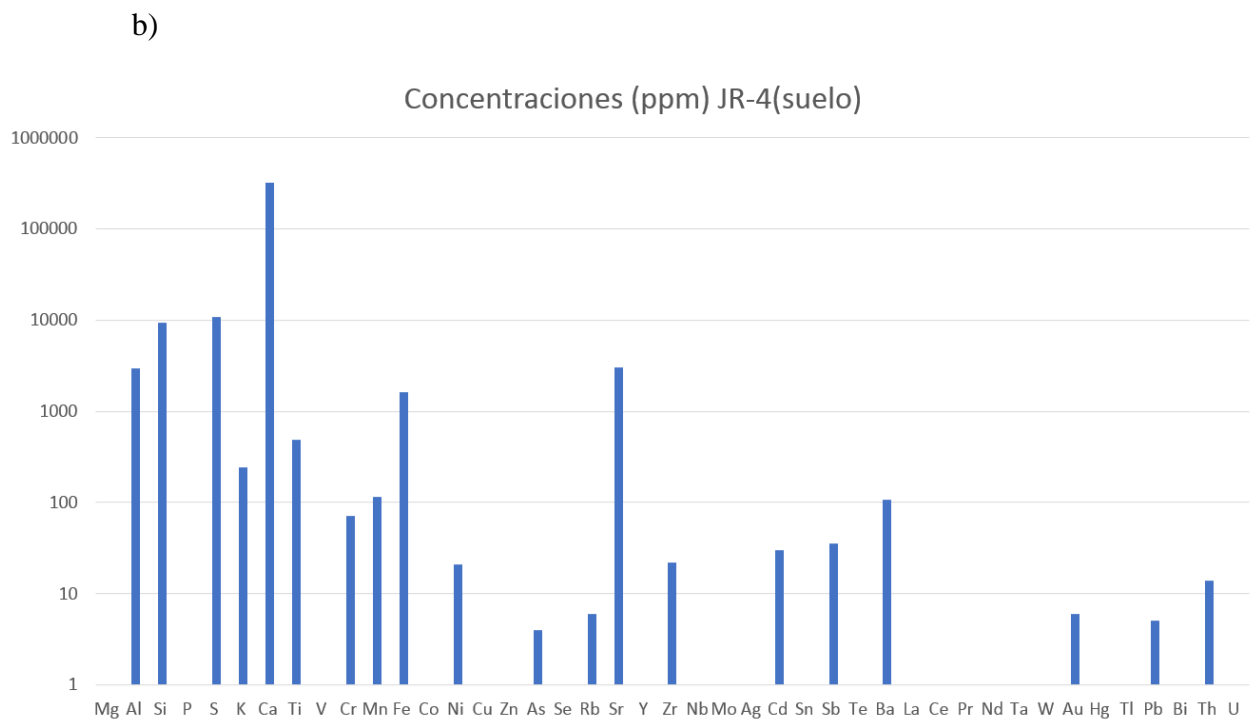
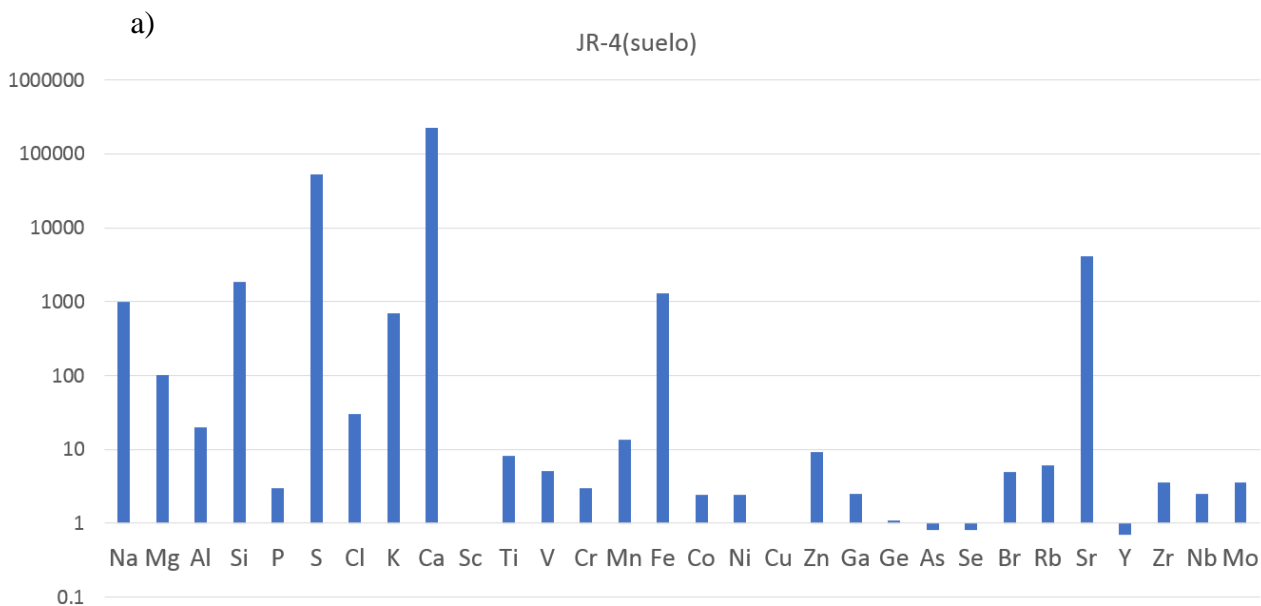
- Henry, C.D., Aranga-Gomez, J.J., (1992). The real southern Basin and Range: Mid- to late Cenozoic extension in Mexico. *Geology*, v. 20, pp. 701-704.
- Kunasz, I., (2006). Lithium Resources, en Kogel, J. E., Trivedi, N. C., Baker, J.M., Krukowski, S.T. (Eds) 2006. *Industrial Minerals and Rocks*, 7th Edition Society for Mining, Metallurgy and Exploration Inc, Littleton, Colorado, USA, pp. 134.
- Larkin, P. J. (2018). *Infrared and Raman Spectroscopy (Second Edition)*, Elsevier. Chapter 2 - Basic Principles, pp. 7-28.
- Lou, Z., Zhou, Z., Zhang, W., Zhang, X., Hu, X., Liu, P., & Zhang, H. (2015). Magnetized bentonite by Fe₃O₄ nanoparticles treated as adsorbent for methylene blue removal from aqueous solution: Synthesis, characterization, mechanism, kinetics and regeneration. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 49, pp. 199–205.
- Ma, M., Zhang, Y., Yu, W., Shen, H., Zhang, H., Gu, N. (2003). Preparation and characterization of magnetite nanoparticles coated by amino silane. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 212, pp. 219–226.
- McDowell F. W., Keizer R. P., (1977). Timing of mid-Tertiary volcanism in the Sierra Madre Occidental between Durango City and Mazatlán, Mexico. *GSA Bulletin*, v. 88 (10): pp. 1479. doi: [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1977\)88<1479:TOMVIT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1977)88<1479:TOMVIT>2.0.CO;2)
- Montgomery, A. (2016). *Atomic Spectroscopy: (part B) Emission, Absorption & Fluorescence [Diapositivas de PowerPoint]. SlideShare.* <https://slideplayer.com/slide/7987079/>
- Monreal, R., Longoria, J.F., (2000b). Lower Cretaceous rocks of Sierra Los Chinos, east-central, Sonora: *Geofísica Internacional*, v. 39(4), pp. 312-315.
- Munk, L., Bradley, D., Hynek, S., Chamberlain, C. (2011). Origin and Evolution of Li-rich Brines at Clayton Valley, Nevada, USA. *AGU Fall Meeting Abstracts*, pp. 2602.
- Obradovic, J., Djurdjevic-Colson, J., Vasic, N., (1997). Phytogenic lacustrine sedimentation – oil shales in Neogene from Serbia, Yugoslavia. *J.: Palaeolimnology*, 18, pp. 364.
- Poch, R., Artieda, O., Herrero, J., Lebedeva, M. (2010). *Gypsic Features*, pp. 13-20 [10.1016/B978-0-444-53156-8.00010-6](https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53156-8.00010-6).
- Pozo, M., González, J. M., Giner, J. (2004): *Geología Práctica. Introducción al reconocimiento de materiales y análisis de mapas*. Prentice-Hall. 352 pp. 25-28
- Pubellier, M., (1987). *Rélations entre domaines Cordillerain et Mesogéen au nord du Mexique; étude géologique de la Vallée de Sahuaripa, Sonora central: París, Francia, Université Paris 6, tesis de doctorado*, pp. 219
- Rigaku (2022). *X-Ray Diffraction (XRD)*. <https://www.rigaku.com/techniques/x-ray-diffraction-xrd>.
- Rivera, O. (VIERNES 28 DE ENERO DE 2022). China se queda con mina de litio en Bacanora, Sonora. El Sol de México.

<https://www.elsoldemexico.com.mx/finanzas/china-se-queda-con-mina-de-litio-en-bacanora-sonora-7790303.html>

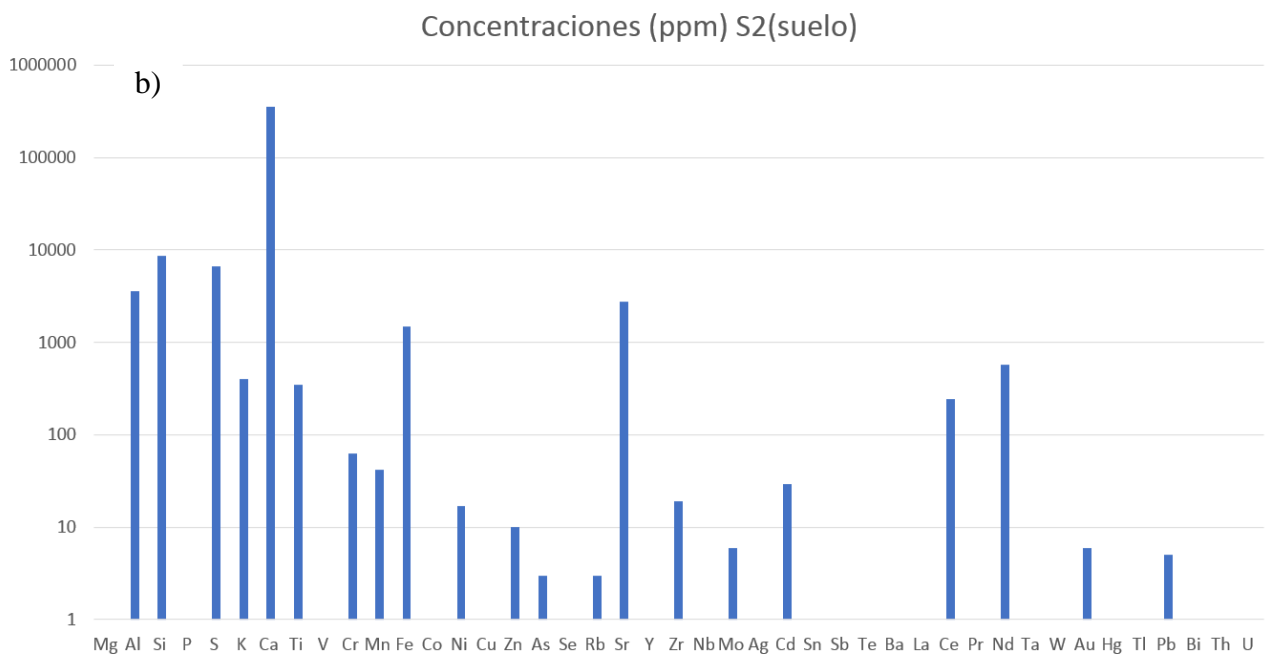
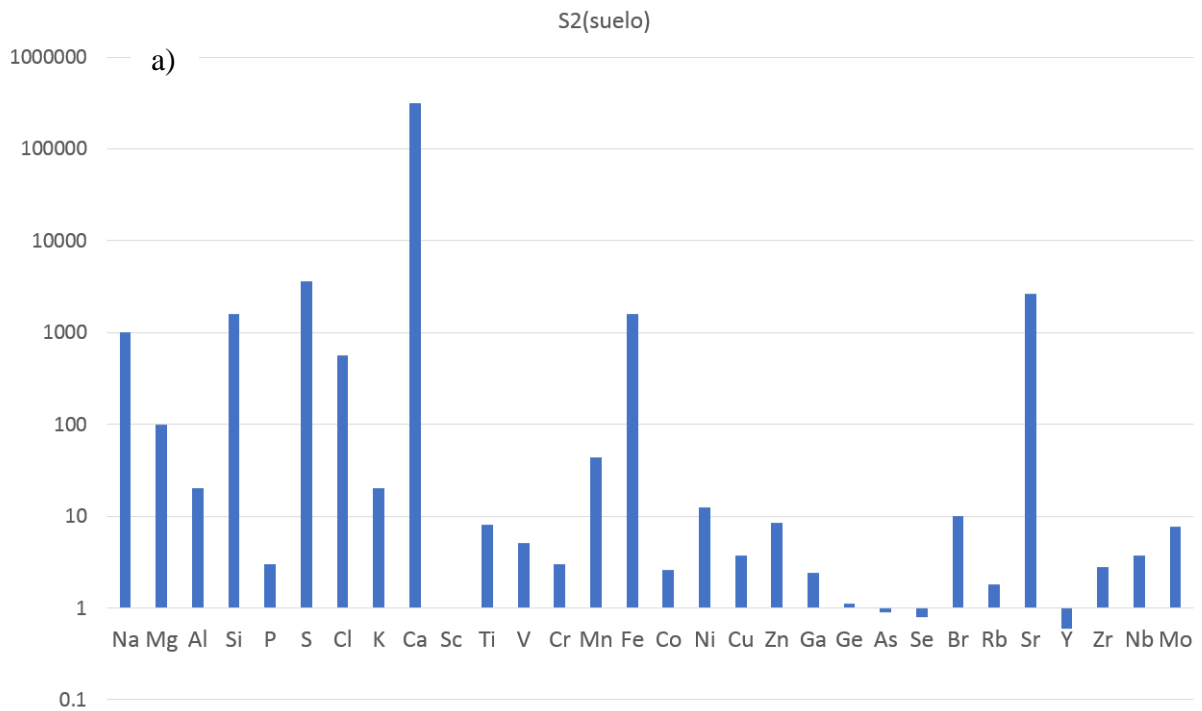
- Santa-María-Díaz, A. & Monreal, R. (2008). La Formación Los Picachos en la Sierra de Los Chinos, Sonora, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 60(1), pp. 111-120. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-33222008000100008&lng=es&tlng=es.
- SE (2018). Perfil de Mercado del Litio. Secretaría de Economía. Dirección General de Desarrollo Minero, pp. 6-7.
- SRK Consulting (UK) Limited (2015). Mineral Resource Estimate For The Sonora Lithium Project, Mexico, May 2015 (NI 43-101), pp. 24-30
- Stanley, C., Jones, G.C., Rumsey, M.S., Blake, C., Roberts, A.C., Stirling, J.A.R., Carpenter, G.J.C., Whitfield, P.S., Grice, J.D., Lepage, Y., (2007). Jadarite, LiNaSiB3O7(OH), a new mineral species from the Jadar Basin, Serbia. *Eur. J. Mineral.* 19, pp. 575.
- Starkey, H. C., (1982). The Role Of Clays In Fixing Lithium: Geological Survey Bulletin, 1278-F, pp. 6-8.
- Sweetapple, M., Holmes, J., Young, J., Grigson, M., Barnes, L., Till, S., (2017). The geology and mineralogy of the Pilgangoora lithium-tantalum pegmatite deposit.
- Taha A.A., Shreadah M.A., Hany Fathy Heiba., Ahmed A.M. (2017). Validity of Egyptian Na-montmorillonite for adsorption of Pb+2, Cd+2 and Ni+2 under acidic conditions: characterization, isotherm, kinetics, thermodynamics and application study, *Asian-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 12, pp. 292-306.
- Tardy, Y., Krempp G., Trauth, N., (1972). Le lithium dans les minéraux argileux des sédiments et des sols: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. Q8, pp. 397,407.
- Thermoscientific, (2018). Raman and FTIR Spectroscopy Complementary Technologies for Chemical and Explosives Identification. Technical note, No. 101b, pp. 56-60
- Tipler, P. A., Mosca, G. (2005). Física para la ciencia y la tecnología. Física moderna. 2C: Física moderna. Editorial REVERTÉ, pp. 70-74
- Tkachev, A. V., Rundqvist, D. V., Vishnevskaya, N. A., (2018). Metallogeny of lithium through geological time: *Russian Journal Of Earth Sciences*, v. 18, pp. 1, 3, 12. ES6002, doi:10.2205/2018ES000635
- Török, Ákos. (2008). Black crusts on travertine: Factors controlling development and stability. *Environmental Geology*. 56, pp.583-594. 10.1007/s00254-008-1297-x.
- U.S. Geological Survey, (2019). Mineral commodity summaries 2019: U.S. Geological Survey, pp. 100-102., <https://doi.org/10.3133/70202434>
- U.S. Geological Survey, (2022). Mineral Commodity Summaries, January 2022, pp. 29.

- Valencia-Moreno, M., Ortega-Rivera, A. (2011). Cretácico Tardío-Eoceno Medio en el noroeste de México—Evolución del arco magmático continental y su contexto geodinámico (orogenia Laramide), in Calmus, Thierry, ed., *Panorama de la geología de Sonora, México*: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Boletín 118, cap. 6, pp. 201.
- Wilson, F.I., Rocha, S.V., (1949). Coal deposits of the Santa Clara district near Tonichi, Sonora, Mexico: *United State Geological Survey Bulletin*, 962A, 80. Pp. 22-23.
- Zhang, Q. X., Yu, Z. Z., Yang, M., Ma, J., Mai, Y. W. (2003). Multiple melting and crystallization of nylon-66/montmorillonite nanocomposites. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, Ed. 41, Capitulo 22, doi:10.1002/polb.10608, pp. 2861–2863.

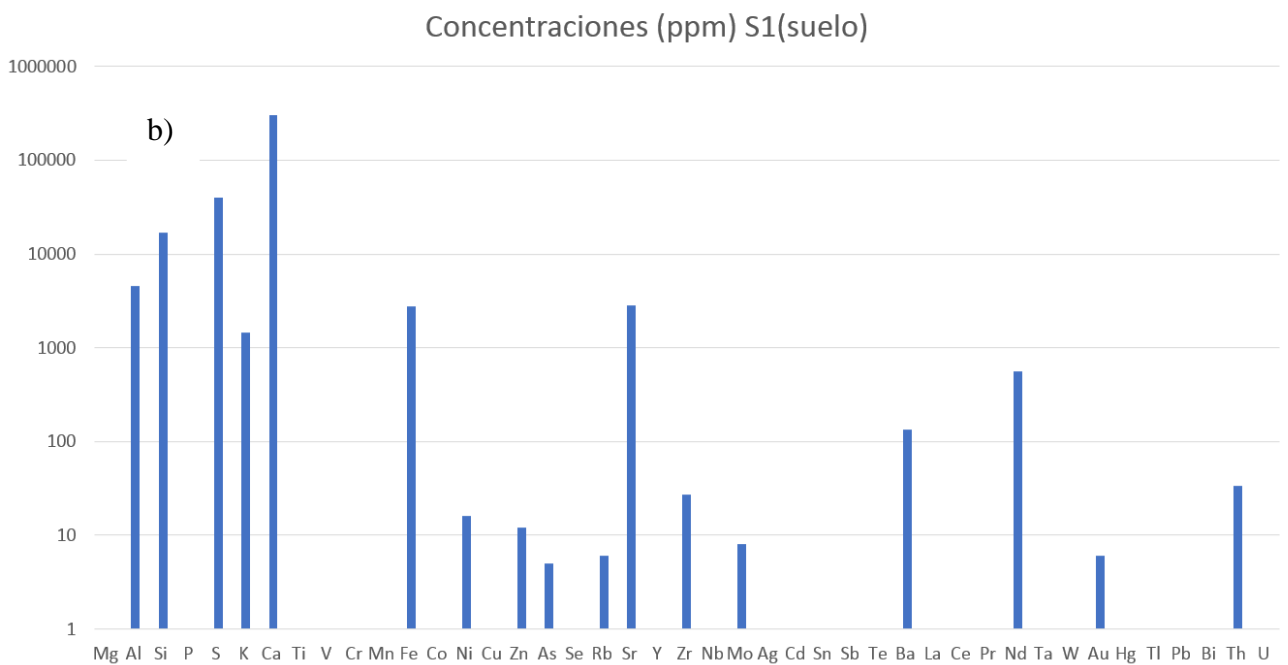
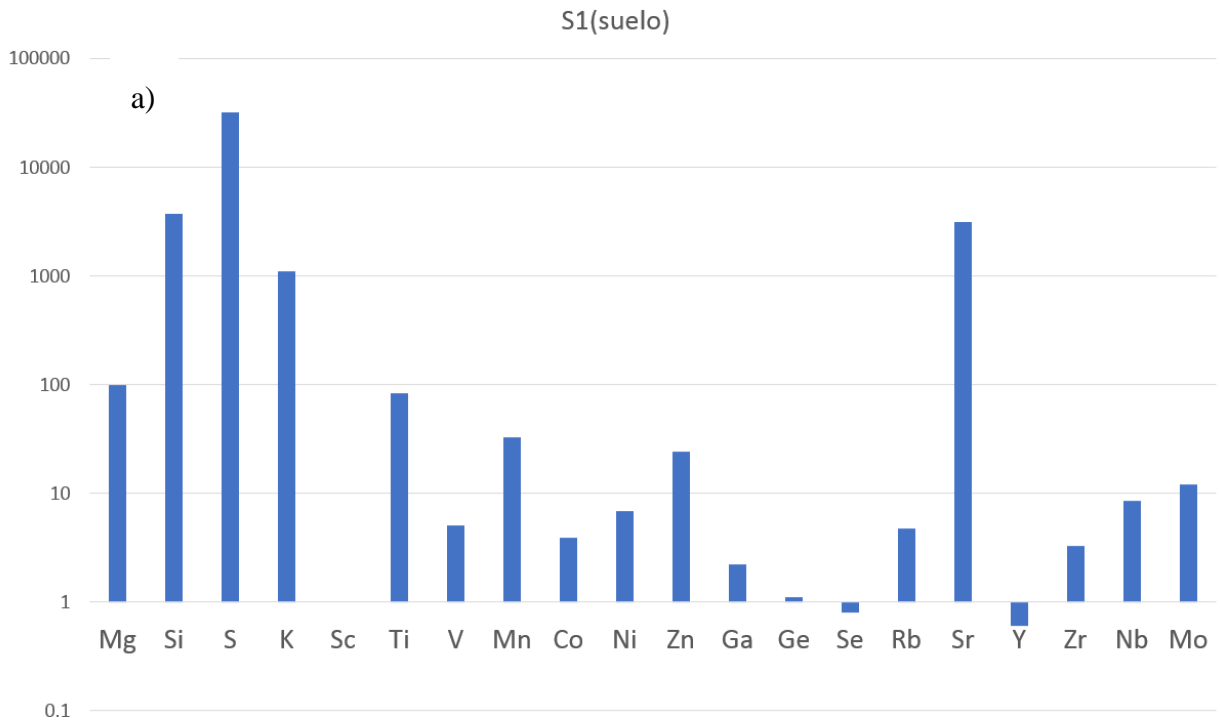
9 Anexos



Anexo 1. Concentraciones en Partes Por Millón (ppm) de la muestra de suelo de la muestra JR-4 con 1000 ppm de litio resultante del equipo a) SPECTROSCOUT y b) VANTA OLYMPUS de fluorescencia de rayos x.

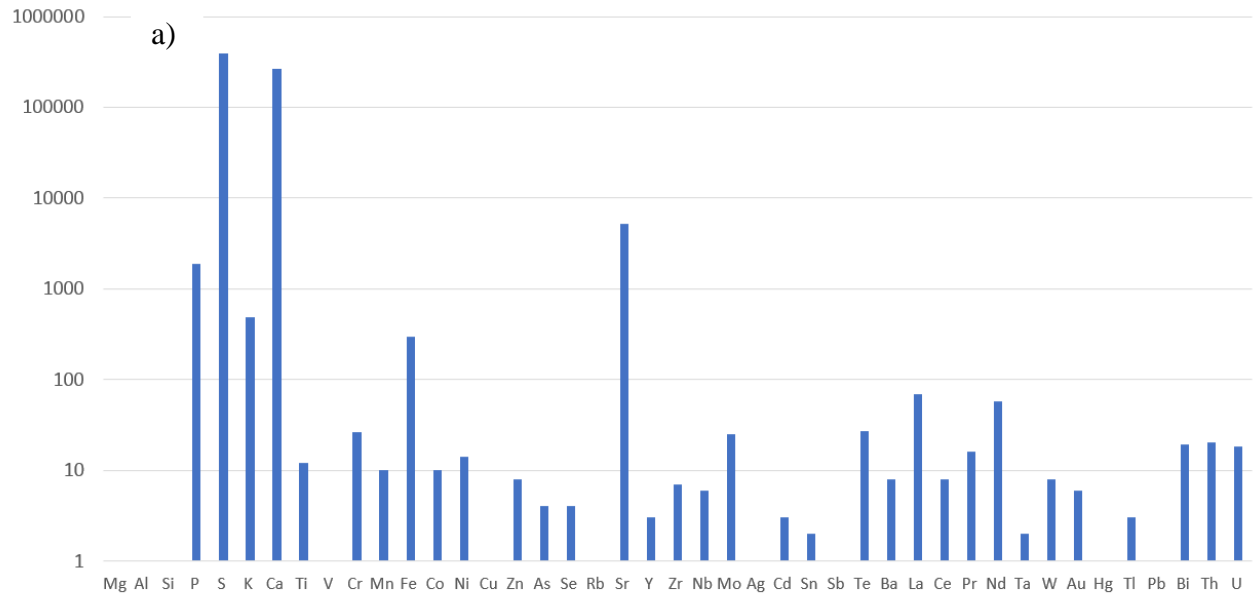


Anexo 2. Concentraciones en Partes Por Millón (ppm) de la muestra de suelo S2 con alrededor de 1000 ppm de litio resultante del equipo a) SPECTROSCOUT y b) VANTA OLYMPUS de fluorescencia de rayos x.

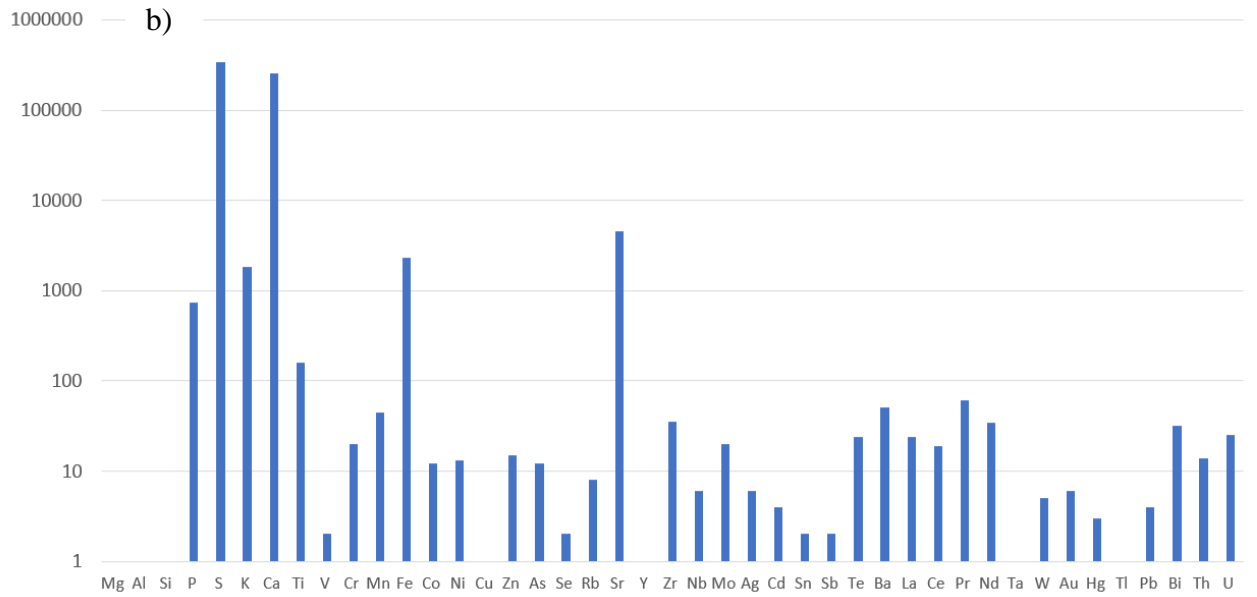


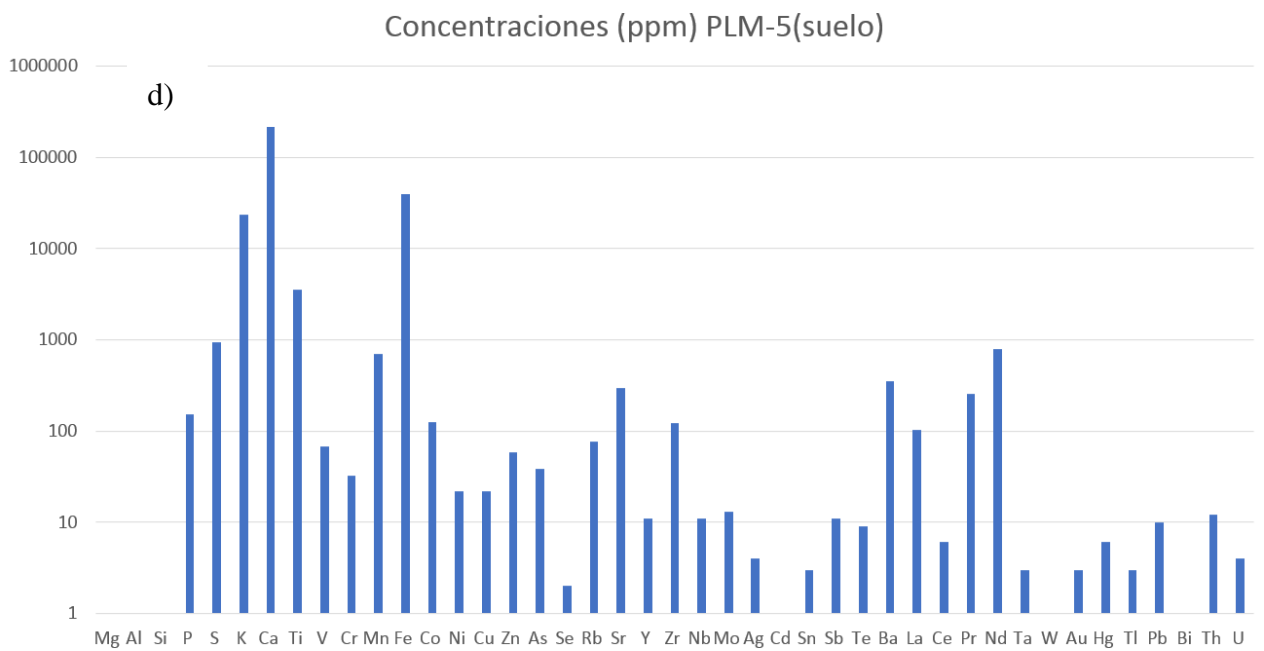
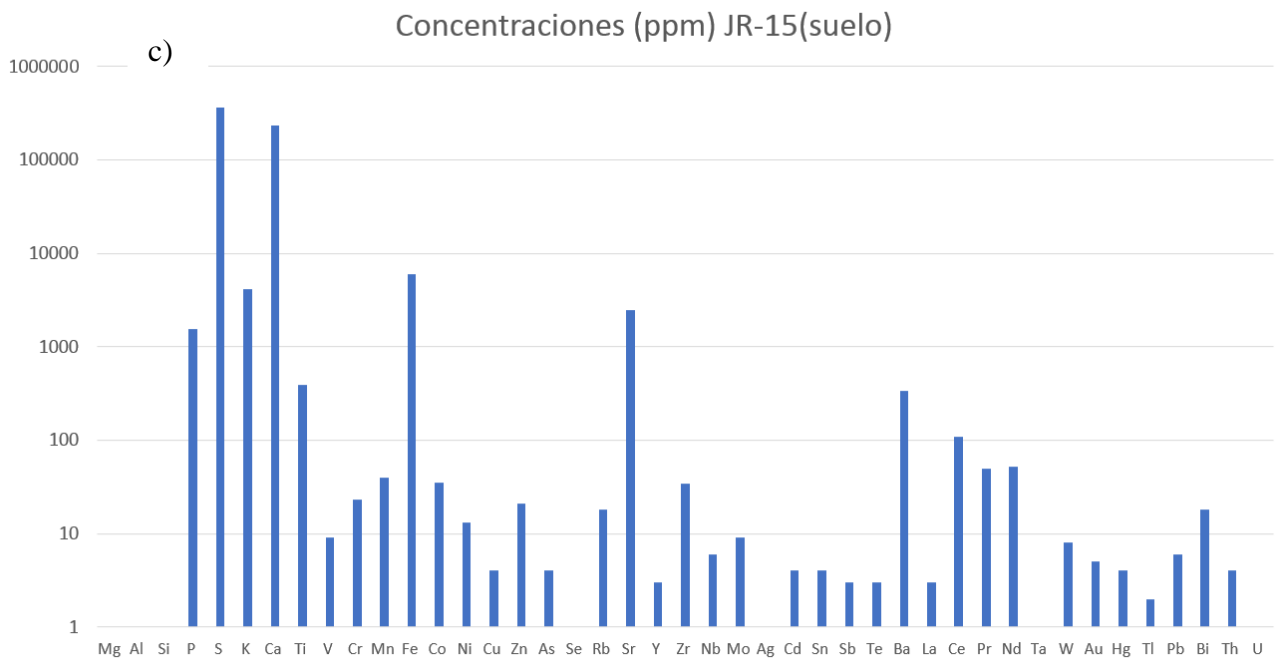
Anexo 3. Concentraciones en Partes Por Millón (ppm) de la muestra de suelo S1 con alrededor de 1000 ppm de litio resultante del equipo a) SPECTROSCOUT y b) VANTA OLYMPUS de fluorescencia de rayos x.

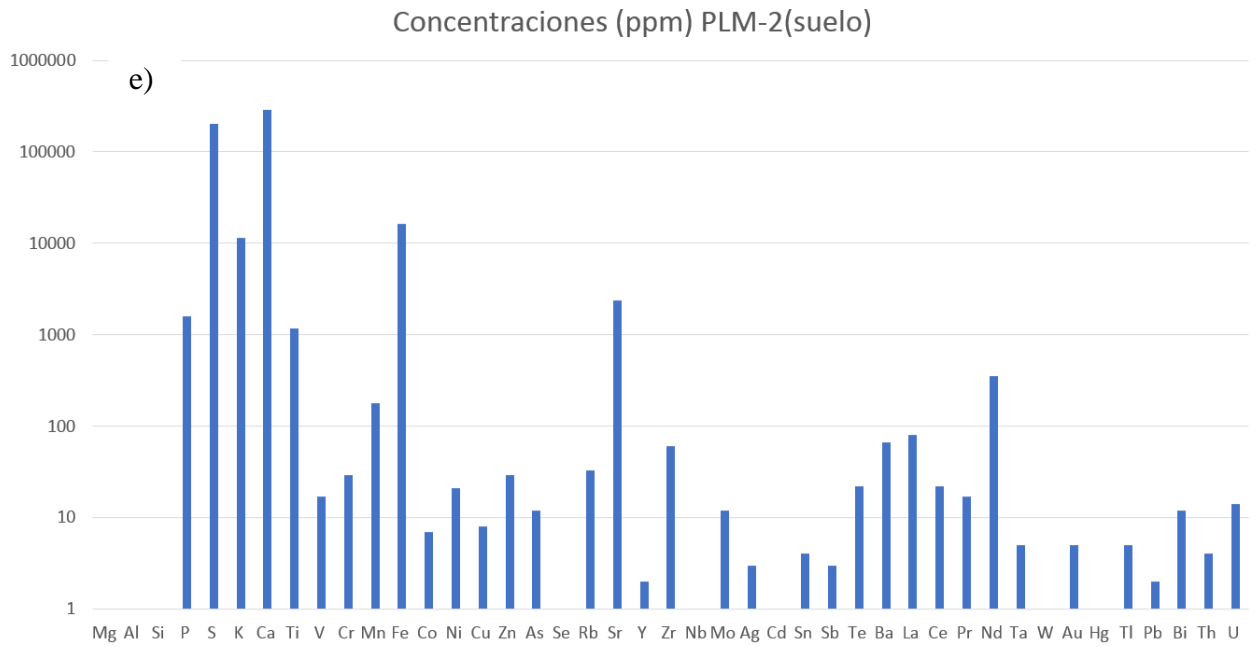
Concentraciones (ppm) JR-3(suelo)



Concentraciones (ppm) JR-2(suelo)







Anexo 4 Concentraciones elementales en ppm de los suelos adyacentes a), b), c), d) y e) a los suelos con anomalías de litio dentro del área de estudio.

<i>MUESTRA ID</i>	<i>Coordenadas</i>	<i>Roca</i>	<i>Textura</i>	<i>Minerales Primarios</i>	<i>Minerales Secundarios</i>	<i>Descripción</i>	<i>Alteraciones</i>
<i>JR-11</i>	671083m E 3247553m N	Dacita	Porfídica	Feld K, Plg sódica, Qzo.	Hta y Cta.	En muestra de mano se observan laminaciones del flujo aproximadamente de 0.5 centímetros de grosor. Muestra fracturas irregulares rellenas de calcita y hematita	Oxidación débil
<i>BT</i>	670960m E 3247792m N	Aglomerado	Inequigranular	Qzo, Feld K.	Hta, Cta y Clta	Muestran fragmentos de rocas volcánicas de composición riolítica-andesítica, y que llegan a medir entre 20 y 30	Débil alteración propilítica
<i>JR-16</i>	669768m E 3245528m N	Andesita	Porfídica	Feld K, Plg, Anf, Px,	Cta, Kao, Pta, Hta.	Roca andesítica, posiblemente relacionada con la Fm. Tarahumara.	Alteración propilítica moderada
<i>JR-6</i>	670905m E 3247822m N	Basalto	Porfídica	Plg, Feld K, Mgta, Ol.	Cta, Kao, Hta	Ligeramente vesicular con fenocristales de plagioclasa cálcica. Abundante calcita y hematita. Esta unidad litológica es afectada por fallamiento de tipo normal el cual presenta espejo de falla con estrías.	Débil alteración propilítica con mucha hematita
<i>JR-9</i>	671034m E 3247602m N	Granodiorita	Porfídica	Feld K, Plg, Qzo, Anf, Bta.	Kao, Cta, Hta	Roca intrusiva, cristalina, inequigranular, con fenocristales de plagioclasa y feldespatos potásico con pseudomorfos de kaolinita. Algunos fenocristales están reemplazados totalmente a kaolinita.	Alteración a arcillas moderada a fuerte.
<i>JR-7</i>	670525m E 3247793m N	Granodiorita	Porfídica	Feld K, Plg, Qzo, Anf.	Kao, Cta, Hta.	Roca fuertemente alterada con cristales de feldespatos potásico totalmente reemplazados a kaolinita y hematita. También en parte alterados a calcita.	Fuerte alteración a kaolinita
<i>SI</i>	670768m E 3247390m N	Suelo enriquecido en litio	Inequigranular	Cta, Yso, Qzo.	-	Muestra con raíces fosilizadas, enriquecida en litio con 1000 ppm de litio, con cristales euédricos blancos de yeso y una matriz de calcita.	Carbonatos ¿?

Tabla 6. Tabla con información petrográfica de las muestras de roca y suelo del área de estudio. Feld k = Feldespato potásico, Plg = Plagioclasa, Qzo = Cuarzo, Anf = Anfíbol, Bta = Biotita, Px = Piroxeno, Yso = Yeso, Hta = Hematita, Cta = Calcita, Clta = Clorita, Kao = Kaolinita, Pta = Pirita.