



Universidad Autónoma de San Luis Potosí
Facultad de Ingeniería
Centro de Investigación y Estudios de Posgrado

“Caracterización de fuentes geogénicas de arsénico, fluoruro y uranio al agua subterránea de la Comarca Lagunera, México”.

T E S I S

Que para obtener el grado de:

Maestra en Tecnología y Gestión del Agua

Presenta:

Ing. Andrea Araceli Flores Salinas

Director:

Dr. Antonio Cardona Benavides

Co-director:

Dr. Guillermo Javier Castro Larragoitia

Asesores:

Dr. Hermann Rocha Escalante

Dr. Israel Razo Soto





FACULTAD DE
INGENIERÍA

16 de mayo de 2024

**ING. ANDREA ARACELI FLORES SALINAS
P R E S E N T E.**

En atención a su solicitud de Temario, presentada por los **Dres. Antonio Cardona Benavides y Guillermo Javier Castro Larragoitia**, *Asesor y Coasesor de la Tesis* que desarrollará Usted, con el objeto de obtener el Grado de **Maestra en Tecnología y Gestión del Agua**. Me es grato comunicarle que en la sesión del H. Consejo Técnico Consultivo celebrada el día 16 de mayo del presente, fue aprobado el Temario propuesto:

TEMARIO:

"Caracterización de fuentes geogénicas de arsénico, fluoruro y uranio al agua subterránea de la Comarca Lagunera, México."

Introducción.

1. Antecedentes.
2. Metodología de caracterización de matrices ambientales.
3. Caracterización geoquímica y mineralógica de fuentes geogénicas.
4. Análisis hidrogeoquímicos de los sistemas de flujo de agua subterránea.
5. Origen y movilización de As, F y U a partir de rocas y sedimentos.
6. Discusión de resultados.

Conclusiones y recomendaciones.

Referencias.

Anexos.

"MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO"

ATENTAMENTE

DR. EMILIO JORGE GONZÁLEZ GALVÁN
DIRECTOR.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE SAN LUIS POTOSÍ
FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCIÓN

www.uaslp.mx

Av. Manuel Nava 8
Zona Universitaria • CP 78290
San Luis Potosí, S.L.P.
tel. (444) 826 2330 al 39
fax (444) 826 2336

Copia. Archivo.
*etn.

"UASLP, con profesionistas abiertos al mundo"



UASLP
Universidad Autónoma
de San Luis Potosí



FACULTAD DE
INGENIERÍA



CENTRO DE
**INVESTIGACIÓN
Y ESTUDIOS
DE POSGRADO**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ
FACULTAD DE INGENIERÍA
Área de Investigación y Estudios de Posgrado

DECLARACIÓN

El presente trabajo que lleva por título:

Caracterización de fuentes geogénicas de arsénico, fluoruro y uranio al agua
subterránea de la Comarca Lagunera, México.

se realizó en el periodo agosto de 2022 a septiembre de 2024 bajo la dirección del Dr.
Antonio Cardona Benavides y Dr. Guillermo Javier Castro Larragoitia.

Originalidad

Por este medio aseguro que he realizado el trabajo reportado, y la escritura de este documento de tesis para fines académicos sin ayuda indebida de terceros y sin utilizar otros medios más que los indicados.

Las referencias e información tomadas directa o indirectamente de otras fuentes se han definido en el texto como tales y se ha dado el debido crédito a las mismas.

El autor exime a la UASLP de las opiniones vertidas en este trabajo escrito y asume la responsabilidad total del mismo.

Este trabajo no ha sido sometido como tesis o trabajo terminal a ninguna otra institución nacional o internacional en forma parcial o total, exceptuando el caso cuando existe un convenio específico de doble titulación celebrado entre ambas instituciones.

Se autoriza a la UASLP para que divulgue este documento para fines académicos.

El autor del trabajo escrito, Andrea Araceli Flores Salinas.

Contenido

Índice de ilustraciones.....	v
Índice de tablas	vii
Dedicatoria.....	viii
Agradecimientos	ix
Resumen.....	xi
Abstract.....	xii
Introducción	1
1. Antecedentes	4
1.1. Arsénico	4
1.2. Fluoruro.....	6
1.3. Uranio	8
1.4. Estado del arte.....	10
1.5. Área de estudio	15
1.6. Geología.....	16
1.7. Estratigrafía.....	18
1.8. Geología Estructural	26
1.9. Hidrología	27
1.10. Hipótesis	29
1.11. Justificación	29
1.12. Objetivo general.....	29
1.13. Objetivos específicos	29
2. Metodología de caracterización de matrices ambientales	31
2.1. Muestras sólidas.....	31
2.2. Muestras de agua.....	35
3. Caracterización geoquímica y mineralógica de fuentes geogénicas	37
3.1. Petrografía.....	37
3.2. Geoquímica de roca total	47
3.3. Caracterización mineralógica por DRX y MEB	48
4. Análisis hidrogeoquímicos de los sistemas de flujo de agua subterránea.....	54
4.1. Familias de agua subterránea y calidad de agua	56
4.2. Análisis estadístico de aguas.....	59
5. Origen y movilización de As, F y U a partir de rocas y sedimentos.....	61

6. Discusión de resultados.....	68
6.1. Conclusiones y recomendaciones	73
Referencias.....	75
Anexos	83

Índice de ilustraciones

Ilustración 1. Ubicación geográfica de la CL.	15
Ilustración 2. Columna cronoestratigráfica detallada de la Comarca Lagunera.	25
Ilustración 3. Perfil geológico de la zona de estudio. Flores-Salinas y Barboza-Gudiño, 2024... 28	28
Ilustración 4. Localización de toma de muestreo de rocas y sedimentos.	34
Ilustración 5. Parte de la metodología de trabajo implementada en este proyecto.	36
Ilustración 6. Zona de reacción en muestra LR03 endoskarn, se aprecia la calcita (Cal) y cristales de feldespato (Fapt) diseminado. Nícoles cruzados 5x.....	38
Ilustración 7. Cristal de hornblenda (Hbl) en matriz de calcita (Cal), se pueden observar feldespatos (Fapt) en toda la matriz de la roca. Nícoles cruzados 2x.	38
Ilustración 8. Matriz de mudstone que contiene fósiles: bráquipodos mal preservados (Brq) y miliólidos (Milio). Nícoles cruzados 5x.	39
Ilustración 9. Alteración de plagioclasa (Plg) a feldespato (Fld), se observa en su borde una reacción donde aparecen óxidos de hierro (FeOx). Nícoles cruzados, 10x.	41
Ilustración 10. Exsolución de cuarzo (Qtz) por mezcla de magmas, además se nota la seritización en las plagioclasas (Plg). Nícoles cruzados, 5x.	41
Ilustración 11. Cristales de fluorapatito (Fapt) diseminados en una alteración de biotita (Bt) a clorita (Cl), aprovecha este proceso los óxidos de hierro (FeOx) para formarse. Nícoles paralelos, 5x.....	43
Ilustración 12. Se observa un circón (Zr) que destaca por su relieve, cuarzos (Qtz) subhedrales así como biotitas (Bt) que se están alterando. Nícoles paralelos, 5x.....	43
Ilustración 13. Cristal de hematita (He) en una matriz fluidal de esferulitas (Esf). Nícoles cruzados, 5x.....	44
Ilustración 14. Cristal de hematita (He) en una matriz fluidal de esferulitas (Esf). Nícoles paralelos, 5x.....	45
Ilustración 15. Se observa disolución en el cristal de cuarzo (Qtz), una plagioclasa (Plg) alterada, múltiples óxidos de hierro (FeOx), así como alteraciones en los cristales de hornblenda (Hb) y biotita (Bt). Se aprecia un circón (Zr) incrustado. Nícoles paralelos, 5x.....	46
Ilustración 16. Difractograma de la muestra LR14 Ignimbrita Fm. Nazas.....	50
Ilustración 17. Muestra LR18, espectro y porcentaje de uno de los fluorapatitos que parecen diseminados en distintos tamaños en toda la matriz rocosa. Bt= biotita. FeOx= óxidos de hierro. Zr= circón. Hb= hornblenda. Il= ilmenita. Fapt= fluorapatito. Flk= feldespato alcalino y Blg= boulangerita.....	51
Ilustración 18. Cristales de Xenotima con As reemplazando el P. Flk= feldespato alcalino. FeOx= óxidos de hierro. Xe= xenotima.....	52
Ilustración 19. Monacita con As en su estructura cristalina. Mo= monacita.	53
Ilustración 20. Diagramas de Stiff para las muestras de agua y su ubicación geográfica dentro del área de estudio.....	55
Ilustración 21. Ubicación de muestras con sus respectivas cantidades de contaminantes en agua y materia sólida.	57
Ilustración 22. Diagrama de clasificación de Piper para aguas subterráneas caracterizadas en el presente estudio.....	58
Ilustración 23. Gráfico de barras apiladas con porcentaje de movilización para resultados de extracciones secuenciales en As.	62

Ilustración 24. Gráfico de barras apiladas con porcentaje de movilización para resultados de extracciones secuenciales de F ⁻ en rocas.	62
Ilustración 25. Gráfico de barras apiladas con porcentaje de movilización para resultados de extracciones secuenciales en rocas con uranio.	63
Ilustración 26. Gráfico de barras apiladas con porcentaje de movilización para resultados de extracciones secuenciales de As en sedimentos.....	64
Ilustración 27. Gráfico de barras apiladas con porcentaje de movilización para resultados de extracciones secuenciales para el caso de F ⁻ en sedimentos.	65
Ilustración 28. Gráfico de barras apiladas con porcentaje de movilización para resultados de extracciones secuenciales para U en sedimentos.	66
Ilustración 29. Gráfico para extracción de fluoruro en su totalidad en dos muestras de roca.	67
Ilustración 30. Modelo conceptual propuesto para la formación y movilización de contaminantes en el agua subterránea de la Comarca Lagunera. Flores-Salinas y Bandin-Tello, 2024.	72
Ilustración 31. Biotita y clinopiroxeno alterado bajo aumento 5x en nicoles cruzados.	84
Ilustración 32. Minerales opacos y matriz con seritización, 5x nicoles paralelos.	84
Ilustración 33. Presencia de vídrio y circón incrustado en biotita, nicoles paralelos con objetivo 5x.	85
Ilustración 34. Biotita en matriz fluidal, aumento 5x nicoles cruzados.....	86
Ilustración 35. Plagioclasas altamente alteradas con óxidos de hierro bajo objetivo 5X. Nicoles paralelos.	87
Ilustración 36. Se observa una calcita secundaria generada por alteración de feldespatos. 5x, nicoles cruzados.	87
Ilustración 37. Textura axiolítica presente en la roca. Nicoles cruzados, 5x.....	89
Ilustración 38. Olivino en matriz de plagioclasa, fracturas rellenas de vídrio vista bajo objetivo 5x y nicoles paralelos.....	90
Ilustración 39. Presencia de clinopiroxeno y olivino en basalto en matriz félsica, 5x en nicoles cruzados.	90
Ilustración 40. Biotitas (minerales color café) bajo objetivo 20x en nicoles paralelos.	91
Ilustración 41. Matriz de plagioclasa con seritización entre biotitas, 20x nicoles cruzados.	92
Ilustración 42. Espectro de la roca LR03.....	103
Ilustración 43. Espectro perteneciente a la riolita Vallecillos LR20.	103
Ilustración 44. DRX de la toba riolítica LR21.....	104
Ilustración 45. Espectro del sedimento LS01, junto al intrusivo El Sarnoso.....	104
Ilustración 46. Espectro del sedimento LS13, el nacimiento del Río Nazas cerca del Cañón de Fernández.....	105
Ilustración 47. DRX del sedimento LS15, el Río Nazas después de atravesar la zona metropolitana de la Comarca Lagunera.	105
Ilustración 48. Circón con U en su estructura presente en la muestra LR18.	106
Ilustración 49. Cristal de monacita en riolita LR20.....	107
Ilustración 50. Monacita con As en su estructura cristalina en riolita LR21.....	108
Ilustración 51. Óxido de Cerio que incluye As en su estructura en muestra LR21, riolita.....	109
Ilustración 52. Presencia de As y tierras raras en la muestra LR21, riolita.	110
Ilustración 53. Parte superior de Xenotima en muestra LR20, presenta cantidades de Asx	111

Índice de tablas

Tabla 1. Origen en algunas ciudades que presentan afectaciones por contaminantes en el agua subterránea. Modificado de Gutiérrez <i>et al.</i> , 2021.....	11
Tabla 2. Fases propuestas para las extracciones secuenciales.	35
Tabla 3. Resultados de elementos de interés presentes en las muestras de roca.	47
Tabla 4. Resultados de análisis de los elementos de interés presentes en las muestras de sedimentos.	48
Tabla 5. Mineralogía principal encontrada en las rocas y sedimentos del estudio mediante DRX.	49
Tabla 6. Promedios de las variables presentes en las familias de agua.	54
Tabla 7. Matriz de correlaciones para parámetros en muestras de agua.....	60

Dedicatoria

Para mis padres, Lorenzo Flores de la Rosa y Araceli Salinas Muñoz, por darme todo lo que tengo, hacerme quién soy y amarme como lo hacen.

Agradecimientos

Principalmente, gracias a mi asesor, el Dr. Antonio Cardona Benavides, por dar seguimiento y apoyo a este proyecto y brindar las unidades de aprendizaje para el desarrollo del mismo, al Dr. Guillermo Javier Castro Larragoitia por co-dirigir mi tesis y por siempre estar al pendiente de mi trabajo de campo, laboratorio, gabinete y ponencias, gracias por compartirme sus consejos y experiencias. El Dr. Israel Razo Soto y el Dr. Hermann Rocha Escalante, por formar parte de mi comité y por todas las observaciones a mi trabajo. Gracias al CONAHCYT por la beca otorgada, No. CVU 1232137.

Para los análisis de geoquímica del agua, equipos y reactivos, gracias al Laboratorio de Agua y Suelo de la Facultad de Ingeniería UASLP y a su responsable, la Dra. María Elena García Arreola por todo su apoyo y seguimiento a mi trabajo, así como al desarrollo de extracciones secuenciales. Para la recolección de muestras de campo y procesamiento, gracias a la Ing. Sarai del Consuelo Resendiz Ortiz, eres madre, te admiro y te quiero, gracias por ser tan real conmigo. A los M.T.G.A. Heriberto González Sánchez y Octavio Ortiz Enriquez por acompañarme en cada muestreo, el trabajo realizado en laboratorio, pero sobre todo por su amistad.

Infinitas gracias a todo el equipo del Laboratorio de Geoquímica del Instituto de Geología de la UASLP por las digestiones de muestras, análisis ICP-OES, ICP-MS y extracciones secuenciales: L.Q. Miguel Ángel Cortina Rangel, M.T.G.A. Juan José Félix Carrillo, Alondra Mejía Molina y Marco Antonio Castillo Cruz, mi trabajo nunca hubiera salido adelante sin ustedes, gracias por la paciencia y disposición siempre.

Para la elaboración de láminas delgadas y petrografía muchas gracias al Instituto de Geología de la UASLP, así como en el Taller de Laminación de Petrografía y Mineragrafía del área de Geología, al maestro Marco Antonio Rojas Beltrán, Ing. Erasmo Mata Martínez, maestro José Helios Serna Bafún, Dra. Sonia Alejandra Torres Hernández y al Dr. Rafael Barboza Gudiño.

Agradecimientos al Dr. Antonio Aragón Piña por su ayuda en la revisión de mineralogía de mis rocas y al Instituto de Metalurgia de la UASLP por permitirme hacer uso de sus instalaciones y equipo para la caracterización de mis muestras, M.M.I.M. Rosa Lina Tovar para DRX e Ing. José Manuel Martínez para MEB.

M.T.G.A. Diana Arlette de León Saucedo, M.T.G.A. José Isabel Rivera Benítez, M.T.G.A. Claudia Maricela López Cruz y M.T.G.A. Ulises Juárez Martínez que son los mejores compañeros que pude haber tenido, fuera y dentro del posgrado fueron una compañía increíble, sé que tendrán todo el éxito del mundo en lo que se propongan porque son las personas más capaces que he conocido, siempre podrán contar conmigo ¡los quiero y los voy a extrañar bandamax!

Por último, gracias mi familia, Lorenzo Flores de la Rosa, Araceli Salinas Muñoz, Marcelo Flores Salinas y Angel Adrián Flores Salinas, por construirme, apoyarme y acompañarme incluso a la distancia, así como a Benito y Aragorn, mis gatitos, mis adoraciones. Y a la otra parte de mi familia, a Jorge de Jesús Bandín Tello, por co-diseñar conmigo el modelo conceptual de esta tesis, pero, sobre todo, gracias por la inspiración, ayuda, comprensión, felicidad y amor que me das todos los días, porque eres mi compañía de toda la vida, mi hogar, por enseñarme y aprender conmigo, gracias por todo Jojo.

Este trabajo de maestría se realizó gracias al apoyo del **PROYECTO DE INVESTIGACIÓN EN MATERIA DE SALUD Y AMBIENTE PARA LOGRAR JUSTICIA PARA LA LAGUNA: INTERSECCIONES ENTRE SALUD, AMBIENTE Y ESTATUS ECONÓMICO.**

CONAHCYT - PRONACES 321540

Dr. Gonzalo García Vargas, responsable.

Dr. Guillermo Javier Castro Larragoitia, identificación del origen y controles de la presencia arsénico y fluoruro en el agua subterránea para una gestión óptima.

Resumen

El agua subterránea de la Comarca Lagunera presenta concentraciones de arsénico (As), fluoruro (F^-) y uranio (U) que sobrepasan los límites permisibles de agua para consumo humano (NOM-127-SSA1-2021 y OMS, 2011) ocasionando en la población fluorosis dental, decoloraciones en la piel, distintos tipos de cáncer y muchas enfermedades más (Armienta *et al.*, 2013). La fuente de esta contaminación tiene un origen natural (Alvarado *et al.*, 2022), sin embargo, no se han identificado ni caracterizado los minerales portadores en su totalidad, así como tampoco se ha explicado cómo se movilizan los elementos hacia el agua del acuífero. En este proyecto se evaluaron y caracterizaron las fuentes geogénicas de As, F^- y U hacia los sistemas de flujo del agua subterránea. Se colectaron 52 muestras sólidas enfocadas en la zona de recarga y descarga, rocas ígneas félsicas, metamórficas y sedimentarias, así como 119 muestras de agua donde se midió *in situ* temperatura, pH, conductividad eléctrica y ORP. Se utilizó microscopía de polarización para la identificación de minerales primarios y alteraciones, las muestras de materia sólida y agua se analizaron bajo ICP-OES e ICP-MS; mediante DRX y MEB se identificaron fases mineralógicas. Se diseñó y aplicó un esquema novedoso de extracciones secuenciales con el que se evaluó la movilización de los contaminantes. Las familias de agua sulfatada-cálcica y mixta-sódica presentan los niveles más altos de U (18.83 $\mu g/L$), As (157.57 $\mu g/L$) y F^- (2.63 mg/L). Las fuentes principales de los elementos de interés encontradas en este trabajo son las calizas de la Fm. Treviño en Coahuila (2430 mg/kg F^-), riolitas de Vallecillos (66-99 mg/Kg de As 5.2-7.1 mg/Kg de U), ignimbrita de la Fm. Nazas en Monterrey (31 mg/kg de As) y granodiorita de Dinamita (1700 mg/kg de F^- y 9.2 mg/kg de U), zonas pertenecientes a Durango. En sedimentos, destacan los de la cercanía al intrusivo El Sarnoso (110 mg/kg de As) y Río Nazas (42 mg/kg de As y 4 mg/Kg de U). El circón fue identificado como el principal mineral portador de U, el fluorapatito en rocas ígneas y algunas calizas fosilíferas de la Formación Treviño se señalan como las principales fuentes de F^- . Monacita y xenotima son las portadoras de As encontradas en su estructura cristalina en las muestras recolectadas. Para el As en rocas, los contaminantes se movilizan debido al intercambio de cationes entre arsenato y fosfato, además, se asocian con fosfatos por desorción; para sedimentos, el As se moviliza principalmente en la fase soluble. En el caso del F^- en rocas, el elemento se moviliza a partir de oxihidróxidos de Fe cristalinos y sílica amorfa, para sedimentos, las fases de oxihidróxidos de Fe cristalinos, sílica amorfa y fase soluble son determinantes a la hora de movilizar el elemento. Finalmente, los contaminantes de U se movilizan principalmente en la fase de fosfatos y óxidos de Fe y Mn amorfos para rocas, para sedimentos, la fase ligada a carbonato es relevante.

Abstract

The Comarca Lagunera presents concentrations of arsenic (As), uranium (U) and fluoride (F⁻) that exceed permissible limits for drinking water (NOM-127-SSA-2022 and WHO), causing dental fluorosis, skin discolorations, various types of cancer and many other diseases in the population (Armienta et al., 2013). The source of this contamination is natural origin (Alvarado et al., 2022); however, the specific minerals that carry these elements have not been fully characterized nor has it been explained how they mobilize into groundwater. This project evaluated and characterized the geogenic sources of As, F⁻ and U in groundwater flow systems. Fifty-two solid samples were collected, focused on the recharge and discharge zone, felsic igneous rocks, metamorphic and sedimentary rocks, also 119 water samples, where temperature, pH, electrical conductivity and ORP were measured in situ. Polarized microscopy was used for the identification of primary minerals and alterations. Rocks, sediments and water samples were analyzed using ICP-OES and ICP-MS; mineral phases were identified using XRD and SEM. The potential mobilization of the contaminants from the geogenic sources was assessed through a modified sequential extraction procedure. The sulfate-calcium and mixed-sodium water types present the highest levels of U (18.83 µg/L), As (157.57 µg/L) y F⁻ (2.63 mg/L). The highest concentrations of the elements of interest were found in the Fm. Treviño limestones in Coahuila (2430 mg/kg F), Vallecillos rhyolites (66-99 mg/kg of As, 5.2-7.1 mg/kg of U), ignimbrite Fm. Nazas in Monterrey (31 mg/kg of As) and Dinamita granodiorite (1700 mg/kg of F and 9.2 mg/kg of U) areas located in Durango. In sediments, notable concentrations were found near the intrusive El Sarnoso (110 mg/kg of As) and Río Nazas (42 mg/kg of As and 4 mg/kg of U). This work could identify As bearing minerals like Xenotime/Chernovite, Monazite, and REE-oxides. Zircon was identified as the main U-bearing mineral and Fluoroapatite in igneous rocks and some fossiliferous limestones of the Treviño Formation are the main F⁻ sources. For As in rocks, the contaminants are mobilized due to cation exchange between arsenate and phosphate and associated with phosphates by desorption; for sediments, the As mobilize mainly in the soluble phase. In the case of F⁻ in rocks, the element is mobilized from crystalline Fe oxyhydroxides and amorphous silica, for sediments, the phases from crystalline Fe oxyhydroxides, soluble and amorphous silica are important to mobilize the element. Finally, U contaminants are primarily mobilized in the phosphates and amorphous Fe and Mn oxides phase for rocks, for sediments, the carbonate-bound phase is relevant

Introducción

La problemática de la calidad del agua subterránea ha ido al aumento a medida que la demanda del recurso crece, exponiendo cada vez a más los sectores de la población al peligro derivado del consumo de agua contaminada. La disponibilidad efectiva del agua se ha reducido debido al desequilibrio que trae consigo el crecimiento de la demanda, uso ineficiente del recurso y aumento de los niveles de contaminación (Soria *et al.*, 2006). Para comenzar a entender este problema, es estrictamente necesario conocer la fuente del contaminante, ya que, aunque las aguas puedan ser tratadas, el problema prevalecerá. El arsénico (As) y el fluoruro (F^-) son los contaminantes más abundantes y dañinos en el agua subterránea hasta la fecha (Armienta y Segovia, 2008), en México, el 7% de los acuíferos se encuentran contaminados y el 3.5% fuertemente contaminados (CONAGUA, 2018) albergando agua subterránea que presenta concentraciones de contaminantes por encima de los límites permisibles establecidos por la norma mexicana NOM-127-SSA1-2021 (ej. 0.010 mg/L As y 1 mg/L de F^-). A diferencia de los dos elementos antes mencionados, sobre todo el As cuya toxicidad se encuentra bien documentada, el uranio (U) no se ha estudiado lo suficiente en años anteriores. Recientemente se demostró que su toxicidad principal es dada como metal pesado nefrotóxico (relacionado a enfermedades renales) y no meramente radiactivo, como se creía. Es importante mencionar que el U hasta la fecha, no cuenta con un acuerdo general sobre limitaciones fijas sobre su presencia en el agua potable. La Organización Mundial de la Salud (OMS) cuenta con un valor de referencia provisional de 30 $\mu\text{g/L}$; en Alemania, el límite permisible es de 10 $\mu\text{g/L}$ desde 2011, siendo este el único país europeo que contempla el elemento en su norma *Trinkwasserverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 10.* Si se compara con el As, las áreas geogénicas con problemas de U en sus aguas subterráneas son mucho menores, sin embargo, van en aumento, ya que se ha reconocido que los acuíferos con alto contenido de U representan un fenómeno de alcance global (Banning, 2021).

En Chihuahua, San Luis Potosí, Morelia y otros estados de México localizados en centro y norte del país, el origen del As y F^- ha sido relacionado con fuentes geogénicas asociadas con acuíferos aluviales rellenos, en parte, con material volcánico rico en dichos elementos (Camacho *et al.*, 2011; Planer-Friedrich *et al.*, 2001; Reyes-Gómez 2010; Reyes-Gómez *et al.*, 2013). Una segunda fuente muy común es la contaminación por actividades mineras (Méndez y Armienta 2003; Razo *et al.*, 1990) y las soluciones geotérmicas (Birkle y Merkel 2000; Camacho *et al.*, 2011; Barrera-Prieto 2009). Por el contrario, las fuentes de U han sido pobremente estudiadas alrededor del mundo.

La Comarca Lagunera (CL) es una región integrada por cinco municipios de Coahuila (Matamoros, San Pedro, Torreón, Viesca y Francisco I. Madero) y diez de Durango (Lerdo, Gómez Palacio, Mapimí, Nazas, Rodeo, Tlahualilo, Simón Bolívar, San Juan de Guadalupe, San Luis del Cordero y San Pedro del Gallo) que presenta serios problemas de contaminación en el agua subterránea, además de problemas de abastecimiento (Cervantes y Franco 2006). Además, es considerada una de las regiones más contaminadas por As en el mundo, contaminación que afecta a su población, animales y cultivos. Ejemplo de esto es un estudio realizado en 2010, donde se analizaron muestras de leche cruda en establos de la CL mediante un Kit de As Merckoquant, arrojando valores mayores a 10 ng/g, sobrepasando los límites permisibles que dicta la Federación

INTRODUCCIÓN

Internacional de Lechería, cabe mencionar que la CL es la cuenca lechera más importante de México (Bautista 2010).

El crecimiento en la producción industrial ha ido de la mano con el aumento en la demanda de agua, mencionando como ejemplo a la industria textil y agroindustria. El sector industrial lagunero está conformado por 871 empresas que en el año 2004 aportaron el 44.6% al Producto Interno Bruto (PIB) de la región. De estas, la industria ganadera presenta un crecimiento medio anual de 14.3% (Soria *et al.*, 2006).

La problemática comienza con su localización desértica, por lo que el recurso hídrico no es abundante, además, la intercepción de sus causas de ríos principales para convertirlos en presas destinadas a la agricultura terminaron por causar la desecación de las lagunas principales en el área y a su vez, el aumento de perforación de pozos de agua. La sobreexplotación de los mantos freáticos con baja recarga y crecimiento de la población, desencadenaron en problemas de abasto de agua potable, tratamiento y monitoreo de aguas residuales, competencia entre agricultores por concesión de pozos, extracción clandestina y por supuesto, aumento en la contaminación por bombeo excesivo (Soria *et al.*, 2006; Cervantes y Franco 2006; Enríquez *et al.*, 2021).

La alta variabilidad en los escurrimientos y las sequías prolongadas son la causa de que las aguas subterráneas en la región sean el recurso más confiable y el único para dar abastecimiento no solo a la población, sino al sector pecuario e industrial, cuya fuente es exclusivamente el recurso de agua subterránea (Cervantes y Franco 2006).

En 1958 se reportó por primera vez un caso de intoxicación crónica por arsénico en esta zona (Armienta y Segovia 2008). Fue el 16 de agosto de 1962, que la comisión de vecinos de las colonias Miguel Alemán y Eduardo Guerra, ambas ubicadas en la parte noreste de Torreón, Coahuila, informaron a la Unidad Sanitaria de Torreón que en sus colonias la gente estaba muy enferma, sospechando que la enfermedad provenía del agua que bebían. Las autoridades comprobaron que el problema era grave confirmando casos clínicos de afecciones dermoepidérmicas muy evidentes en el cuello, plantas de los pies y manos de las personas en dichas colonias, además de que algunos presentaban hiperqueratosis y pápulas en la piel, hígado hipertrofiado y ascitis en niños. Estas enfermedades no distinguían de sexo ni edad y muchos de los afectados requirieron hospitalización. Cuando se estudió el pozo que abastecía a las colonias, se encontró que contaba con 3980 µg/L de As, los habitantes más longevos de la comunidad llevaban ahí 10 años consumiendo el agua altamente contaminada. Las colonias se localizaban de forma aledaña con una compañía metalúrgica de arsénico sublimado y cadmio que llevaba operando por 60 años. Se realizaron estudios epidemiológicos a 496 habitantes de ambas colonias, de ellos, 297 mostraron signos y síntomas de arsenicismo, 217 con síntomas benignos, 70 con síntomas severos, 8 graves y 2 defunciones (Castellano *et al.*, 1964).

Un estudio aplicado en comunidades rurales de la CL en 1986 reveló que el 72% de las mismas presentaban agua con valores de As superiores a 50 µg/L (límite permisible en esos años), donde la población expuesta era de aproximadamente 130,000 personas (Gutiérrez-Ávila y Winkler 1989). Los riesgos a la exposición crónica del arsénico han sido motivo de alarma en la región tanto para población como para las respectivas autoridades sanitarias y administrativas, que, pese a las medidas que han tomado al respecto, como la operación de plantas móviles de ósmosis inversa, métodos domiciliarios de remoción de As mediante procedimientos de floculación con sales de hierro (Fe) o el desarrollo del proyecto “Agua Saludable para la Laguna” que es una obra

INTRODUCCIÓN

que pretende abastecer por 30 años a la CL de agua proveniente de otros estados, planteada en el 2021, no se ha logrado resolver en forma definitiva y permanente este problema, debido a que las medidas implementadas han sido focalizadas en combatir los efectos y no las causas (Enríquez *et al.*, 2021). Además, es un conflicto difícil de resolver ya que es un asunto de salud pública, con factores de tipo económico, social, cultural y político (Enríquez *et al.*, 2021).

Inicialmente el problema se focalizó en los municipios de Fco. I Madero, San Pedro de las Colonias, en Coahuila y Tlahualilo Durango, pero mediante avanzaba el tiempo, avanzó también la problemática hacia la zona conurbada, alcanzando a Torreón, Gómez Palacio y Lerdo. El As presente en el acuífero de la CL ocurre por el abatimiento de los mantos freáticos que abastecen a la población, ya sea por ingerirla directamente, al utilizarla en la elaboración de alimentos o en el riego de cultivos (Enríquez *et al.*, 2021).

A partir de los sesentas se han propuesto distintas fuentes referentes a la contaminación en la zona (minería, fertilizantes fosfatados y actividad volcánica principalmente), sin embargo, los estudios realizados sobre el tema ya no son vigentes, algunas de las muestras no fueron tomadas de forma idónea (ej. Muestras sin refrigeración), no se caracterizaron minerales y en general, los aportes resultan insuficientes para entender la problemática en su totalidad (Molina-Maldonado 2004). Además, la complejidad mineralógica de los acuíferos hace que resulte difícil caracterizarlos, este es uno de los principales problemas a los que se enfrentan los científicos, que las investigaciones referentes a fuentes geogénicas, ya que se suelen involucrar gran cantidad de muestras para la precisión y representación de datos, mezclas de distintos métodos de análisis que suelen ser costosas, y además, una interpretación que requiere de los conocimientos en química, geoquímica, hidrogeología, mineralogía, geología de la zona a estudiar, etcétera (Leke *et al.*, 1993).

Las características geológicas de México indican que los valores de As y F⁻ se encuentran por encima de los límites permisibles de agua para consumo humano en muchas más zonas de las que están actualmente reportadas, por lo que la población expuesta se estima a que es mucho mayor que la conocida. Por esto, se requieren mayor número de investigaciones para determinar los valores reales de los elementos contaminantes en el recurso hídrico, las causas y la movilización de los mismos en los acuíferos, la importancia de estos estudios es que brindan opciones para suministrar agua de buena calidad con base a regímenes de extracción o procedimientos de tratamiento (Armienta y Segovia 2008). Además, los datos sobre concentraciones de contaminantes en aguas subterráneas ayudan a la construcción de redes de monitoreo que sirven para predecir el comportamiento del contaminante, además, este tipo de estudios ayudan a identificar las condiciones geológicas y climáticas que pueden dar origen a las condiciones de contaminación (Gutiérrez *et al.*, 2021).

Tomando en cuenta la importancia de la calidad de agua en esta región, se considera que se requiere realizar la caracterización del material sólido de las rocas y sedimentos por los que circula el agua subterránea, para relacionarlo con la calidad de la misma y unificar las matrices ambientales de manera efectiva, logrando un estudio más completo sobre las fuentes de contaminación al agua subterránea de la CL como no se había realizado anteriormente.

1. Antecedentes

1.1. Arsénico

La principal exposición humana, no ocupacional, al As, se da por el consumo de agua contaminada con dicho elemento, su efecto puede llegar a ser cancerígeno y ocasiona múltiples efectos negativos en la salud de quien lo ingiere a corto y largo plazo (Medina *et al.*, 2018). El efecto más común son las lesiones en la piel como pueden ser cambios de color principalmente en el dorso y la espalda, así como callosidades (hiperqueratosis) en las palmas de las manos o pies (Del Razo *et al.*, 2018). La exposición por tiempo prolongado genera cáncer en diversos órganos y tejidos como la piel, vejiga, hígado, pulmón, riñón y de mama. Además, también ocasiona daño genético, alteraciones cardiovasculares, problemas circulatorios en las piernas, neuropatías centrales y periféricas, disminución de las defensas y función pulmonar, entre muchos otros, donde los principales afectados son los niños (Del Razo *et al.*, 2018). Es tanto el daño que ocasiona el As al ser humano, que se ha denominado una enfermedad relacionada a su consumo, el hidroarsenicismo crónico regional (HACRE), es una enfermedad crónica que se manifiesta en alteraciones dermatológicas principalmente, donde los síntomas incluyen la leucodermia y/o queratosis palmoplantar y que puede evolucionar a problemas más graves como distintos tipos de cáncer (Alvarado *et al.*, 2022).

El As puede encontrarse en una variedad de formas químicas en el agua de forma disuelta formando oxianiones, predominan: el arseniato As(V) que es la especie más difundida en el medio ambiente y suele predominar en agua y suelos (presente en plantas, algas y animales tanto acuáticos como terrestres) y el arsenito As(III), esta es la forma reducida del elemento y se presenta en forma minoritaria en aguas suelos y seres vivos. El estado de oxidación del As, así como su movilidad, es determinada por las condiciones redox del agua (potencial redox y Eh) (Bundschuh *et al.*, 2008).

El impacto principal de este elemento es directo a la salud de la población expuesta, la manera de introducirse al ambiente puede ser a partir de fuentes antropogénicas (dispersión de As a partir de residuos de operaciones minero-metalúrgicas, tratamiento de madera, etc.) o mediante fuentes geogénicas (disolución de minerales, actividad volcánica, evaporación, etc.) (Armienta y Segovia 2008).

Algunos de los lugares que han reportado contaminación de agua por As son Antofagasta en Chile, la planicie Chaco-Pampeana en Argentina, el noreste de India, noroeste de Taiwán, Nagarparkar en Pakistán, Bangladesh, y muchos sitios más alrededor del mundo (Borgoño *et al.*, 1977; Galindo *et al.*, 2005; Chowdhury 2000; Al Lawati 2013; Brahman *et al.*, 2013).

En diversas zonas de Estados Unidos de América (Maine, Michigan, Minnesota, Dakota del Sur y Oklahoma, por mencionar algunos de ellos) se han detectado niveles de As por encima de los 10 µg/L, el límite permisible de ese país. Un estudio (Welch *et al.*, 1999) reveló que el As tiende a ser mayor en la zona oeste de Estados Unidos, y es relacionado con el flujo vertical ascendente de aguas termales, desorción de óxidos de hierro, disolución de sulfuros metálicos y concentración por evaporación.

1. ANTECEDENTES

En cuanto a la movilidad relacionada con este elemento, se han mencionado procesos de desorción-adsorción en fases sólidas como hidróxidos de hierro, aluminio y manganeso (Langmuir 1997), además, se encontró una relación entre el pH y la desorción de As, de tal manera que, a mayor pH, menor desorción (Cortina *et al.*, 08).

Para zonas mineras, el As está presente en minerales como la arsenopirita (FeAsS), escorodita ($\text{Fe}^{+3}\text{AsO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), mimetita ($\text{Pb}_5(\text{AsO}_4)_3 \text{Cl}$), adamita ($\text{Zn}_2\text{AsO}_4\text{OH}$), tennantita ($\text{Cu}_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}$) y niquelina (NiAs) principalmente, donde su extracción y procesamiento suelen ser fuentes de contaminación de As. Un ejemplo de este caso es Zimapán, localizada en el centro de México, en donde se extrae plata desde el siglo XVI, además de zinc y plomo. Aquí, las concentraciones máximas de As en las aguas subterráneas son de $1100 \mu\text{g/L}$, siendo el As (V) la especie predominante. En este sitio, la presencia del As se debe a fuentes múltiples, tanto naturales como antropogénicas, donde estudios hidrogeológicos, geológicos y químicos permitieron su identificación. Dichas pruebas demostraron que la oxidación de la arsenopirita y la disolución de escorodita, libera el arsénico disponible y queda disponible en el acuífero calcáreo de Zimapán, el estudio también reveló que la explotación excesiva de los pozos profundos permite la interacción de oxígeno con los minerales portadores, oxidando los sulfuros durante la temporada seca y movilizándolo el arsénico cuando sube el nivel freático en temporadas de lluvia (Armienta *et al.*, 2001).

La zona minera de Baja California Sur presenta vetas epitermales con presencia de arsenopirita. El acuífero está formado por rocas volcánicas muy fracturadas y zonas de material aluvial; los valores máximos reportados de As en el agua subterránea son de $410 \mu\text{g/L}$ en las cercanías de las presas de Jales y disminuyendo con la distancia a lo largo del flujo de agua. Con modelación geoquímica simulamos la disolución y precipitación de calcita, así como la sorción del As a las superficies de hidróxido de hierro, por lo cual se llegó a la conclusión de que el As se encontraba adherido a los óxidos presentes y el proceso de desorción es el principal responsable de los altos valores del elemento en el acuífero de Baja California Sur (Carrillo-Chávez *et al.*, 2000).

Sonora es otro de los estados que reporta altas cantidades de As en agua, representando un riesgo para sus habitantes (la capital, Hermosillo, cuenta con 610,000 personas). Aquí, los altos valores de As se correlacionan con las altas cantidades de F^- en el agua, las cantidades máximas reportadas son de 7.6 mg/L para F^- y $177 \mu\text{g/L}$ de As. Para esta zona, la causa no ha sido aclarada, aunque los investigadores suponen una fuente geogénica (Wyatt *et al.*, 1998).

En el Valle de Guadiana (Durango, México) 74 pozos dan abasto a 491,000 habitantes, donde la mitad exceden el límite permisible de As, alcanzando $167 \mu\text{g/L}$ en la zona volcánica del valle; aquí, la presencia del elemento es relacionada con la geología del acuífero, sin embargo, los procesos geoquímicos que liberan el As al agua aún no han sido identificados (Alarcón-Herrera *et al.*, 2001).

En Villa de la Paz, San Luis Potosí, se explotan yacimientos de oro, con mineralogía de galena, arsenopirita, pirita, esfalerita y sulfosales de Cu-Sb. En un estudio realizado en la zona, se encontró en un estanque de almacenamiento de agua pluvial, la cantidad máxima de $265 \mu\text{g/L}$ de As. La oxidación de arsenopirita en los residuos mineros y la liberación natural de As por la disolución de sulfuros presentes en el acuífero, sumados a la alta alcalinidad y condiciones anaerobias son las principales fuentes de contaminación para Villa de la Paz. El suelo en esta zona

1. ANTECEDENTES

se encuentra de igual forma contaminado por metales pesados por la industria minera, se remarca que aquí el agua subterránea presenta valores máximos de 91.5 µg/L de As y que su uso es principalmente para la irrigación de cultivos, pasto y actividades recreativas, aunque el principal destino del agua no es ser bebida por la población del estado potosino, hay que recordar que el riego a cultivos con agua de minas contamina los suelos para la agricultura con arsénico y otros metales pesados, además, que por la irrigación, los elementos contaminan los alimentos que se están produciendo y que son exportados para su consumo (Razo *et al.*, 2004; Castro-Larragoitia *et al.*, 1997; Hernández *et al.*, 2023).

Otro caso importante se da en Los Azufres, Michoacán, situado en el Cinturón Volcánico Mexicano, con valores de hasta 24 µg/L de As. La concentración aumenta en la superficie por un manejo inadecuado de salmueras profundas principalmente por fugas de los estanques de evaporación (Birkle y Corona 2000). Un caso similar ocurrió en Puebla, en la zona geotermal denominada Los Humeros (73.6 µg/L de As), y Acoculco, que es una caldera volcánica con domos riolíticos, escoria y flujos andesíticos (Partida *et al.*, 2001; Quinto *et al.* 1995).

En la mayoría de los casos de estudio, la fuente de As y su enriquecimiento en las aguas subterráneas ha sido provocado por procesos geogénicos relacionados con la interacción agua-roca. Se señalan como portadoras a las rocas volcánicas principalmente, que pueden tanto portar como liberar elementos potencialmente contaminantes. En acuíferos granulares, la presencia de As puede estar relacionada con la desorción del elemento a que se adsorbe en arcillas y óxidos de Fe y Mn, donde la evaporación funge como proceso de concentración. Como se mencionó anteriormente, la diversidad mineralógica a partir de los acuíferos, dificulta la identificación de la fuente específica de contaminantes, requiriendo de múltiples estudios especializados para las caracterizaciones de las rocas y sedimentos que fungen como material parental en los acuíferos.

1.2. Fluoruro

El flúor (F) tiene efectos tanto beneficiosos como nocivos para la salud humana, esto depende de la concentración ingerida. Este halógeno es uno de los principales elementos que, a escala mundial, es responsable de causar problemas de salud por la exposición al mismo en grandes cantidades, donde la principal vía de consumo es a través del agua bebida (Luque *et al.*, 2018, Lara y Carrillo 2021).

La concentración de F⁻ en las aguas subterráneas en cantidades superiores a 1 mg/L (que es el límite permisible en la mayoría de los países) afecta la salud humana de distintas maneras: la ingesta excesiva a largo plazo de este elemento puede provocar fluorosis dental, que se manifiesta afectando el esmalte dental provocando que pierda su brillo y en la superficie de los dientes aparezcan áreas blancas y opacas, de forma más agravada, provoca manchas marrones-amarillo y de color negro en los dientes; la fluorosis también puede ser esquelética, dando como resultado huesos más frágiles y quebradizos aumentando los riesgos de fracturas, la población más vulnerable a dicha enfermedad son los niños menores de 8 años, ya que desarrollan los efectos de forma permanente. Otros efectos provocados por la ingesta excesiva de F⁻ son problemas neurológicos, de riñón, endócrinos, tiroideos, trastornos hepáticos, interferencias en los procesos metabólicos, etc. (Luque *et al.*, 2018).

La ocurrencia de F⁻ en aguas subterráneas es principalmente aportada por fuentes geogénicas; la fluorita (CaF₂) es el portador de F por excelencia, presente como mineral accesorio

1. ANTECEDENTES

en rocas graníticas y rocas basálticas, relacionado, así, a las rocas volcánicas de forma general (Kundu y Mandal 2009; Cortina *et al.*, 2008). Los índices de saturación sugieren que la alta solubilización de la fluorita es la que controla las concentraciones de F^- en los flujos de las aguas regionales (Carrillo-Rivera *et al.*, 2002). Además, altas concentraciones de F^- también han sido relacionadas con rocas como gneises graníticos, cuarcitas y pegmatitas, en minerales como el fluorapatito, biotitas y en vidrio volcánico. Los niveles de F^- tienden a ser más altos en aguas alcalinas y zonas geotérmicas. Por medio de la meteorización de los minerales primarios, el F se libera al suelo y a las aguas subterráneas mediante la lixiviación. Los factores relacionados al alto contenido de F^- en las aguas son: el grado de disolución del mineral portador, la concentración del elemento en la roca, especies iónicas, tiempo de interacción agua-roca, así como el contenido de Ca^{++} y HCO_3 (Saxena y Ahmed 2003). La disolución de iones de los minerales que contienen F^- contribuyen al incremento de las concentraciones de este en las aguas subterráneas, además, suelen ser aguas con bajas concentraciones en Ca^{++} . Por otro lado, el sodio suele correlacionarse de manera positiva con el F^- , donde altas concentraciones de Na^+ incrementa la solubilidad de la fluorita en aguas (Apambire *et al.*, 1997).

De manera antropogénica, una fuente potencial de F^- son los fertilizantes fosfáticos que se aplican en los suelos de cultivo, así como también la combustión de carbón (Brindha y Elango 2011).

Un ejemplo de altas cantidades de este elemento se da en el sur de India, en el distrito de Tamilnadu, donde la geología se compone de rocas ultrabásicas a rocas ígneas ácidas, charnockita y gneiss en donde los análisis arrojaron cantidades de F^- que van entre 1 - 3 mg/L, provenientes principalmente de aguas magnésicas, ligado a la liberación de F^- por los minerales portadores de F, como lo son la biotita, hornblenda, etc., y también la meteorización de la apatita/hidroxiapatita de las charnockitas (Manikandan *et al.*, 2012).

Turquía tiene más de 50 años con problemas de fluoruro en sus aguas, los investigadores indican que la fuente es geogénica, proveniente de las rocas volcánicas de la zona, que son portadoras de F (píroxeno, hornblenda, biotita, fluorapatita y masa vítrea) y se disuelven en el agua. Una hipótesis dicta que el F^- pudo ser transportado por fumarolas o haber escapado de lavas desvitrificadas, donde después fue retenido en la superficie de ciertos minerales para después intercambiarse con OH^- del agua subterránea a pH elevado (Oruc 2008).

Los estados de México con cantidades más altas de F^- en el agua subterránea (>1 mg/L) son San Luis Potosí (Carrillo-Rivera *et al.*, 2002), Jalisco (Hurtado y Gardea-Torres 2004), Sonora (Valenzuela-Vásquez 2006) y el norte de Baja California (Soto-Rojas *et al.*, 2004). Se estima que aproximadamente 200 millones de personas, en 25 países, se encuentran en riesgo de fluorosis dada la alta exposición del elemento.

Mahlknecht *et al.*, 2004 realizaron un estudio basándose en la geoquímica, interpretación estadística, datos de isótopos, así como estudios hidrogeológicos, petrológicos y mineralógicos en el acuífero Independencia en el Centro de México, en donde el sistema está formado principalmente por sedimentos marinos, rocas volcánicas y depósitos lacustres (arenas interestratificadas por gravas y arcillas). Las concentraciones máximas son de 16 mg/L de F^- y 120 μ g/L de As atribuidos a la disolución de rocas riolíticas y a la oxidación de sulfuros con arsénico que se libera al agua subterránea (Mahlknecht *et al.*, 2004).

El Valle de San Luis Potosí presenta altos niveles de F^- en el agua subterránea, dicho sistema está conformado por un acuífero poco profundo no confinado que sobreyace a una lente

1. ANTECEDENTES

de arcilla y un acuífero profundo en rocas volcánicas fracturadas, donde la fuente del contaminante se relaciona a la lixiviación de rocas riolíticas (Armienta 1989; Cardona *et al.*, 1993).

El enriquecimiento de F^- ya ha sido previamente estudiado en la CL, donde para 1993, se registraron concentraciones del elemento en aguas subterráneas en un rango de valores de 0.5-3.7 mg/L, y donde los niveles más altos de F^- coinciden con los valores más altos de As (Del Razo 2018). Esta correlación As/ F^- también fue encontrada en la cuenca de Río Verde, San Luis Potosí, la correlación fue positiva de 0.675 ($P < 0.001$) (Planer-Friedrich *et al.*, 2001). En el 2001, un estudio se realizó en el Valle Guadiana de Durango, aquí se encontró que aproximadamente el 94% de los pozos muestreados (51 en total) contenían F^- en un rango de 1.5-5.4 mg/L. El valor más alto fue de 16.0 mg/L en una zona rural, donde los residentes expuestos manifestaron fluorosis dental y aumento en fracturas óseas (Alarcón-Herrera *et al.*, 2001).

1.3. Uranio

El agua contiene, de forma natural, isótopos radioactivos, estos provienen esencialmente de las emisiones alfa, beta y gamma de los radionúclidos de las series de desintegración de los elementos uranio y torio. Los isótopos radioactivos de uranio, radón y radio son los principales isótopos en el agua subterránea, variando su composición según la evolución geoquímica del agua. El U hexavalente es el más soluble en agua y forma el ion uranil UO_2^{2+} . Los rangos de valores de U en el agua subterránea van de 0.1 a 10 $\mu g/L$, dependiendo de los valores de fondo del elemento en el sitio. Este elemento debe ser oxidado antes de transportarse al agua, pero una vez entra en solución, puede ser transportado por grandes distancias. El U implica un riesgo a la salud en términos de su radioactividad alfa, en México, el límite permisible establece una concentración en actividad alfa global de 0.56 Bq/L (Rentería *et al.*, 2007), ya que el agua puede ser considerada el principal agente de transporte de elementos radioactivos (Romero *et al.*, 2017) pero no hay un límite permisible en sí para el elemento.

Existe una relación $^{234}U/^{238}U > 1$ en el agua subterránea, donde predomina en concentración el ^{234}U , como resultado del desplazamiento del átomo ^{234}U desde la red cristalina producto del decaimiento ^{238}U y, además, del retroceso del nucleótido formado de ^{234}U Th. Por medio de la lixiviación de las rocas, ocurre la oxidación en medio acuoso de U^{+4} a U^{+6} , esto a consecuencia de que los átomos de retroceso ^{234}U son lixiviados de forma más fácil que los átomos de ^{238}U y son susceptibles a ser oxidados en la etapa hexavalente, resultando también en una movilización mayor del ^{234}U (Hernández-Mendoza *et al.*, 2017).

Las fuentes de contaminación de U pueden provenir de forma natural o antropogénica, los principales factores que influyen en su concentración son la disminución del nivel freático, contaminación por nitratos y la presencia de carbonatos que acelera la disolución de los minerales portadores del elemento radioactivo. Por el motivo antes mencionado, las rocas sedimentarias albergan reservas muy grandes de U en el mundo, en donde los procesos hidrológicos son fundamentales para su emplazamiento; las rocas ígneas asociadas al elemento suelen ser granitos y riolitas (3.6-5 mg/kg de forma natural). El emplazamiento en dichas rocas puede ocurrir de dos maneras: sindiagénesis, que involucra el transporte de uranio disuelto y su precipitación cuando se presentan condiciones reductoras ricas en materia orgánica, o, en los yacimientos tipo epigenéticos, donde la mineralización involucra cenizas volcánicas que cayeron en la zona de recarga que liberan uranio en forma soluble que posteriormente es movilizad al agua subterránea

1. ANTECEDENTES

y fluye a lo largo de un acuífero semiconfinado donde precipitará o se absorberá al encontrar condiciones reductoras (Hobday y Galloway 1999).

Los minerales principales que contienen U en forma de elemento traza son los circones, esfero y apatitas (Hernández-Mendoza *et al.*, 2017). La presencia de U como radionúclido se suele asociar a rocas félsicas, depósitos de tipo veta, rocas pegmatíticas intrusivas y depósitos fosfáticos, además de ambientes sedimentarios y volcánicos con arenisca, rocas metasomáticas o metamórficas. Por lo general, las rocas félsicas suelen contenerlo más que las máficas, 4.8 mg/kg vs 0.6 mg/kg respectivamente (Banning 2021). Debido a la incompatibilidad del U en los magmas silicatados, aunado a su gran radio iónico y alta valencia, causan que al momento de la fusión parcial y cristalización fraccionada, el U se fraccione favorablemente en magmas metalumínicos de alta temperatura y se acumule en granitos y pegmatitas (Gandhi *et al.*, 2022). Por otro lado, las arcosas son formaciones sindiagenéticas derivadas de la precipitación de apatita a partir de aguas subterráneas que están enriquecidas con U, Fe y PO_4^{3-} donde se inmoviliza el U que se ve relacionado con el óxido férrico precipitando con la apatita, reemplazando carbonatos (Banning y Rude 2015).

Referente a sus efectos toxicológicos, se engloban daños radiológicos y químicos, como es el caso de los efectos nefrotóxicos que causan daño renal, si se habla de exposición al U de forma prolongada (Morales-Arredondo *et al.*, 2018). Sin embargo, también puede afectar a metabolismos xenobióticos, al cerebro, el sistema reproductivo, el sistema antioxidante y las vías inflamatorias intestinales (Gandhi *et al.*, 2022).

En cuanto a fuentes relacionadas a actividades antropogénicas, se pueden mencionar, por ejemplo, la extracción y procesamiento de minerales, fabricación de fertilizantes, el uso de U en actividades relacionadas al sector salud y la industria, etc. (Gandhi *et al.*, 2022).

Como ya se mencionó anteriormente, no se cuenta con un límite permisible de este elemento en las normativas mexicanas, sin embargo, a medida de referencia, se suele utilizar el límite sugerido por la Organización Mundial de la Salud, que limita las aguas de consumo humano a 30 $\mu\text{g/L}$ o el de la ley alemana *Trinkwasserverordnung* 10 que fija el valor en 10 $\mu\text{g/L}$.

Para depósitos sedimentarios, los valores de fondo del elemento normalmente son de 3 a 4 mg/kg. En el acuífero de Keuper, Alemania, las rocas carbonatadas con presencia de fluorapatito presentan aproximadamente 1070 mg/kg de U, investigadores relacionaron estos altos valores con la presencia de carbonato que sustituye al Ca por U en su estructura cristalina y la alteración de la apatita en la meteorización.

Los niveles de U en el agua subterránea de la cuenca de Hetao, en Mongolia, son de 0.44-323 $\mu\text{g/L}$, aunque también reportan altas cantidades del elemento en la India, Estados Unidos, Suiza, Corea del Sur, Australia, Brasil, Egipto, Finlandia y Pakistán (Gandhi *et al.*, 2022).

Se comprobó la existencia de estratos y lentes arcillo-arenosos con anomalías radiométricas en la zona de Chihuahua (acuífero San Marcos-Sacramento), México, donde el U puede estar unido a partículas ricas en materia orgánica en concentraciones de aproximadamente 50 $\mu\text{g/L}$, sin embargo, más de 50 anomalías de este elemento se han encontrado en todo el estado de Chihuahua, la mayoría de ellas se localizan cerca de la zona conurbada. Una de ellas, la denominada Sierra Blanca, contiene alrededor del 60% de las reservas de U del país (Armienta *et al.*, 2013). En la

1. ANTECEDENTES

cuenca de San Marcos, Chihuahua, se ha identificado la presencia natural de cuerpos uraníferos, donde el material radioactivo puede ser transportado como material suspendido hasta las zonas reductoras para depositarse como UO_2 ; una vez precipitado, el uranio se puede volver a disolver con el flujo de agua que presente condiciones oxidantes y continuar con la migración hasta encontrar una nueva zona con condiciones reductoras (Reyes-Cortés *et al.*, 2012). El sustrato presente en Chihuahua justifica los altos contenidos de ^{238}U , ^{235}U y ^{232}U , los valores reportados del elemento indican que es una zona uranífera natural. En esta zona, el U se precipita y se encuentra en las hojas de las plantas, como la *Baccharis salicifolia* y en el tejido de los peces del Río San Marcos (Rentería *et al.*, 2007; Reyes-Cortés *et al.*, 2012).

Se han realizado estudios sobre la presencia de U en aguas subterráneas en San Diego de la Unión, Guanajuato, reportando valores máximos del elemento de 6.37 $\mu\text{g/L}$ (Hernández-Mendoza *et al.*, 2017) y San Felipe del Progreso, Estado de México, encontrando un valor máximo de 10.29 $\mu\text{g/L}$.

Para la zona de la CL, muy pocos estudios se han realizado sobre el contenido de U en la zona, donde el rango de valores de U obtenido fue de 0.185-179 $\mu\text{g/L}$ (Molina-Maldonado 2004), pero no hay ningún trabajo relacionado a su fuente. En general, las fuentes de U en el agua subterránea es un tema que poco se ha estudiado en el mundo salvo por algunos sitios específicos (como el caso de Chihuahua, México) y ha ganado relevancia en los últimos años.

1.4. Estado del arte

Como se ha venido desarrollando en este trabajo, la contaminación del agua subterránea es una problemática global y que va en aumento, esto ha dado como resultado no solo que se busque tratar dichas aguas, sino que se encuentre la fuente de contaminación de las mismas, siendo las fuentes geogénicas, unas de las principales aportadoras de elementos que pueden llegar a ser contaminantes al momento de la interacción agua-roca. Un ejemplo de este tipo de investigaciones surgió en Nicaragua, donde se determinó que la presencia de As en las aguas es de origen geogénico, por lo que es común encontrarlo en rocas, sedimentos y suelos distribuidos en complejos volcánicos, fumarolas, fuentes termales, gases y fluidos geotérmicos. Los rangos de As reportados en el agua subterránea cercanas a dichas fuentes son de 2 a 112 $\mu\text{g/L}$, donde el 70% de las muestras recolectadas sobrepasan los límites permisibles para agua de consumo humano (10 $\mu\text{g/L}$). Esta investigación, además de aportar información científica, sirvió como herramienta en la toma de decisiones de las autoridades pertinentes para buscar fuentes alternativas de agua para las comunidades del país (Altamirano y Delgado 2019).

Similar ocurre en territorios bolivianos, donde se relacionaron las altas cantidades de As en el agua subterránea con fuentes geogénicas, estas incluyeron rocas volcánicas y minerales sulfurosos que lograban liberar el elemento a través de la erosión de las rocas y procesos hidrotermales (Quintanilla *et al.*, 1995; Banks *et al.*, 2004).

En las Islas de Tenerife (España) la contaminación de F^- es de origen geogénico, vinculada con el origen volcánico de las formaciones acuíferas y la actividad volcánica residual (Briseño 2019).

Sin embargo, las fuentes geogénicas no son las únicas causantes de contaminación directa, se ha reportado que las actividades antropogénicas son las responsables, en muchas ocasiones, de

1. ANTECEDENTES

generar las condiciones favorables para que los contaminantes puedan movilizarse de estado retenido en la fase sólida, hacia el agua subterránea (Lillo 2021).

Para México en específico, los estudios llevados a cabo, tanto en las zonas del norte como para las áreas geotermiales, indican que tanto el origen del As como el del F⁻, es principalmente geogénico, esto quiere decir que la fuente de los elementos está directamente relacionada con la geología y mineralogía del lugar, como lo pueden ser cuencas de país y/o depresiones en la corteza terrestre al margen de cadenas montañosas, como ocurre en la India o en el Altiplano Andino, y rocas volcánicas ricas en sílice y acuíferos de aluvión de edad geológica reciente. Dicho origen geogénico se puede dar en dos tipos: primario, que ocurre cuando la roca original presenta disolución y secundario, aquí el contaminante es retenido en minerales secundarios que resultan del intemperismo de la roca original, por ejemplo, óxidos de hierro y arcillas, que tienen una gran cantidad de sitios de adsorción en su superficie por lo que atraen metales como el As (Gutiérrez *et al.*, 2021).

Para la región centro-norte de México se realizó un estudio que encontró una distribución espacial de concentraciones de F⁻ variable y algo dispersa, lo cual indicó un origen geogénico del contaminante, ya que se descartaron cantidades altas de elemento alrededor de mineras o fuentes antropogénicas. Aquí, las fases portadoras encontradas fueron rocas félsicas y vidrio volcánico que se encuentran constituyendo una parte considerable del material de aluvión de la zona de estudio (Gutiérrez y Alarcón-Herrera 2022).

A continuación, se muestra una tabla que engloba sitios reportados con contaminación en sus aguas subterráneas y sus fuentes (Gutiérrez *et al.*, 2021).

Tabla 1. Origen en algunas ciudades que presentan afectaciones por contaminantes en el agua subterránea. Modificado de Gutiérrez *et al.*, 2021.

Área de estudio	Elementos contaminantes	Origen: material principal	Referencias
México, zona norte	As, F, Li, U	Geogénico: riolita, Ox-Fe Antropogénico: extracción de agua subterránea	Armienta y Segovia, 2008; Reyes-Gómez <i>et al.</i> , 2013; Navarro <i>et al.</i> , 2017
México, zonas hidrotermales	As, F, U, Li, Na, Mo	Geogénico: roca volcánica, Ox-Fe Antropogénico: extracción de agua subterránea	Knappett <i>et al.</i> , 2020; Morales-Simforts <i>et al.</i> , 2019
La Pampa, Argentina	As, F, U, V, B	Geogénico: vidrio volcánico y loess, Ox-Fe	Bundschuh <i>et al.</i> , 2020; Nicolli <i>et al.</i> , 2020
Perú	As, Cd, Pb	Geogénico: roca volcánica, salmuera Antropogénico: minería	Bundschuh <i>et al.</i> , 2020
Brasil	As	Antropogénico: minería, residuos agrícolas	Bundschuh <i>et al.</i> , 2020
Bangladesh, Bengala	As	Geogénico: arcilla, Ox-Fe Antropogénico: Petróleo	Hug <i>et al.</i> , 2020; Huq <i>et al.</i> , 2020
Norte de India	As, U	Geogénico: arcilla, Ox-Fe Antropogénico: fertilizantes	He <i>et al.</i> , 2020
Norte de China, Mongolia	As, F	Geogénico: roca metamórfica, aguas hidrotermales, Ox-Fe	

En el año de 1920, comenzó la extracción de agua subterránea en la CL, para 1960 el número de pozos operando eran del orden de los 3,000. Para el año de 1984, se demostró que existía una correlación entre los niveles estáticos y dinámicos del agua contra las concentraciones

1. ANTECEDENTES

de As, indicando un aumento del elemento con el bombeo, es decir, que el descenso va en paralelo con el deterioro de la calidad de agua (Aparicio-Mijares 1993). En el año 2000, el déficit en el balance del agua era de 500 Hm³ al año. Los ríos Aguanaval y Nazas descargaban en la CL, debido a la construcción de presas y canales de riego se interceptaron sus caudales, esto ocasionó mayores pérdidas en el balance hídrico del acuífero, menos recarga y mayores extracciones, llegando a extraer hasta tres veces más de lo que se recargaba, dando como resultado la disminución en los niveles piezométricos y deterioro en la calidad del agua (Pérez *et al.*, 1991).

En el tema de salud, en 1960 se obtienen los primeros registros de consecuencias a la exposición del As, de ahí, para 1993, la región ya reportaba los valores más altos de incidencia genitourinarios, neoplasias cutáneas y defectos de nacimiento de todo México (Leke *et al.*, 1993). Los estudios continúan hasta la fecha, donde se han encontrado niveles de As en la orina de la población femenina que sobrepasan los límites permisibles del elemento, planteados por la OMS, para agua de consumo humano (Rangel-Moreno *et al.*, 2022).

Del Razo *et al.*, (1998) tomaron muestras de agua en 128 pozos de agua en la Comarca Lagunera, donde el 50% de las muestras presentaron niveles de As mayores a 50 µg/L, rebasando los límites permisibles en la normatividad establecida para ese año. Cabe destacar que los valores máximos reportados de F⁻ son de 3.7 mg/L (límite permisible de 1.5 mg/L para entonces), se reportó que los niveles más altos de F⁻ coinciden con los niveles más altos de As (Del Razo *et al.*, 1990, Del Razo y Corona 1993)

Las hipótesis principales en esos años, en cuánto al origen de As se refiere, son las siguientes (Ojeda y Flores 2004):

1. Residuos de los minerales explotados provenientes de la Metalurgia Mexicana Peñoles, S.A., que procesaba 430 toneladas diarias de minerales como plomo, que se asocian a rejalgar (AsS) y arsenopirita (FeAsS), ubicada al Sur de Torreón en la Metalúrgica Met-Mex.
2. Lixiviación de arsenitos presentes en herbicidas y arsenatos como insecticidas ligados a los distritos de riego.
3. Procesos de erosión-transporte-depósito de sedimentos ricos en material arsenical provenientes de la Sierra Madre Occidental, estos llegan al río Nazas por los ríos Sixtín y Santiago.
4. Oligoelementos (boro, litio, boro, arsénico, fluoruro, etc.) aportados por un sistema hidrotermal que se generó a raíz de los procesos magmáticos que dieron lugar a las rocas ígneas de la zona.

En dicho estudio, concluyeron en que la fuente de contaminación más probable es la número cuatro, ya que se encontraron altas concentraciones de As cerca de rocas ígneas extrusivas, y enriquecimiento de boro, molibdeno, litio, cloruro y fluoruro, además de altas temperaturas en dos pozos estudiados (42°C y 39°C), fuerte olor a ácido sulfhídrico y, además, los resultados de los análisis isotópicos mostraron que las aguas más antiguas del acuífero son en las que abunda el As. Se descartaron las demás hipótesis mencionadas porque las aguas superficiales no mostraban cantidades alarmantes de As (7-19.8 µg/L) y no se consideró portador a los sedimentos; los estudios realizados dentro de la minera Peñoles revelaron valores < 10 µg/L As y basándose en que las aguas contaminadas son las más antiguas, según los isótopos, descarta la idea de que los pesticidas estén lixiviando el elemento y llegando al acuífero.

1. ANTECEDENTES

Los estudios continuaron, para 1995, González-Hita *et al.*, propusieron que un sistema hidrotermal con altos contenidos de litio, boro, As y F⁻ eran la fuente geogénica de dichos elementos en el agua subterránea de la CL.

En el mismo año, un estudio realizado en la Universidad de Arizona utilizó modelado geoquímico y datos de literatura para evaluar la especiación, origen, transporte, exposición probable y procesos que pueden estar influenciando el As. Se concluyó, de esta manera, que la especie primaria es el arsenato HAsO₄²⁻, que probablemente fue transportado de las áreas de actividad volcánica localizada en las cuencas altas de los ríos y dentro de la Región Lagunera. Menciona que los responsables de las altas concentraciones de As son los procesos de adsorción-desorción del elemento en hidróxidos férricos y la evaporación de las aguas superficiales antes de la infiltración. Descarta que los controles mineralógicos tengan algún efecto sobre la solubilidad del As, a excepción de los arsenatos calcimagnésicos (Gutiérrez-Ojeda 1995).

El estudio de Brouste (1997) realizado en la CL, sugiere que tanto las facies hidrogeoquímicas, como los elementos presentes en el agua subterránea del acuífero, se explican por medio de los procesos de evaporación presentes en la zona, aunque éste no sea el único proceso responsable del incremento de la salinidad en el agua. Resultados similares arrojan el estudio de González (1995), donde apoyándose de modelación hidrogeoquímica, confirma la existencia de procesos de evaporación y lo asocia al incremento de arsénico en el agua; del mismo modo, Ojeda (2004) y Molina-Maldonado (2004) se basaron en resultados de isótopos para señalar la evaporación como un proceso de relevancia en el enriquecimiento de As en la CL.

Para el 2017, se publicó un estudio basándose en la composición química e isotópica del agua subterránea, de aquí se destacó un modelo de flujo que postuló que la evaporación constituía el primer mecanismo de enriquecimiento de As en la zona suroeste del acuífero (Ortega-Guerrero 2017). Una causa más sería la reacción de los procesos geoquímicos en diferentes zonas del acuífero, como lo es la desorción de As retenido en las arcillas que se moviliza de la matriz del acuífero al agua subterránea o la disolución de óxidos de hierro y manganeso, disolución de sulfuros, entre otros (Molina-Maldonado 2004).

En uno de los estudios más recientes en la zona, se colectaron 59 muestras de agua y suelo en la Región Lagunera, donde recurrieron a la difracción de rayos X para determinar fases minerales así como microscopio electrónico de barrido para analizar cuantitativamente las fases de As y F⁻, con dichos análisis se reveló que los minerales típicos de las muestras son cuarzo, calcita, feldespato y anortoclasa, sin lograr encontrar fases portadoras específicas de As o F⁻, probablemente por el bajo límite de detección del DRX. En cambio, bajo MEB, se encontraron algunas de las fases portadoras de dichos elementos como lo son las fases libres y ocluidas de fluorita ultrafina dentro de una matriz de feldespato y cuarzo en las zonas de Torreón y Matamoros. Mientras que las fases ultrafinas portadoras de As son tipo mimectita-vanadita, tipo arseniato de plomo y una fase compleja de lo que probablemente corresponda a monacita. Concluyendo con que las fuentes corresponden tanto a fuentes geogénicas como antropogénicas, por la presencia de plomo, donde la movilización de As y F⁻ podría estar ligada a la sobreexplotación del acuífero (Sariñana-Ruiz *et al.*, 2017).

La última revisión a las concentraciones de As hechas en la zona por la CONAGUA en 2021, determinaron que, de 64 pozos muestreados, con el objetivo de revisar la calidad de los mismos, el 50% de las muestras analizadas rebasaban los límites permisibles para agua de consumo humano en la NOM-127-SSA1-2021 (Enríquez-Robledo *et al.*, 2021).

1. ANTECEDENTES

A pesar de los estudios realizados en la zona, el origen del As, F⁻ y U en el agua aún no es comprendido en su totalidad debido a las limitaciones en la información disponible y una escasa claridad en los mismos, las razones principales de la falta de información se acunian a que, alrededor de todos estos años, los investigadores se han enfocado principalmente a As, dejando de lado a los demás elementos mayores y traza que sirven para interpretar fuentes. Otro motivo son los manejos inadecuados en las muestras tomadas o que involucran falta de filtrado en el agua, esto provoca la disminución en la credibilidad de los datos generados (ej. sin preservadores ni refrigeración por cuatro meses en el caso del estudio realizado por Ojeda en 2004, similar al estudio realizado por Del Razo *et al.*, en 1989 donde no se les agregó ningún conservador a las muestras de agua). Otro limitante importante, es que los estudios se han enfocado en analizar muestras de agua, dejando de lado el material sólido que está en contacto con ella, por lo cual no se le ha dado la respectiva relevancia a la caracterización completa de las rocas o sedimentos de la zona ni a la movilización de los elementos al agua, se requiere un estudio más profundo que abarque interacciones agua-roca en la zona de la CL.

1. ANTECEDENTES

1.5. Área de estudio

La CL recibe su nombre gracias a las ya extintas 13 lagunas en el área, de ellas destaca la Laguna de Mayrán, al ser en su momento la más grande de América Latina, que se alimentaba de los ríos Nazas y Agua Naval (Cervantes y Franco 2006). La zona de estudio está ubicada (Ilustración 1) en el norte-centro de México, cuenta con una extensión de 43,980 km² aproximadamente, de los cuáles 21,980 km² corresponden al estado de Coahuila y 22,000 km² al estado de Durango. Sus coordenadas extremas son 25° a 26° latitud Norte y 102°40' a 104°00' longitud Oeste. El clima promedio es cálido y seco, con una temperatura anual promedio de 20°C (González-Hita *et al.*, 1995). La precipitación anual en la CL varía entre 200 y 300 mm en los valles y 400 mm en las montañas (250 mm en promedio), la época de lluvias es de junio a septiembre con precipitaciones ocasionales y el resto del año se presenta estiaje, dando como resultado un área desértica y semidesértica.

La población total de la CL es de 1'434,283 habitantes distribuidos en nueve municipios, de los cuales cinco son de Coahuila y cuatro de Durango, la zona conurbada, que representa el 86% de la población total, se concentra en Torreón, Gómez Palacio, Lerdo y Matamoros (INEGI 2020). La planicie incluida en la CL está compuesta por depósitos de arcilla lacustres, donde predominan los matorrales xerófilos (Mejía-González *et al.*, 2014). La economía de la ciudad se compone principalmente de ganadería intensiva (carne y lácteos), producción agrícola, minería y actividades industriales (Torres-Martínez *et al.*, 2021).

La fauna típica de la región son lagartijas, liebres, águilas, coyotes, víboras de cascabel, jabalí, mapaches y venados de cola blanca, además de la tortuga de desierto en Mapimí, especie de interés biológico. Se cuenta en la zona con lugares de conservación a la biodiversidad como lo son la Reserva de la Biosfera de Mapimí, Cañón de Fernández en Lerdo y la Reserva Ecológica Municipal del Cañón de Jimulco, en Torreón (Cervantes y Franco 2006).

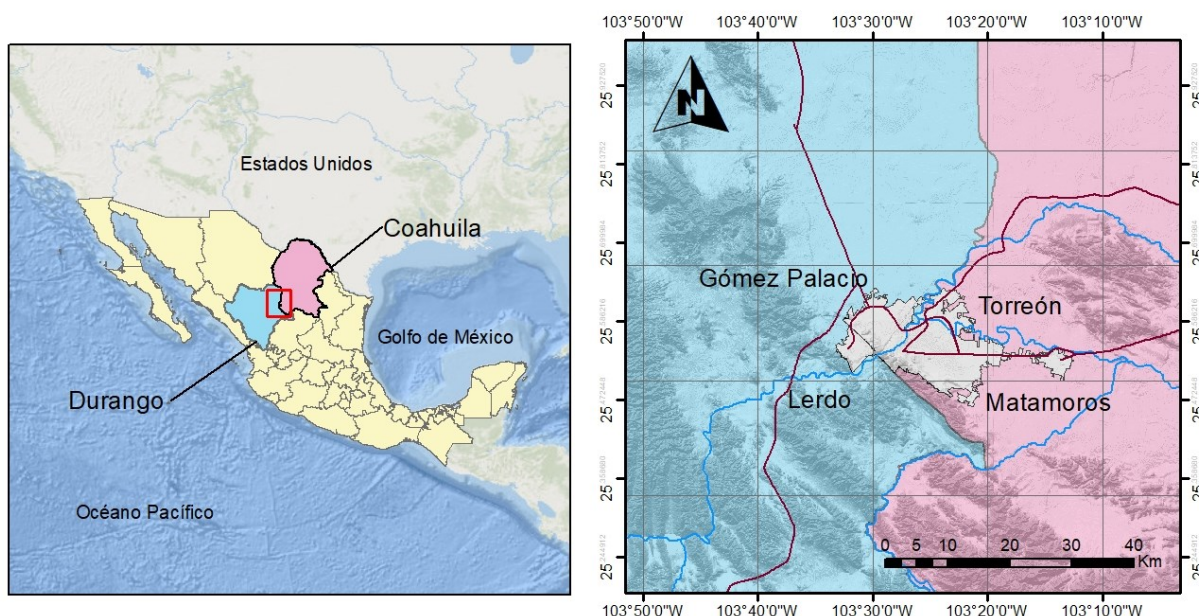


Ilustración 1. Ubicación geográfica de la CL.

1. ANTECEDENTES

En cuanto a la hidrología del sitio, la denominada subregión Comarca Lagunera - Parras se compone de la cuenca media - baja de los ríos Nazas y Aguanaval, las zonas de descarga hacia las Lagunas Mayrán y Viesca (receptores naturales de agua de la región) y cuencas intermitentes de menor magnitud pertenecientes a la Región Hidrológica 36 donde el escurrimiento es de 223 Hm³/año (Cervantes y Franco 2006). Las lagunas de la zona se forman solo en situaciones extraordinarias, ya que su flujo es captado por las presas que abastecen a la región (Enríquez-Robledo *et al.*, 2021).

Los acuíferos más importantes son el Principal (con clave 253 y que es uno de los más sobreexplotados en el país) y Oriente Aguanaval, juntos abastecen a la zona conurbada Torreón-Gómez Palacio-Lerdo, concentran el mayor número de usuarios, la mayor demanda de agua y a raíz de esto, también representan la mayor sobreexplotación de la región. Sin embargo, en general, la CL cuenta con los siguientes acuíferos: Oriente Aguanaval, Villa Juárez, Ceballos, Nazas, Vicente Suárez, Acatita y las Delicias (Enríquez-Robledo *et al.*, 2021).

El principal uso de suelo en la región lagunera se destina a la ganadería intensiva (agostadero) representando el 80% del recurso, la cría de ganado sostiene al sector lechero de la zona. Los suelos utilizados son de calidad regular a baja con limitantes en la escasez de agua, profundidad, pedregosidad y erosión severa. Aproximadamente 15% del suelo está destinado a la agricultura, presenta una calidad alta a media y en ellos se cultiva alfalfa, nogal, algodón, frijol, maíz y hortalizas. El resto del porcentaje del uso de suelo está destinado a agricultura temporal (calidad media) así como zonas de recreación y esparcimiento debido a su baja calidad (Cervantes y Franco 2006).

De acuerdo con el informe técnico de Actualización de la disponibilidad de Agua del acuífero Principal, existe un grave déficit entre la extracción de 1,088.5 Hm³ y la recarga anual de 534.1 Hm³: se extrae más del doble del agua de la que ingresa al acuífero (Enríquez-Robledo *et al.*, 2021).

1.6. Geología

La superficie de terreno cubierta por el acuífero se localiza entre dos importantes provincias geológicas: la Sierra Madre Oriental y la Cuenca de Parras. La primera, forma parte del Geosinclinal Mexicano que atraviesa el país de Norte a Sur, esta estructura se caracteriza por contar con numerosos pliegues de forma anticlinal y sinclinal de rocas sedimentarias (rocas calcáreas, areniscas, conglomerados y lutitas). Estas formaciones se han erosionado con el tiempo dando paso a una serie de valles profundos (210 m); estos valles posteriormente fueron rellenados con material de depósitos aluviales. Por el otro lado, la Cuenca de Parras, está denominada como una depresión topográfica que abarca parte de Coahuila, Saltillo y atraviesa Torreón en sus 260 km de longitud y 50 km de ancho (CONAGUA 2020).

En general, la CL se ubica en una depresión topográfica que alberga sedimentos continentales del Cuaternario con una secuencia cuyo espesor es de 400 m en promedio, derivada de la Orogenia Laramide del Terciario Inferior, generando una falla inversa y de desplazamiento lateral a lo largo del borde meridional y occidental en la Plataforma de Coahuila, que deformó las rocas marinas del periodo Mesozoico, emplazó cuerpos intrusivos, dio origen a las rocas

1. ANTECEDENTES

volcánicas del Terciario y dio origen a fallas normales durante los eventos tectónicos en el Mioceno Temprano y Plioceno-Pleistoceno (CONAGUA 1999).

Las provincias geológicas a las que pertenece la zona de estudio son las siguientes (González 2006):

- Provincia de Coahuila: El subsuelo está representado por el Golfo de Sabinas, al norte y al centro del estado se cuenta con la Plataforma Burro-Picachos que es un antepaís conformado por rocas sedimentarias paleozoicas y rocas ígneas extrusivas e intrusivas que fungieron como fuentes principales de aporte de sedimentos del final del Jurásico y principios del Cretácico. Esta provincia estuvo cubierta por mares de poca profundidad a finales del periodo Cretácico formando una masa estable y alta que sirvió como contrafuerte estructural a los esfuerzos generados por la Orogenia Laramide, de principios del Terciario.
- Subprovincia Cuenca de Parras: Se conformó de una antefosa de sedimentos tipo *flysh* provenientes de las Formaciones Parras y Difunta llegando a un contar con un espesor de 4000 m que fue afectado al momento de la formación de la Orogenia Laramide y sus fallas inversas. Posteriormente, terminó de formarse gracias a la erosión de los pliegues de la Sierra Torreón-Monterrey desde fines del Cretácico. Fue en el Plioceno-Pleistoceno que se presentaron hundimientos al formarse Fosas Tectónicas y/o compactaciones de sedimentos clásticos responsables de la formación de bolsones, que son llanuras Intermontañas amplias y dilatadas de suave ondulación, en ellas se encuentran restos de antiguas depresiones como las lagunas de Mayrán, Viesca y valles azolvados, llegan a alcanzar 1250 msnm y están conformadas principalmente por material de acarreo en grandes espesores. La región se compone por numerosas estructuras individuales que suelen orientarse noroeste-sureste y separadas por *grabens*. Las sierras alcanzan alturas de 1500 a 2000 msnm.
- Subprovincia Sierra de Torreón-Monterrey: También conocida como Sistema Orogénico Transverso, es una serie de pliegues angostos y alargados compuestos de sedimentos que llenaban un geosinclinal y se formó como respuesta a los empujes de la Orogenia Laramide provenientes del sur y del oeste. La mayor parte de las estructuras quedaron orientadas paralelamente a las márgenes de la paleopenínsula de Coahuila con recostamiento hacia el norte y el oriente, sin embargo, posteriormente, la deformación produjo estructura en abanico.

El río Nazas se encarga de separar la Sierra de Mapimí de un complejo montañoso, donde al suroeste, se forman cuatro anticlinales casi paralelos, donde destacan los que forman las sierras de Las Noas y la Hispana. En dirección sureste del complejo montañoso se encuentra la Sierra de Jimulco, cuenta con pliegues característicos que forman escarpes al norte y cuestas al sur. También se cuenta con la presencia de las Sierras del Rosario y del Refugio, ambas tienen estructuras orientadas al norte franco-noroeste; así como la Sierra del Chocolate con una orientación preferencial de noroeste-sureste (González 2006; Molina-Maldonado 2004).

La Formación Nazas representa la base de la columna cronoestratigráfica de la zona, se compone de rocas vulcano-sedimentarias que fueron depositadas durante el Triásico-Jurásico Medio. Para el Jurásico Tardío comenzaron a acumularse sedimentos clásticos en gran volumen, su distribución fue controlada por la plataforma de Coahuila y dio lugar las formaciones La Gloria y La Casita. De manera simultánea se depositaron la Formación Zuloaga, La Caja y Taraises,

1. ANTECEDENTES

localizadas al poniente y sur de la franja litoral, con marcada transgresión marina en sus depósitos. Para el Barremiano-Aptiano, el ambiente se torna carbonatado, dando lugar a formaciones como Cúpido. Con facies marinas batimétricas de plataforma profunda se deposita la Formación Tamaulipas Inferior. En el Aptiano-Tardío aparecen potentes cuerpos tabulares de carbonatos, dando como resultado una secuencia delgada de composición calcáreo-arcillosa (Formación La Peña) asociada a la inestabilidad tectónica de la zona occidental. Después, para el Albiano Temprano, continuó el ambiente carbonatado, manifestándose en facies de plataforma abierta. El Albiano Medio se caracterizó por la colisión de un borde en el límite entre la plataforma somera y la zona de aguas más profundas, los cuerpos arrecifales dieron lugar a la Formación Viesca y los carbonatos en facies de plataforma semirrestringida a la Formación Acatita. Las formaciones Tamaulipas Superior y Cuesta del Cura, se depositaron en ambientes de plataforma abierta y de cuenca de manera simultánea. Cambia el patrón de sedimentación carbonatado en la zona debido a efectos orogénicos en el Cretácico Tardío, entonces se da paso a las formaciones Indidura y Caracol, compuestas por sedimentos arcillo-calcáreos, arcillosos y clástico-carbonatados con facies *pre-flysch* y *flysch*. Después del evento compresivo que se generó a raíz de la Orogenia Larámide, la sedimentación fue de tipo "*molasse*" (Formación Ahuichila) y surgieron periodos de magmatismo calco-alcálido que formaron rocas extrusivas ignimbríticas y el emplazamiento de intrusivos (ej.: El Sarnoso). Finalmente, en el Plioceno, Cuaternario y Reciente, se forman depósitos en forma de terrazas aluviales y de talud (CONAGUA 2020).

1.7. Estratigrafía

La secuencia cronoestratigráfica (Aparicio 2018), de lo más antiguo a lo más joven, se engloba en ocho grupos para facilitar su ubicación en los mapas y el entendimiento de la columna cronoestratigráfica (Ilustración 2):

TRIÁSICO-JURÁSICO MEDIO E INFERIOR **Formación Nazas**

Fm. Nazas: secuencia de rocas metavolcánicas, lavas interestratificadas con tobas, lutitas, limolitas, arenisca y conglomerados de color rojizo pertenecientes al Aleniano, presentan muy baja permeabilidad y funcionan como basamento geohidrológico de la cuenca. Dadas sus características litológicas, se le asocia a un depósito tipo "*molasse*" que se encargó de rellenar las fosas tectónicas que se generaron con la fase post-orogénica de la Orogenia Apalacheana, en ese periodo hubo intensa actividad volcánica, fallamiento de bloques y erosión intensa asociada a un vulcanismo de composición calcoalcálico relacionado con la apertura del Golfo de México. Esta formación, aflora en las cercanías del poblado Cinco de Mayo, en la Sierra de Jimulco como lutitas, limolitas y areniscas rojas que en ocasiones llegan a ser conglomeráticas, además en el sur del Cerro Redondo y en el núcleo del anticlinorio de Villa Juárez, cuenta con un espesor de 100 m (González 2006; CONAGUA 2020). Los estratos más delgados son de 15 cm de espesor en forma laminar formados de lutitas y limolitas, los espesores masivos son de más de un metro de espesor y se componen de derrames de lava y areniscas (CONAGUA 2020).

Fm. Rodeo: aflora de forma muy restringida en la zona, a 5 km al noroeste del Anticlinal de Jimuco y al suroeste de la Laguna Seca. Agrupan una secuencia de filitas interestratificadas con capas gruesas de arenisca y conglomerado de fragmentos subredondeados a subangulosos mal clasificados en una matriz de granos de cuarzo y feldespato en estratos de 0.20 a 0.80 m del

1. ANTECEDENTES

Paleozoico que subyacen con una fuerte discordancia a las rocas del Jurásico. Su formación se atribuye a la erosión de rocas ígneas, cuyo ambiente de depósito fue posiblemente fluvial en condiciones semiáridas, donde posteriormente ocurrió una orogenia responsable de metamorfismo regional de bajo grado, resultando en la formación de la filita y el conglomerado cuarcífero. Su espesor es de aproximadamente 2400 m (González 2006).

JURÁSICO SUPERIOR **Rocas sedimentarias jurásicas**

Estas formaciones afloran en el flanco occidental de la Sierra de Mapimí, en el flanco oriental de la Sierra del Rosario, así como en las estribaciones occidentales de las Sierras el Chocolate y Villa Juárez (González 2006).

Fm. Zuloaga: definida por Imlay en 1938, las rocas que la conforman son calizas estratificadas en capas gruesas, arenosas de tonos grises-amarillentos, tiene un contacto superior concordante con la Fm. La Casita y uno inferior discordante con los lechos rojos pertenecientes a la Fm. Nazas, cuenta con nódulos de pedernal y en ocasiones se pueden apreciar la presencia de bivalvos y gasterópodos. Pertenecer al Oxfordiano tardío, el equivalente extralitoral de la Formación La Gloria y su ambiente de formación se cree que se llevó a cabo en aguas tibias de poca profundidad en un ambiente de plataforma. Cuenta con un espesor de 700 metros. Aflora al sur de Villa Juárez representada por calizas y dolomías con presencia de fragmentos de biógenos, yesos y cal (González 2006; Molina-Maldonado 2004; CONAGUA 2020).

Fm. La Gloria: definida por Imlay (1936), su nombre se debe al sitio donde se encontraron aflorando calizas de color gris claro y oscuro en estratos gruesos, el Cañón del Mimbres en la Sierra La Gloria (50 km al sureste de Parras, Coahuila). También aparece como una secuencia de arenisca, caliza y conglomerado con microfauna de *pseudopeltoceras*, *subgrosovia* e *indosphinctes* del Oxfordiano, debido a su distribución paleogeográfica, composición y contenido fósil, se indica que fue depositada en aguas someras. La litología en esta formación se caracteriza por ser principalmente clástica, puede presentar areniscas de cuarzo en estratos delgados a gruesos, de color blanco rosado, gris claro, y, en ocasiones, ocre y rojo óxido. El espesor es variado depende de donde se encuentre aflorando: 342 m en el anticlinal La Leona de la Sierra de Jimulco, 275 m en la Sierra El Chocolate en Villa Juárez y 567 m en la localidad tipo. Aflora de igual manera en el poblado de Viesca, formando anticlinales, así como también al poniente y sur de Torreón. La cima de esta formación se correlaciona con los sedimentos clásticos de la Formación La Casita, de forma discordante descansa sobre la Formación Nazas en Villa Juárez y en un contacto tectónico por medio de una falla lateral en la Sierra de Jimulco (González 2006; Molina-Maldonado 2004; CONAGUA 2020).

Fm. La Casita: su nombre se lo da Imlay (1936) por su localidad y sección tipo: el Cañón La Casita, ubicado a 50 km al suroeste de Saltillo, Coahuila. Constituida por una secuencia semi rítmica de lutita gris oscura a negra con estratos delgados de caliza arcillosa, margas, carbón, yeso, algunos conglomerados, arenisca calcárea y horizontes fosfatados, además, en la parte inferior cuenta con lutita que se intercala con yeso y estratos delgados de caliza, por el contrario, en la parte superior, cuenta con lutitas con amonitas y nódulos calcáreos interestratificados con calizas arcillosas. Su espesor oscila de 60 a 800 metros dependiendo de la distancia entre el sitio de depósito y el área fuente (ej.: 508 m en el Levantamiento de Villa Juárez y 692 m en la Sierra

1. ANTECEDENTES

El Chocolate), en el sitio se presenta como facies de arenisca calcárea y limolita perteneciente a aguas someras del Jurásico Superior que afloran al sur de Viesca (Imlay 1936). Se le ha asignado una edad Kimmerdigiano-Tithoniano y su ambiente de formación corresponde a aguas cercanas a las costas y fases transgresivas locales, un ambiente de depósito asociado a un sistema deltaico en Torreón y fuera de ahí, (área de Jimulco) corresponde a aguas profundas. Aflora en el sureste de Villa Juárez (Cerro Las Minas), en el flanco occidental de la Sierra de Mapimí y el flanco oriental de la Sierra El Rosario. Sobreyace en forma transicional y concordante a las rocas pertenecientes a La Gloria, y Carbonera; en las Sierras de Jimulco y El Carmen, subyace los sedimentos de la Formación Taraises en un contacto abrupto y concordante (CONAGUA 2020).

CRETÁCICO INFERIOR

Calizas cretácicas

Fm. Taraises: sedimentos calcáreo-arcillosos con una base constituida de capas gruesas de caliza en color gris interestratificada con arenisca y fósiles de amonitas, cima de caliza arcillosa modular en color gris, nodulares y con un mudstone-wackestone con amonitas mal preservadas. Su edad se considera Neocomiano hasta el Aptiano Medio. Está limitada en la parte superior por la Caliza Cupido y en la parte inferior por la Formación La Casita. Aflora ampliamente en la región Torreón-Monterrey, las Sierras Garambullo, Fraile, San Jerónimo y Astillero principalmente. Esta formación es altamente erosionable por su litología, por lo que ha desarrollado pequeños valles y puertos suaves. En cuanto a los espesores, presenta capas delgadas de material de 20 a 50 cm, con nódulos de hematita y óxidos diseminados; un espesor de 350-400 m sobreyace de forma concordante a la Formación La Casita (Imlay 1936; González 2006).

Fm. Cúpido: secuencia calcárea de estratos delgados a gruesos de grainstone y dolomías arenosas en color gris, también cuenta con la presencia de estratos medianos a gruesos de mudstone y wackestone, la edad obtenida para esta formación, basados en datación de microfósiles (miliólidos), es Hauterivino Superior al Aptiano Inferior, siendo correlacionada cronológicamente con la Formación Tamaulipas Inferior, su equivalente de facies de cuenca. Puede presentar estiliolitas, fracturas rellenas de calcita y algunos nódulos de pedernal en caliza. Aflora de forma amplia y constituye las partes más elevadas de las sierras, principalmente en las zonas de Mapimí, Las Noas, El Refugio, España, San Carlos, El Chocolate y Las Iglesias. En cuanto a su espesor, se reportan 350 a 500 m. (González 2006; Molina-Maldonado 2004; CONAGUA 2020).

Fm. Las Vigas: secuencia de arenisca, lutita y caliza arenosa que afloran en la Sierra Prieta y Sierra de Parras (al E del área de estudio) con un espesor de 600 metros. Pertenecen a la llamada Serie Coahuiliana junto con la Fm. Taraises y la Fm. Parritas, caracterizada por cambios laterales y verticales de litofacies que cambian abruptamente su color, espesor y composición (González 2006).

Fm. La Peña: el miembro inferior de esta formación está constituido por calizas arcillosas de estratificación delgada y en la parte superior se compone de lutitas calcáreas del Aptiano Superior y calizas, además, cuenta con la presencia de fósiles con nódulos de pedernal y fauna de miliólidos, rudistas, canodontes y nerineas se encuentran las especies *Dufrenoya justinse* y *Parahoplites sp.* Dicho contenido fósil sugiere un depósito de mar abierto en aguas de mediana a alta profundidad, bajo condiciones tectónicas inestables que dieron como consecuencia los sedimentos clásicos finos en toda la unidad. Su localidad tipo se ubica en el flanco norte de la

1. ANTECEDENTES

Sierra de Taraises, a 4.8 km de la Hacienda La Peña, en Coahuila. Esta unidad litológica cuenta con una amplia distribución en el NE y E de México, aflorando en la zona Torreón-Monterrey, la porción oriental de la Sierras de Garambullo, San Jerónimo, Arteaga y Jimulco. La edad relacionada a esta formación es Aptiano-Albiano (Imlay 1936; Molina-Maldonado 2004; CONAGUA 2020).

Fm. Aurora: se conforma de calizas que pertenecen a una facie arrecifal de una edad del Albiano Medio e Inferior. Presenta facies de aguas profundas con estratificación que va de mediana a gruesa, en ocasiones masiva, acompañada de nódulos y capas delgadas de pedernal; el color de la caliza es gris crema a gris oscuro (intemperismo hace que el color sea gris amarillento) y su espesor varía de los 50 a los 120 m. El contenido fósil que presenta, indica que su depósito ocurrió en facies de cuenca y que su desarrollo fue en los alrededores de la Plataforma de Delicias, aunque otros autores, se inclinan más por un ambiente de plataforma (CONAGUA 2020). Se encuentra aflorando en las sierras de Jimulco, Boca de Álamos, Hispana, San Carlos, las Noas, en la sierra de Mapimí esta unidad se encuentra intrusiónada por rocas graníticas que edifican el Cerro el Sarnoso, además en el área de Parras, en los cañones Grande, Cuesta del Cura, Arroyo Ojo de Agua, del Potrero, de Plataneros, de Juan Pérez, de Santiago y la Sierra Prieta, así como en gran parte de la zona Torreón-Monterrey (González 2006; CONAGUA 2020).

Fm. Cuesta del Cura: esta formación está constituida por afloramientos de calizas en color gris oscuro y ondulantes delgadas con bandas de pedernal negro que se encuentra aflorando a 6.5 km al poniente de la localidad de Parras, Coahuila. Se le asigna una edad del Albiano-Cenomaniano en un ambiente de depósito infranérico. Sus afloramientos se dan en una banda de lomeríos alineados en los anticlinales de Parras, Taraises, Prieta y Santiago, además al SE de Torreón, y toda la zona Torreón-Monterrey con espesores menores a 300 m. Relacionado con el área del acuífero Principal, aflora en la Sierra del Rosario en forma de calizas medianas a delgadas, ocasionalmente onduladas y con presencia de horizontes arcillosos, además lentes, nódulos y bandas de pedernal (Imlay 1936; González 2006; Molina-Maldonado 2004).

Fm. Acatita: calizas con pedernal, dolomíticas y yesos con abundante fauna marina. Su localidad tipo se encuentra en el SO de la Sierra de Acatita. Su distribución se restringe a la Plataforma de Coahuila, constituida por estratos de color gris con tonalidades de mudstone, wackestone, mudstone dolomitizado, yesos, dolomía y puede contener cantidades de pedernal, además de formar parte de los sectores centro y sur de Coahuila y al noreste de Durango. Su espesor va de 150 a 350 metros aproximadamente. De acuerdo con su contenido fósil *Orbitolina texana*, se le asigna una edad Albiano Inferior Medio. Su ambiente de depósito son lagunas marginadas de aguas someras con una alta evaporación y lenta subsidencia del basamento. Se cree que al momento de la sedimentación, la evaporación superaba el aporte de agua generando una inestabilidad marina favoreciendo el depósito de carbonatos de calcio y organismos marinos, que no sobrevivían a dichas condiciones altamente salinas (Ramírez 2011; CONAGUA 2020).

Fm. Treviño: calizas en paquetes gruesos wackestone de pellets, bioclastos, pelecípodos, miliólidos y en algunos casos rudistas que se sitúan en el Cañón Treviño, localizado en la porción norcentral de la Sierra La Paila, a 19 km de la Hacienda de Guadalupe, Coahuila. Constituye principalmente estratos gruesos a masivos de caliza con miliólidos, además de capas de textura gruesa con caprínidos y/o toucasias. Se llegan a encontrar lentes de pedernal, así como intercalaciones de yeso, presenta abundantes estructuras de disolución, estilolitas y vetillas de la calcita, su estratificación va de gruesa a masiva y aflora en la Sierra de Mayrán, Cuchillas, Las

1. ANTECEDENTES

Carretas, Las Delicias, Tlahualilo, Zavaleta, al sur de Viesca, sur de Torreón y sur de Ciudad Lerdo (González 2006). Es similar a ella la Fm. Georgetown, Gpo. Washita y Gpo. Kiamichi. En cuanto a sus espesores, se han medido 500 m en la Sierra de las Noas y 700 m en el Cerro El Pozanco. Gracias a su contenido fósil, se ha podido determinar una edad de Albiano Superior a esta unidad, correlacionándola con la parte superior de la Formación Tamaulipas Superior y Cuesta del Cura (CONAGUA 2020).

CRETÁCICO SUPERIOR

Fm. Indidura: alternancia cíclica de rocas carbonatadas arcillosas con lutita, se llegan a presentar intercalaciones de yeso y areniscas, sus colores son pardo amarillento y en ocasiones tonalidades rosáceas y rojizas, pueden presentar estructuras laminares, fracturas diseminaciones de óxidos y vetas rellenas de calcita. Puede presentar impresiones y moldes de bivalvos. La edad es Cenomiano-Turoniano y aflora ampliamente en las estructuras anticlinales, el Cerro de las Noas, como un conglomerado basal, así como las sierras de Solís y de Texas (al noreste de Torreón). Se encuentra estratificada en espesores de 5 a 20 cm y 30 a 60 cm respectivamente. El espesor es de 350 a 800 m. Debido a su deleznablez, esta formación crea puertos y valles sobre los sinclinales, se identifica fácilmente en campo por esta erosión diferencial con respecto a las formaciones más resistentes que la encajonan. Su ambiente de depósito corresponde a aguas someras de escasa circulación y baja energía. Similar a la Fm. EagleFord (González 2006; Molina-Maldonado 2004; CONAGUA 2020).

Fm. Caracol: areniscas arcólicas, calcáreas compuestas de granos angulosos y redondeados de cuarzo y feldespato en una matriz de carbonato (Rogers 1957) que se intercalan con lutitas. Se encuentra aflorando en la porción norte de la CL. Debido a que presenta una estructura compleja y ausencia de horizontes de referencia aún no se ha podido determinar su espesor, sin embargo, la edad estimada para esta formación es Conociano-Santoniano aproximadamente.

Fm. Parras: secuencia de lutitas calcáreas en color gris oscuro a negro con material carbonoso perteneciente al Santoniano-Campaniano, cuenta con intercalación de calizas que con intemperismo adquiere un color amarillento (González 2006).

TERCIARIO Formación Ahuichila

Fm. Ahuichila: se determinó gracias a los afloramientos expuestos en el Frontón de Ahuichila, localizado en la convergencia de los estados Durango, Coahuila y Zacatecas, a 25 km al SO de Viesca, Coahuila. Esta unidad es un depósito de tipo “molasse” continental acumulado a raíz de los plegamientos de la Sierra Madre Oriental; cuenta con depósitos clásticos de origen continental (fragmentos de caliza, calcarenita, calcilita y rocas volcánicas en una matriz calcárea y limolítica); también presenta calizas, arcosas, tobas y otros materiales piroclásticos en colores de gris a rojizo. En la parte superior contiene yesos intercalados con lutitas y arenisca calcárea, un conglomerado continental bien consolidado con clastos subredondeados de caliza, arenisca, lutita y pedernal negro cementados por material areno-arcilloso y sílice, la base presenta yesos horizontales delgados de caliza de edad Eoceno-Oligoceno, además de material tobáceo y arenisca poco consolidada. Su distribución es muy amplia, abarcando principalmente los flancos de las sierras, con un espesor de 160 metros, también aflora al NE de Villa Juárez, en las sierras Las

1. ANTECEDENTES

Iglesias y Mapimí y los flancos occidentales de las Sierras España y el Rosario. Su origen está relacionado con los primeros depósitos continentales que se formaron por la actividad generada a raíz de la Orogenia Larámide (González 2006; Molina-Maldonado 2004; CONAGUA 2020).

Rocas ígneas intrusivas

Se encuentran diques, lacolitos, diquestratos y troncos. Los espesores y tamaño de estos cuerpos intrusivos varían llegando a alcanzar hasta 10 km. El granito llamado “El Sarnoso” perteneciente a este tipo de estructuras, tiene una forma circular que abarca aproximadamente 75 km y tiene una edad radiométrica por K-Ar de 32 ± 1 Ma del Oligoceno Temprano aflorando en la zona minera Dinamita (González 2006; CONAGUA 2020).

Rocas ígneas extrusivas

Aparecen como derrames de lava de composición basáltica que dieron lugar a la formación de cerros como lo son el de Santiago y los conos volcánicos denominados "Las Tetas de Juana", además de andesitas y tobas, que desde el punto de vista hidrogeológico son consideradas impermeables. Los afloramientos son aislados, predominando pequeños cerros que sobresalen del nivel general del relleno del valle en el margen izquierdo del Río Nazas o las sierras Tlahualilo y Las Delicias. Se incluyen en la zona también pórfidos riolíticos, pórfido andesítico-dacítico, diorita e ignimbritas, riolitas y flujos piroclásticos con geomorfología tabular y estratificada, además de intenso fracturamiento vertical, sus afloramientos son aislados, ubicándose, por ejemplo, en el Cerro Colorado (González 2006; CONAGUA 2020).

TERCIARIO-CUATERNARIO INDIFERENCIADO

Sedimentos cuaternarios

Materiales de mayor granulometría en depósitos de abanicos aluviales a través de las sierras y canales fluviales (100-250 m), los sedimentos arenosos se encuentran en los canales meandriformes dentro del sistema fluvial y los arcillosos provienen de un sistema lacustre y de planicies de inundación. La mayor parte del relleno de la cuenca de la Comarca Lagunera fue aportada por los cauces de sus dos ríos principales, el Aguanaval y el río Nazas, siendo esta facies de canales con bancos de arenas y planicies de inundación, representados por clastos de granulometría de arenas, limos y arcillas. En la ciudad de Gómez Palacio, Tlahualilo y a lo largo del cauce el río Aguanaval, predominan las facies de planicies de inundación (secuencia clástica areno-péltica de 400-700m) sobre las de canales fluviales. Por el contrario, las facies lacustres de sedimentos arcillosos de 100 y 400 m se encuentran en la Laguna de Tlahualilo, Laguna de Mayrán y la Laguna de Viesca, que desembocan en los ríos Nazas y Aguanaval (González 2006; Molina-Maldonado 2004).

Los sedimentos cuaternarios se engloban en tres tipos: el primero es el de depósito de piemonte, corresponde a una línea de abanicos aluviales convergentes cuyos fragmentos provienen principalmente de las formaciones del Cretácico Superior. El tamaño de sus fragmentos varía, siendo el de mayor granulometría el más cercano a las montañas, por lo que su clasificación no es muy buena, contando desde clastos hasta arcillas.

1. ANTECEDENTES

El segundo tipo es de depósito de llanura de inundación, aquí los cortos torrentes montañosos de abanicos aluviales de piemonte interceptaron los depósitos de los ríos Nazas y Aguanaval. Son clastos más gruesos y se encuentran al fondo de los antiguos cauces. Lejos de los cauces, se conforma solamente de arcilla y limo donde debido a la calidez del clima, el carbonato de calcio se acumuló como caliche.

El último tipo de depósito es en laguna seca, estos sedimentos fueron materiales de acarreo de baja energía acarreados por los ríos que atraviesan la zona y que fueron depositados en la parte más baja de las cuencas. Se componen principalmente de limo y arcilla, además de sales que originalmente estaban disueltas en las aguas de inundación (González 2006; Molina-Maldonado 2004).

1. ANTECEDENTES

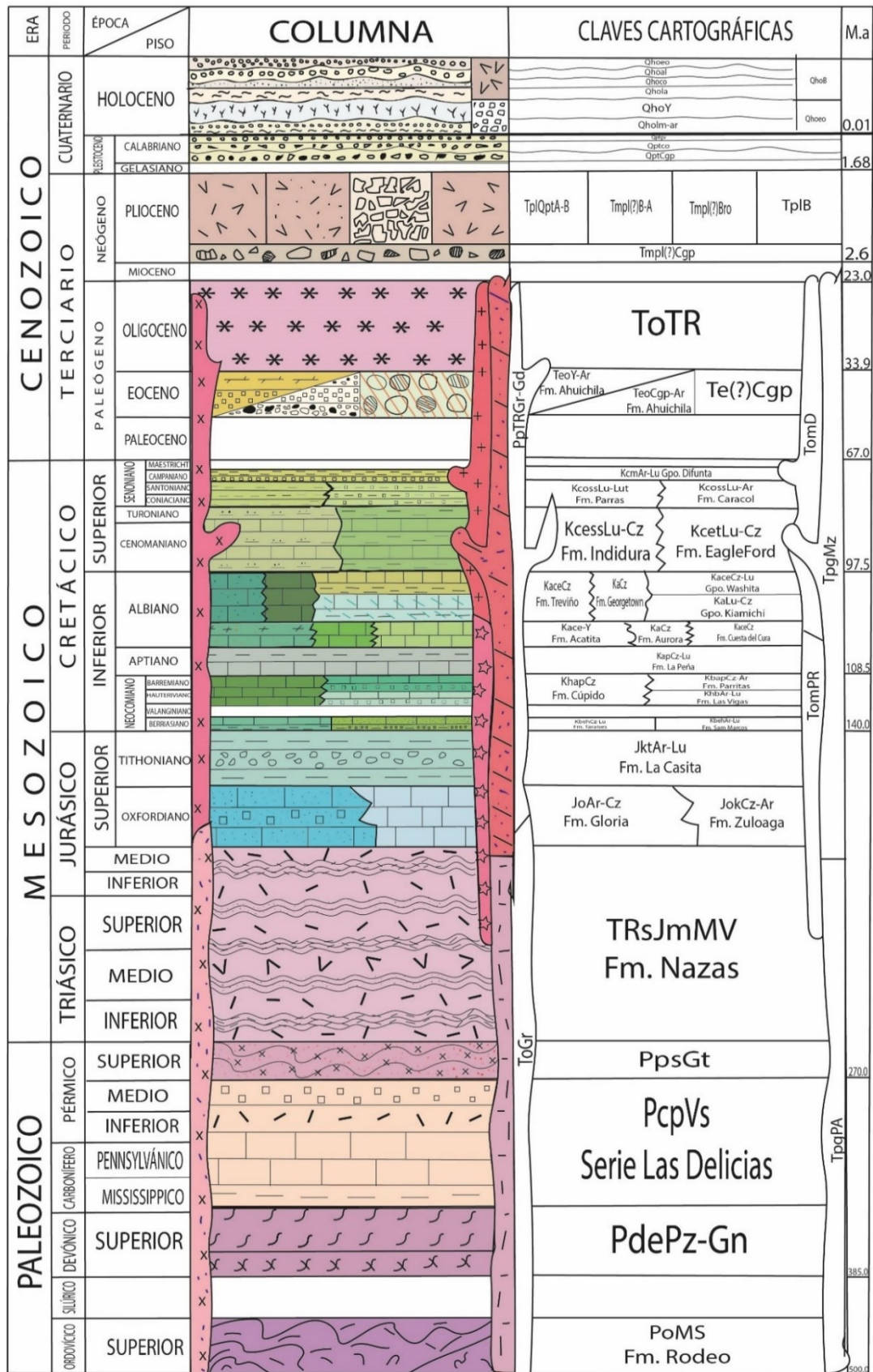


Ilustración 2. Columna cronoestratigráfica detallada de la Comarca Lagunera.

1. ANTECEDENTES

1.8. Geología Estructural

Apoyándose en imágenes satelitales y modelos digitales de elevación de terreno, se han definido cuatro bloques con orientación NW-SE que se delimitan por fallas de tipo normal. Estas estructuras se ubican en La Sierra del Rosario, el pilar de la Sierra de Mapimí-Las Iglesias, El Sarnoso, la fosa San Inés y Vicente Suárez (CONAGUA 2020).

La evolución estructural y estratigráfica en el noreste de México comenzó en el Pérmico Temprano con la formación de Pangea, que generó la formación del cinturón Ouachita-Marathon, que aflora en la sierra del Carmen en el NW de Coahuila. Posteriormente el *rifting* del Triásico Tardío - Jurásico Temprano comienza a romper Pangea, al mismo tiempo que ocurre la apertura del Atlántico Norte y la generación del Golfo de México. La siguiente etapa en desarrollarse fue la dispersión del piso oceánico y la rotación del bloque de Yucatán hacia el sur hasta el Jurásico Tardío. Aquí también se menciona la Megacizalla Mojave-Sonora (MMS), que es una falla de componente lateral izquierdo, limitando el bloque de Coahuila, el movimiento Bajociano al Calloviano a lo largo de la megacizalla pudo haber permitido el desplazamiento de varios bloques Cordilleranos hacia el sur. Esta gran falla generó rocas volcánicas calco-alcalinas o sub-alcalinas en distintas partes del NE como lo son Aramberri, Nuevo León, Charcas en San Luis Potosí, Caopas en Zacatecas, etc. En la CL estas rocas son representadas por la Fm. Nazas, que formaron un arco entre el Triásico Tardío y el Jurásico Tardío. La traza de los eventos generados por la MMS quedó cubierta por la Fm. Zuloaga y equivalentes. La subsidencia tectónica del noreste de México se desarrolló de forma paulatina, las facies depositadas fueron controladas por los márgenes de los altos estructurales y zonas alejadas de los mismos, como es el caso de la Fm. La Gloria y Zuloaga. De igual manera depositó la Fm. La Casita por subsidencia térmica y acumulación sedimentaria, cuyos sedimentos terrígenos provienen del Bloque de Coahuila, Burro-Peyotes y al Arco de Tamaulipas (González 2006).

Un enfriamiento de la corteza ocurrió en el Cretácico Temprano, así como una subsidencia tectónica que dio lugar a formaciones extensas en plataformas carbonatadas (Fm. Cúpido y Aurora). El Bloque de Coahuila permaneció como un alto estructural de basamento que se encargó de controlar la distribución y patrones de progradación de las facies carbonatadas. Para el Aptiano Tardío se deposita la Fm. La Peña, como lutitas de cuenca profunda con carbonatos arcillosos y pedernal (Barboza-Gudiño *et al.*, 1998; González 2006).

Para finales del Jurásico Tardío - Cretácico Temprano, terminó la expansión del Golfo de México logrando una transgresión marina en gran parte del este de México, dicha transgresión se interrumpe con la Orogenia Laramide, generada por subducción de bajo ángulo de la placa Kula-Farallón bajo la placa Norteamericana, levantando, cabalgando y transportando sedimentos depositados del Jurásico Tardío - Terciario Temprano hacia el noreste. La manifestación principal de este evento es la Sierra Madre Oriental, donde se deformó el paquete sedimentario del noreste de México y otras rocas en el sur y centro del país. En el área de Monterrey y Parras se generó a raíz de este acontecimiento tectónico pliegues recumbentes y grandes cabalgaduras, mientras que, en el Cinturón Plegado de Coahuila, los pliegues son asilados y cabalgan solo hacia los elementos positivos de los límites del cinturón.

Para finalizar, en el Terciario Tardío - Cuaternario, debido a la placa que se subducía (Farallón bajo Norteamericana) migra el magmatismo del arco de oeste a este, esto generó un

1. ANTECEDENTES

cambio en el magma pasando de calci-alcálido en la trinchera a calci-alcálidos ricos en potasio y alcalinos en la parte interna del continente. Posteriormente, el arco migra hacia la margen pacífica en el Mioceno Tardío debido a un posible *roll-back* (aumento en el ángulo de subducción) de la placa, entonces se genera extensión continental en el este. A este evento se le denomina "Cuencas y Sierras" o el "*Basin and Range*" generando distensión en la corteza y magmatismo intraplaca, intrusiones y derrames volcánicos, aquí se generaron los horst Bloque de Coahuila, Isla de la Mula, arco Burro-Salado y el arco de Tamaulipas, y los graben Cuenca de Sabinas, Mar Mexicano, canal de Monterrey, canal de Chihuahua y cuenca de Maverick, delimitados por fallas de basamento normales y/o laterales de componente izquierda. Estas estructuras generaron actividad ígnea y controlaron la depositación sedimentaria (Ilustración 3).

Los estudios estructurales realizados sobre la tectónica de la Sierra Madre Oriental en la zona de Parras Coahuila son generalmente monografías de sierras. Gracias a esta información, se reconoce que la Fm. Cúpido se encuentra en la extremidad NO de la sierra, se interpreta como una falla inversa enraizada en su parte delantera donde reposa la caliza Cúpido sobre la Fm. Indidura.

Un estilo tectónico suave caracteriza la parte E en la Sierra de la Peña, donde sus estratos se acomodan en pequeños pliegues recostados hacia el N. Ambas Sierras (de Parras y de la Peña) se agrupan en la misma zona de "Valles y Sierras" que cuentan con plegamiento intenso. En la zona se presenta una probable falla vertical de dirección NE-SO que separa ambas sierras, esta discontinuidad estructural se interpreta por la presencia de una pequeña fosa tectónica formada por fallas normales. La parte oriental de la Sierra de la Peña está formada por una sucesión de pliegues alargados, paralelos y apretados que siguen una dirección ONO-ESE. En la cima de estas estructuras se encuentra la Fm. Aurora y los cañones anticlinales se conforman por capas más blandas pertenecientes a las formaciones del Cretácico Superior (Tardy 1993).

1.9. Hidrología

El acuífero principal de la zona está formado por sedimentos aluviales, fluviales y lacustres del Cuaternario poco consolidados, así como rocas calcáreas fracturadas, en donde la parte superior no está confinada, sin embargo, los horizontes franco-arenosos y arcillosos crean localmente condiciones semi-confinadas, unidades de donde se extrae la mayor cantidad de agua por medio de pozos, que tienen una profundidad promedio de 500 m, esto debido a que en las rocas sedimentarias el nivel piezométrico presenta una rápida variación estacional por su alta conductividad hidráulica y su baja capacidad de almacenamiento (IMTA 1991). El acuífero inferior se encuentra fracturado y compuesto de calizas y dolomías del Cretácico Inferior al Superior.

La circulación de agua a través de estas rocas se realiza principalmente a través de conductos de disolución y cavernas (Torres-Martínez *et al.*, 2021). Las recargas al acuífero se realizan por medio de las presas Lázaro Cárdenas y Francisco Zarco (González-Hita *et al.*, 1995; Gutiérrez-Ojeda 1995), además de infiltraciones locales y laterales a través de los depósitos aluviales del río Nazas. Otros aportes son los de flujos de retorno de riego, infiltración pluvial y flujo lateral de flujos adyacentes (CONAGUA 2002, Ramírez 2011). Las rocas ígneas que componen al acuífero carecen de distribución y son limitadas a ignimbritas con fracturas, diaclasas (flujo vertical) y coladas de basaltos con un sistema de fracturamiento por enfriamiento con una

1. ANTECEDENTES

alta conductividad hidráulica derivadas de la presencia de vesículas y en su mayoría, siguiendo una dirección vertical.

Desde 1975, se han reportado conos de depresión en zonas de alta densidad de pozos de bombeo en la parte central del acuífero (Molina-Maldonado 2004) provocando que el agua subterránea fluya concéntricamente hacia el centro del acuífero (Gutiérrez-Ojeda 1995), estos conos continúan expandiéndose y fusionándose hoy en día, donde la tasa media anual de descenso del nivel freático es de 1.6 m/año (CONAGUA 2020).

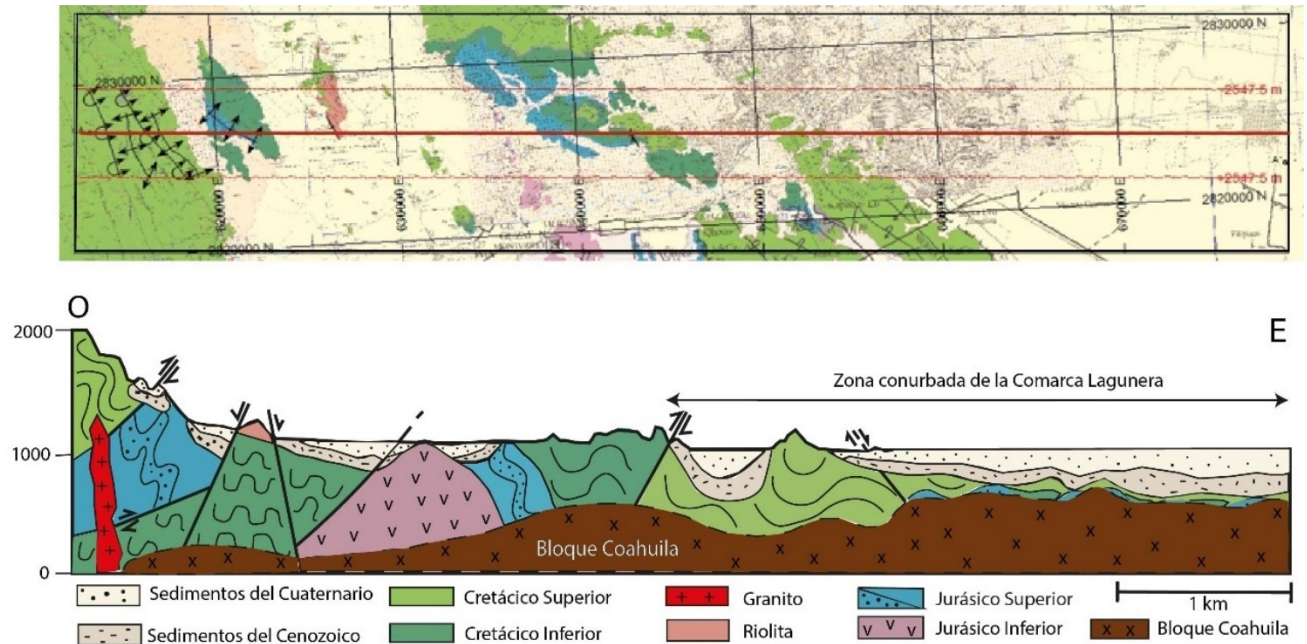


Ilustración 3. Perfil geológico de la zona de estudio. Flores-Salinas y Barboza-Gudiño, 2024.

1. ANTECEDENTES

1.10. Hipótesis

Las fuentes primarias de arsénico, fluoruro y uranio presente en el agua subterránea del acuífero de la Comarca Lagunera provienen de fuentes geogénicas, principalmente rocas ígneas félsicas.

1.11. Justificación

A pesar de contar con numerosas investigaciones sobre el tema y ser un problema que lleva décadas afectando la salud de la población en la zona de estudio, los investigadores aún no han determinado cuáles son las fuentes específicas de As, F⁻ y U en las rocas de la zona de estudio. Es necesario realizar un estudio completo que relacione las interacciones agua-roca-sedimento para obtener una caracterización detallada del material, ya que es el primer paso para comprender los sistemas de flujo de agua que operan en la CL, sus componentes y movilización de elementos, tomando en cuenta que la fuente más común de contaminantes en agua subterránea proviene de la liberación de los materiales presentes en los acuíferos (Cortina *et al.*, 2008).

La presencia de As en las aguas es un problema ambiental prioritario, este limita el uso del recurso en cuestiones de agua potable, impide el crecimiento socioeconómico y el desarrollo sostenible de la agricultura. Para mejorar dichos factores y lograr un desarrollo sustentable a las zonas afectadas con altos niveles de contaminación en sus aguas subterráneas, son necesarios datos para conocer a profundidad la distribución geográfica y la génesis geológica de los contaminantes en el acuífero, sedimentos y suelos, conocer cuáles son los factores que influyen en su movilidad en el agua subterránea, como se encuentran en los suelos y la manera en que se absorben a las plantas. Con esta información, se podrán desarrollar investigaciones enfocadas en la comprensión de la transferencia de los elementos contaminantes a través de la cadena alimenticia, sus efectos en la salud de los humanos, tecnologías para su remoción, la evaluación de impacto y riesgo ambiental (Bundschuh *et al.*, 2008).

1.12. Objetivo general

Evaluar el origen y los controles que rigen la movilización de As, F⁻ y U al agua subterránea de la Comarca Lagunera.

1.13. Objetivos específicos

1. Identificar las fases mineralógicas portadoras de los elementos de interés presentes en las muestras de roca y sedimento en la Comarca Lagunera utilizando MEB, DRX, ICP-MS, ICP-OES y petrografía.
2. Determinar la capacidad de movilización del arsénico, fluoruro y uranio mediante extracciones secuenciales a partir de rocas fuente identificadas.

1. ANTECEDENTES

3. Diseñar un modelo conceptual con mecanismos de interacción agua-roca para la comprensión del origen y movilidad de los contaminantes en el área de estudio

2. Metodología de caracterización de matrices ambientales

2.1. Muestras sólidas

Los métodos utilizados en este trabajo para los análisis geoquímicos fueron: espectrometría de ICP con el método estándar EPA3050B para As y U, así como un electrodo selectivo de iones (ISE 9609BNWP) calibrado con soluciones estándar acordes al método ASTM D 1179 para medir F⁻. Además, análisis petrográficos con microscopía polarizada, difracción de rayos X y microscopio electrónico de barrido con las que se determinaron las fases minerales portadoras de arsénico, fluoruro y uranio. Mediante un proceso de extracciones secuenciales de siete pasos se obtuvieron las asociaciones responsables de la movilización de dichos elementos al agua subterránea en la zona de estudio.

Se recolectaron 27 muestras de roca dentro de la zona de estudio mediante un muestreo dirigido a juicio experto, priorizando rocas ígneas félsicas, que según la literatura (Bundschuh *et al.*, 2008), frecuentemente son portadoras de los elementos objetivo. Se realizó una descripción del afloramiento y de muestra de mano. Por el otro lado, se tomaron 15 muestras de sedimento provenientes de zonas de río, zona de recarga y descarga del acuífero, así como cercanas a los intrusivos/rocas ígneas muestreadas previamente. Las muestras colectadas y su localización se encuentran en la Ilustración 4.

Posteriormente se realizó una selección de muestras, en la que se eligieron 13 muestras de roca y 7 de sedimento, enfocándonos en las más representativas y usando como criterio, además, el grado de alteración de las mismas, priorizando rocas frescas y alteradas de una misma zona para poder realizar una comparación de su composición química. En los sedimentos se eligieron los más cercanos a los intrusivos y los que representan a la zona de recarga, media y descarga.

Con la selección de rocas, se realizaron 12 láminas delgadas, en donde cada roca se cortó y pulió con abrasivos del 80 al 1000 y pegaron con resina epóxica a un portaobjetos, donde posteriormente se le dio un acabado de desbaste hasta llegar al espesor de 30 micras para poder ser analizadas bajo el microscopio óptico, cuyo objetivo es reconocer la mineralogía presente en las rocas. Este trabajo fue realizado en el Instituto de Geología de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP) así como en el Taller de Laminación de Petrografía y Mineragrafía del área de Ciencias de la Tierra de la misma institución.

Todas las muestras de sedimento fueron cribadas con la malla 10, menor a 2 mm, y posteriormente pulverizadas bajo un molino de anillos vibratorio con mortero de ágata en el laboratorio de preparación del Instituto de Geología de la UASLP. Similar fue el proceso de preparación de roca, donde antes de ser pulverizada, pasó por una trituradora de quijada para disminuir la granulometría de esta.

Con la técnica de microscopio electrónico de barrido (MEB), se lograron identificar la fase cristalina a la que pertenece el mineral analizado, logrando proporcionar no solo porcentajes de los elementos presentes sino también fases en los compuestos inorgánicos, las muestras

2. METODOLOGÍA DE CARACTERIZACIÓN DE MATRICES AMBIENTALES

analizadas fueron las rocas LR18, LR20 y LR21, a las que se le realizó una sección pulida similar a la de las secciones delgadas para poder observar la matriz de la roca.

La Difracción de Rayos X (DRX) facilita la identificación de las fases minerales que se encuentren, normalmente, en porcentajes superiores al 5% de los elementos de interés. Para su análisis se tomó en cuenta el material previamente pulverizado proveniente de las rocas LR03, LR14, LR20, LR21 y los sedimentos LS01, LS13 y LS15. Los análisis tanto de MEB como DRX, se llevaron a cabo en los laboratorios pertenecientes al Instituto de Metalurgia de la UASLP.

Para el análisis de roca total, se realizó primeramente una digestión de rocas y sedimentos por el método de microondas y parrilla. Los pasos realizados para rocas fueron los siguientes: se pesó 0.1 gr de muestra en viales (ocho muestras más un blanco y dos estándares), se agregó 5 ml de HNO₃ ultrex + 3 ml de HF. El método utilizado para microondas fue el SLAG, donde después del proceso las muestras se dejaron enfriar para posteriormente ser neutralizadas con 5 ml de ácido bórico al 4%, se le aplicó el método *Boric Acid HF Neutralization* en el microondas. Para finalizar se aforó a 50 ml y colocó en viales.

Para el método por parrilla se pesó 0.1 gr de muestra y colocó en viales numerados, posteriormente se le agregó 1 ml de ácido nítrico + 1 ml de HF, donde después se colocaron en la parrilla toda la noche a 180°C para evaporar el contenido. Se dejaron enfriar y se agregó 1 ml de HCl (ácido clorhídrico), nuevamente se dejaron toda la noche en parrilla, después de enfriar se añadió 1 ml de ácido nítrico + 1 ml de agua destilada y dejaron en la parrilla toda la noche para evaporar. Al final, se destaparon los viales y aforaron a 50 ml para su futura medición.

En las alícuotas resultantes de los dos métodos anteriormente descritos, se midieron los elementos mayores por medio de un ICP-OES y los traza por medio de ICP-MS, a excepción de fluoruros, cuya concentración se determinó (junto a un segundo análisis de roca total para comparar resultados con los propios generados), en *ActLabs*, Canadá, y mediante el método de fusión alcalina y medición por electrodo de ion selectivo en el Laboratorio de Agua y Suelo de la Facultad de Ingeniería UASLP.

Para las pruebas de extracciones secuenciales, se realizó una investigación profunda para seleccionar las fases que serían utilizadas en el procedimiento, se buscó que las fases fueran dirigidas específicamente a los materiales que se consideraron portadores (ej.: fosfatos, vidrio, carbonatos) y los que mejores resultados han dado según la literatura; de esta forma se propuso una nueva metodología novedosa que no se había probado anteriormente, las fases, extractantes y condiciones de las extracciones se pueden consultar en el Tabla 1.

Las muestras seleccionadas para someterse a este procedimiento (LR03, LR14, LR18, LR20, LR21, LR22, LR23, LS01, LS07, LS08, LS13, LS14, LS15 y LS16) fueron pulverizadas en un molino de discos vibratorios modelo Retsch 20, posteriormente se pesó 1.6 gr de muestra en viales Falcon, en donde se añadieron los extractantes. Una vez realizada la fase, las muestras fueron lavadas con 10 ml de agua destilada, agitadas a 250 rpm por 15 minutos y centrifugadas por 15 minutos más antes de añadir el siguiente extractante.

Para la última fase, se dejaron solamente 0.1 gr de muestra en el vial para lograr una relación 1:400 con el extractante. Después de su realización, se tomaron alícuotas de tres ml con tres ml de amortiguador de fluoruros para su medición inmediata, el resto se acidificó con ácido

2. METODOLOGÍA DE CARACTERIZACIÓN DE MATRICES AMBIENTALES

nítrico hasta un pH menor a 2 y se mantuvieron en refrigeración y oscuridad hasta su medición, realizada en el campus Juriquilla de la UNAM bajo ICP-MS. Se realizaron duplicados de las muestras LS01, LS14, LR20 y LR21.

2. METODOLOGÍA DE CARACTERIZACIÓN DE MATRICES AMBIENTALES

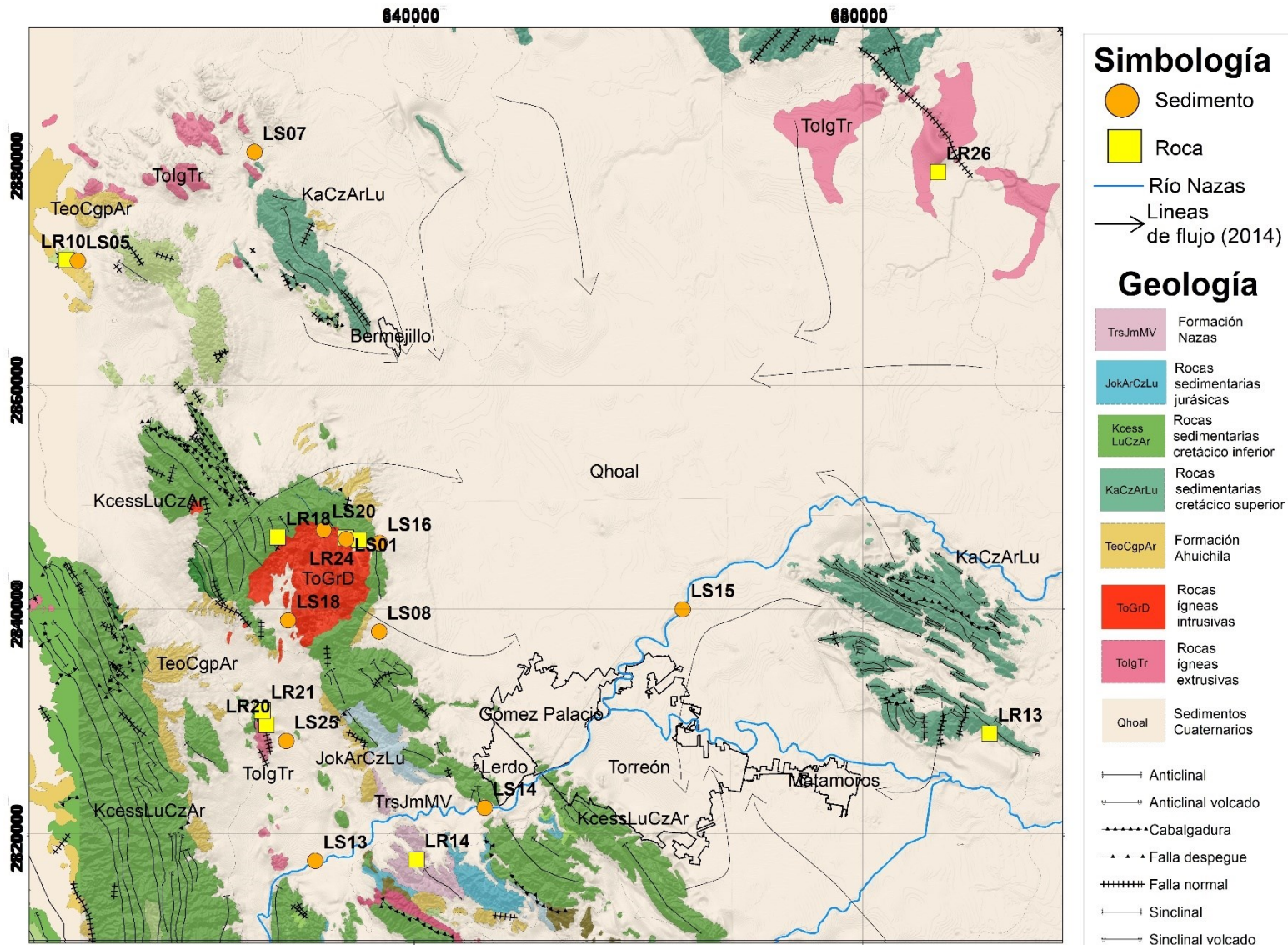


Ilustración 4. Localización de toma de muestreo de rocas y sedimentos.

2. METODOLOGÍA DE CARACTERIZACIÓN DE MATRICES AMBIENTALES

Tabla 2. Fases propuestas para las extracciones secuenciales.

Etapa	Alcance	Extractante	pH	Volumen ml	Tiempo h	Procedimiento	rpm	Temperatura °C	SSR	Referencias
1	Solubles	Agua-CO ²	5.5±0.2	32	18	Agitación	29±2	20	20	NOM-147-SEMARNAT-SSA1-2004
2	Intercambio arsenato por fosfato	(NH ₄)H ₂ PO ₄	7	40	16	Agitación	250	20	25	Wenzel et al., 2001
3	Ligado a carbonatos	CH ₃ COONa en 25% ácido acético	5	40	5	Agitación	250	20	25	Tessier et al., 1979 y Banning et al., 2017
4	Ligado oxihidróxidos de Fe y Mn	NH ₂ OH·HCl en 25% de ácido acético (CH ₃ COOH)		40	5	Agitación	250	20	25	Zeien y Brummer 1989 y Banning et al., 2017
5	Disolución de metales pesados unidos a óxidos de Fe cristalinos	C ₆ H ₈ O ₆ +(NH ₄) ₂ C ₂ O ₄	3.25	40	0.5	Baño maría	90	96±3	25	Zeien y Brummer 1989
6	Ligado a fosfatos	HNO ₃		32	16	Agitación	250	20	20	Banning y Rude 2015 y Nezatli et al., 2007
7	Sílica amorfa/vidrio	NaOH	13.3	40	24	Agitación	250	20	400	Park et al., 2020 y Georgidis et al., 2015

2.2. Muestras de agua

En cuanto al agua subterránea (Ilustración 5), se obtuvieron para su caracterización, 119 muestras de pozos y norias de la zona de estudio, en donde los parámetros fisicoquímicos del agua se realizaron en tres pasos; primero, con una sonda multiparamétrica YSI se midieron en campo pH, temperatura (°C), conductividad (µS/cm), sólidos disueltos totales (TDS mg/L), oxígeno disuelto (mg/L) y alcalinidad (calculada posteriormente con el *software* de uso libre *The Alkalinity Calculator* en su versión 2.22Tk). Las muestras para análisis a futuro fueron recolectadas en frascos de polietileno para su análisis químico (iones principales y elementos traza), que se realizó por medio de ICP-MS e ICP- OES (transportadas bajo refrigeración y almacenadas bajo la misma condición). Por último, se toma una parte de la muestra sin acidificar en pequeños viales que fueron enviados a *Stable Isotope Paleo Environments Research Group* en la Universidad del Estado de Iowa, Estados Unidos, para el análisis de los isótopos de oxígeno 18 y deuterio.

Las muestras para el análisis de cloruros, sulfatos y fluoruros son colectadas en frascos con capacidad de 500 ml, sin filtrar ni uso de preservador. Las muestras de nitratos y nitritos se almacenaron en envases de polietileno de 125 ml, filtradas y con ácido sulfúrico como inhibidor de actividad bacteriana para nitratos, en el caso de nitritos se añadió cloruro mercuríco a la muestra. Todas las muestras fueron tomadas llenando en su totalidad el envase, para evitar burbujas de aire y almacenadas con hielo para conservarlas durante el transporte.

Los fluoruros en el agua fueron medidos por medio de un electrodo de ion selectivo de tipo combinado, se le agrega un amortiguador de fluoruros a la muestra para ajustar la fuerza iónica y destruir los complejos metal-fluoruro. En cuanto a los nitratos, se midieron utilizando el método

2. METODOLOGÍA DE CARACTERIZACIÓN DE MATRICES AMBIENTALES

espectrofotométrico, llevando la muestra a la neutralidad de pH, ya que había sido previamente acidificada. Nitritos y fosfatos fueron obtenidos por el método de colorimetría.

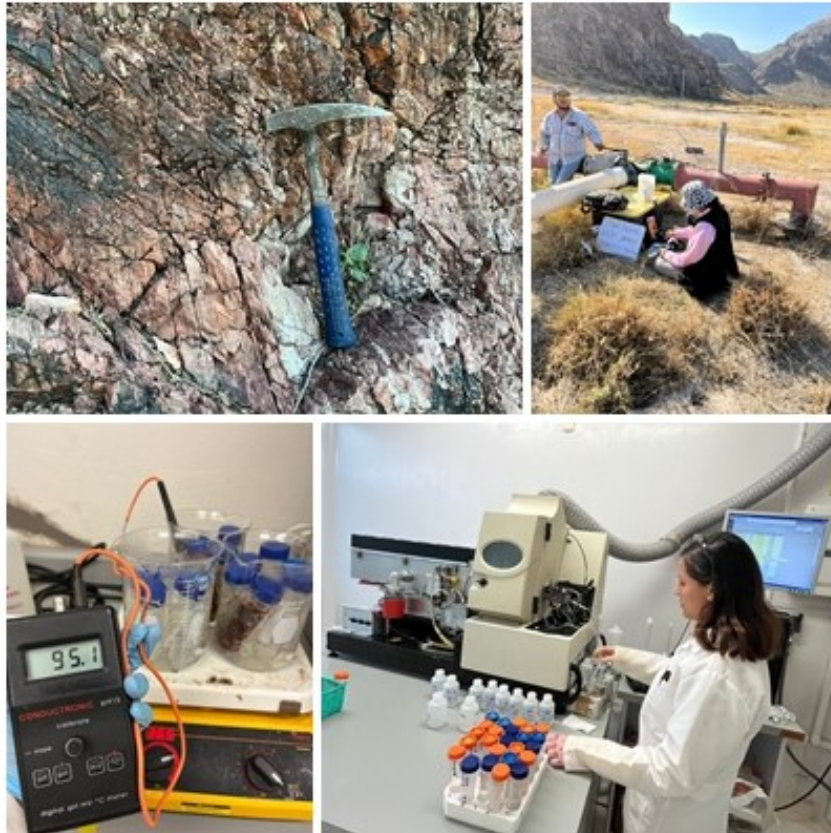


Ilustración 5. Parte de la metodología de trabajo implementada en este proyecto.

3. Caracterización geoquímica y mineralógica de fuentes geogénicas

Una caracterización es un estudio descriptivo y cuantitativo cuyo objetivo es acercarse a la comprensión de las estructuras, características, dinámicas, etc., asociadas a un objeto de interés. Dicha información debe servir para conocer sobre un tema en específico donde la estructura de la información a indagar/generada debe ser sustancial y consistente, de esta manera se recurre a variables básicas y estratégicas donde a pesar del tiempo sean de interés. La caracterización debe generar una base de datos (de Medellín 2019).

3.1. Petrografía

La petrografía ígnea es el estudio de la composición mineralógica de una roca y su textura utilizando un microscopio de polarización en una sección delgada. En dicho estudio se enlistan los minerales encontrados, texturas, así como un análisis cuantitativo y cualitativo de los mismos, dicha información nos puede proporcionar información sobre formación de la roca (Godfrey y Gill 2022). Las descripciones petrográficas de las rocas con mayor contenido de As, F y U se muestran a continuación, para la información de las rocas restantes ver la sección de Anexos.

LR03 Endoskarn

Localidad: Sierra el Sarnoso, Dinamita, Durango.

13R X: 633900; Y: 2846368.

La textura predominante es holocristalina, la matriz es felsítica con la presencia de cristales de clinopiroxeno diseminado y minerales opacos. Aparecen minerales como micas, hornblenda anhedral, apatito y ortopiroxeno. Se pueden apreciar zonas con calcita identificada por sus colores de tercer orden en tonos pastel (Ilustración 6 y 7), por lo que se infiere que la muestra de roca corresponde a una zona de endoskarn, en donde el granitoide de la zona emplaza a la roca carbonatada encajonante, para reforzar esta información se encuentran diseminados fluorapatitos, cuyo ambiente de formación, además de pertenecer a zonas de brecha y fracturación, se incluye el de alteraciones hidrotermales (Da Silva *et al.*, 2009). En la muestra se pueden observar residuos del intrusivo original (El Sarnoso). Otro de los minerales encontrados es el circón inclusionado en las calcitas; los cristales de biotita disponibles presentan forma anhedral, tamaños finos y solo se distribuyen en una parte de la roca, apenas distinguibles por sus tonos café. La oxidación se hace presente en los bordes de los minerales opacos. El apatito se encuentra distribuido en distintos tamaños, predominando la forma elongada de sus caras, es un mineral muy común en pegmatitas y se suele relacionar con elementos traza REE, en particular U y Th, conservándolos en la diagénesis (Abdullin *et al.*, 2014).

3. CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA Y MINERALÓGICA DE FUENTES GEOGÉNICAS

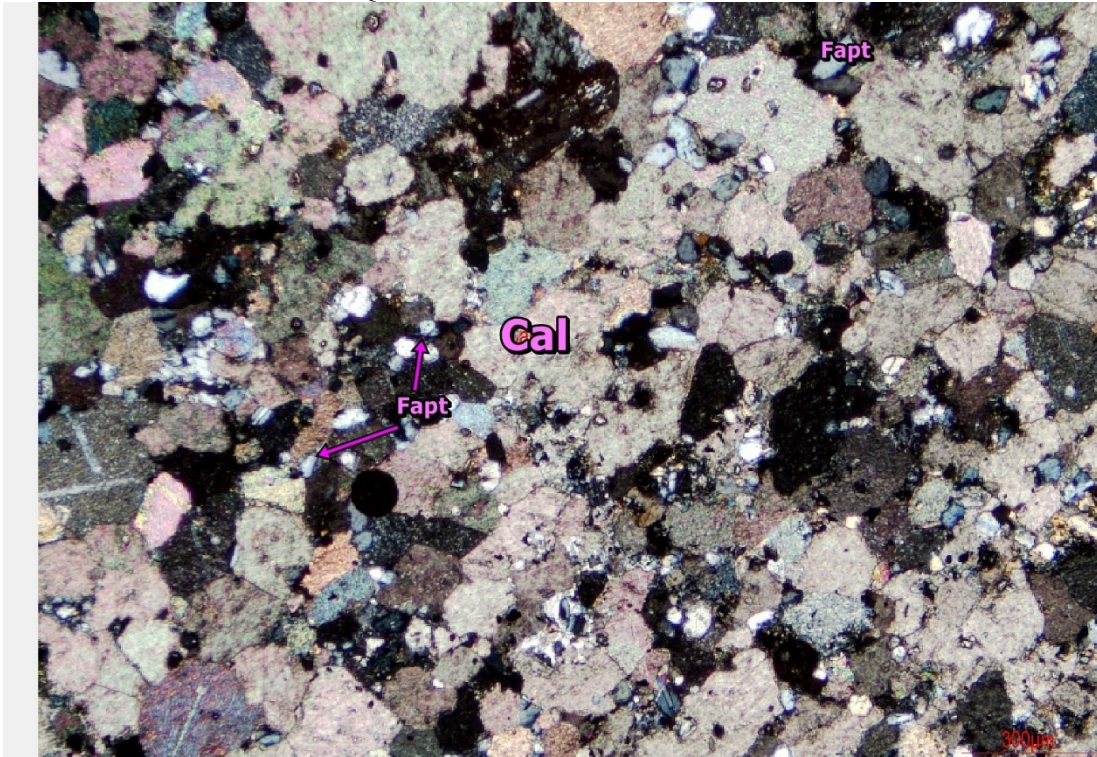


Ilustración 6. Zona de reacción en muestra LR03 endoskarn, se aprecia la calcita (Cal) y cristales de feldspato (Fapt) diseminado. Nícoles cruzados 5x.

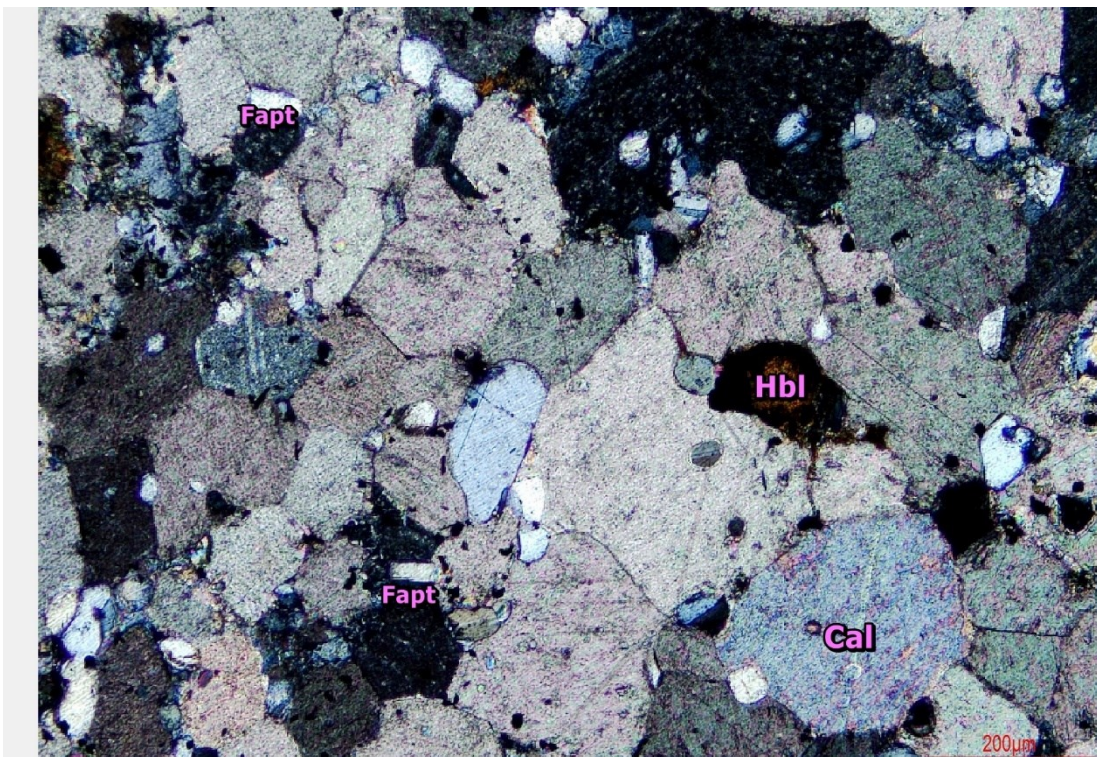


Ilustración 7. Cristal de hornblenda (Hbl) en matriz de calcita (Cal), se pueden observar feldspatos (Fapt) en toda la matriz de la roca. Nícoles cruzados 2x.

3. CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA Y MINERALÓGICA DE FUENTES GEOGÉNICAS

LR13 Caliza Fm. Treviño

Localidad: Afloramiento de Fm. Treviño, Coahuila.

13R X: 691304; Y: 2828903.

Roca sedimentaria tomada de un macizo rocoso con fracturas rellenas de calcita, oxidación y fosilización presente. Se observan bajo lámina delgada foraminíferos bentónicos de la familia de los miliólidos, así como braquiopodos, por lo que se infiere un depósito de aguas someras.

La caliza proveniente de la Fm. Treviño (se encuentra cartografiada como Fm. Acatita en el mapa del Servicio Geológico Mexicano) tomada de la Cueva del Tabaco/Supremos Poderes presenta fósiles que en su mayoría aparecen en una matriz mudstone, el único mineral identificado bajo microscopio óptico es la calcita que aparece en forma subhedral y que en ocasiones rodea a los miliólidos, esto nos indica aguas poco profundas y cercanía de las costas, en el caso de los braquiopodos (Ilustración 8), son indicadores de poca o alta profundidad.

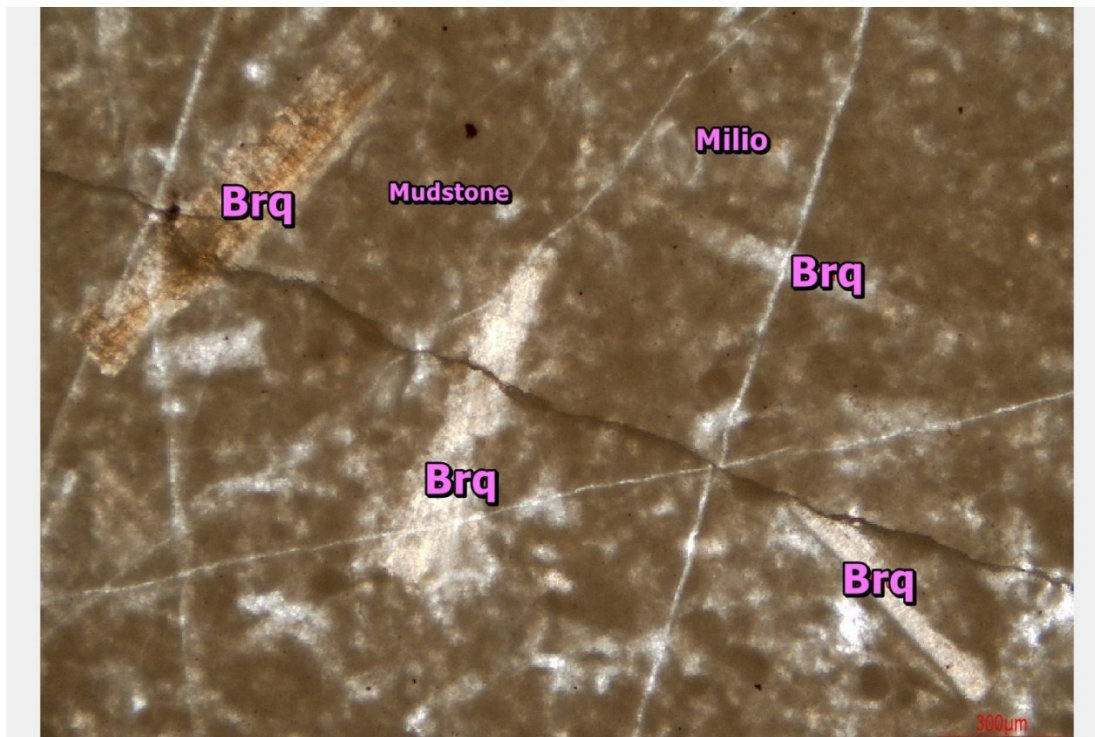


Ilustración 8. Matriz de mudstone que contiene fósiles: bráquiopodos mal preservados (Brq) y miliólidos (Milio). Nícoles cruzados 5x.

LR14 Ignimbrita Fm. Nazas

3. CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA Y MINERALÓGICA DE FUENTES GEOGÉNICAS **Localidad: Monterrey, Durango.**

13R X: 640200; Y: 2817641.

Ignimbrita riolítica de grano medio predominante con textura fanerítica, felsítica, eutaxítica y pertítica, el tamaño de los cristales presentes bajo microscopio va de fino a medio en una matriz desvitrificada y con presencia de alteraciones (Ilustración 10). Algunos de los cristales de cuarzo anhedrales cuentan con resorción, generada al ser parcialmente disueltos en el ascenso y evolución magmática, además, la presencia de esferulitas nos indica un proceso de desvitrificación en la matriz de la roca. Las plagioclasas cuentan con formas euhedrales de maclas simples, algunas de ellas seritizadas, en las zonas de oxidación se manifiestan los minerales opacos.

Evidenciando el origen piroclástico de la roca, se aprecian vesículas y "*glass shards*", que son estructuras vítreas deformadas causadas por la compresión de la ceniza caliente dándole una textura eutaxítica, clasificando la ignimbrita como de bajo grado, típicas de ambientes de orogenia.

La matriz muestra estructuras fluidales que arrastran vidrio, biotita, esferulitas, minerales opacos y plagioclasas alteradas. Un proceso importante que ocurre en esta roca está representando por la textura pertítica representada en lamelas de albita dentro de feldespato alcalino, estas representan una mezcla de magmas, donde anortositas y piroxenos de alta temperatura pueden disolver todo el aluminio que se exsuelve como lamelas de plagioclasas con el enfriamiento y a baja presión, esto da como resultado un color rojo a los feldespatos potásicos por exsolución de hematita de grano fino.

En la lámina se observan feldespatos alcalinos fracturados, oxidados e incrustados con hematita(?), además de que la alteración identificada parece ser potásica, ésta se puede acompañar de sulfuros, el ensamblaje presente es de feldespato potásico con biotita-magnetita (Ilustración 11), donde los feldespatos presentes comúnmente se presentan en tonos rojizos por las pequeñas inclusiones de hematita.

3. CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA Y MINERALÓGICA DE FUENTES GEOGÉNICAS

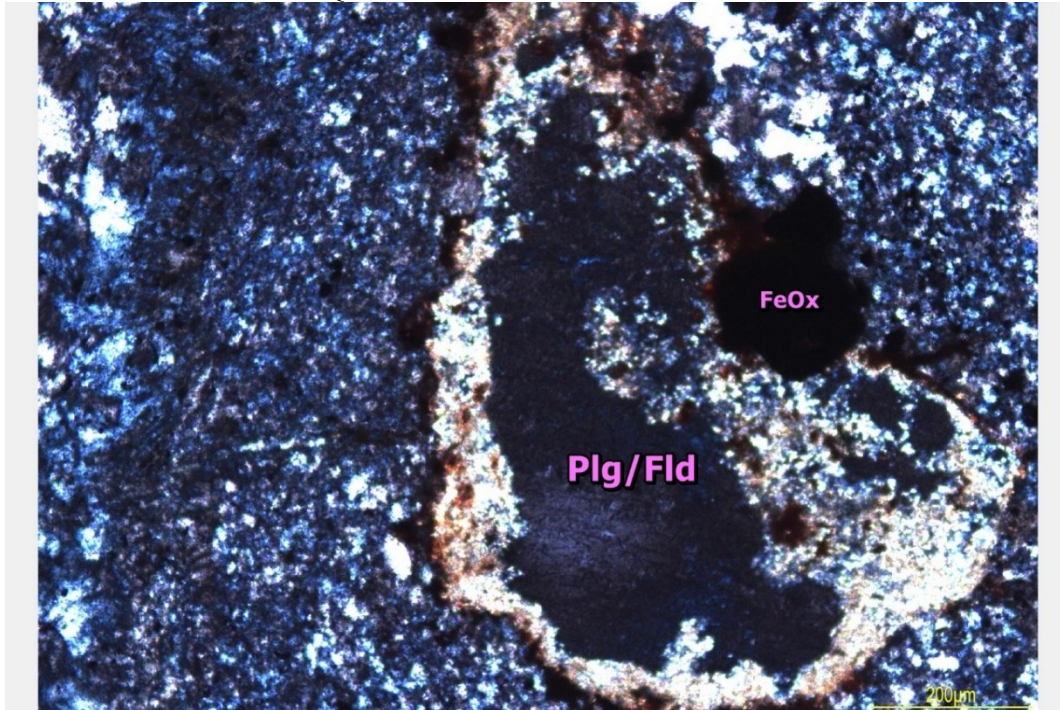


Ilustración 9. Alteración de plagioclasa (Plg) a feldespato (Fld), se observa en su borde una reacción donde aparecen óxidos de hierro (FeOx). Nícoles cruzados, 10x.

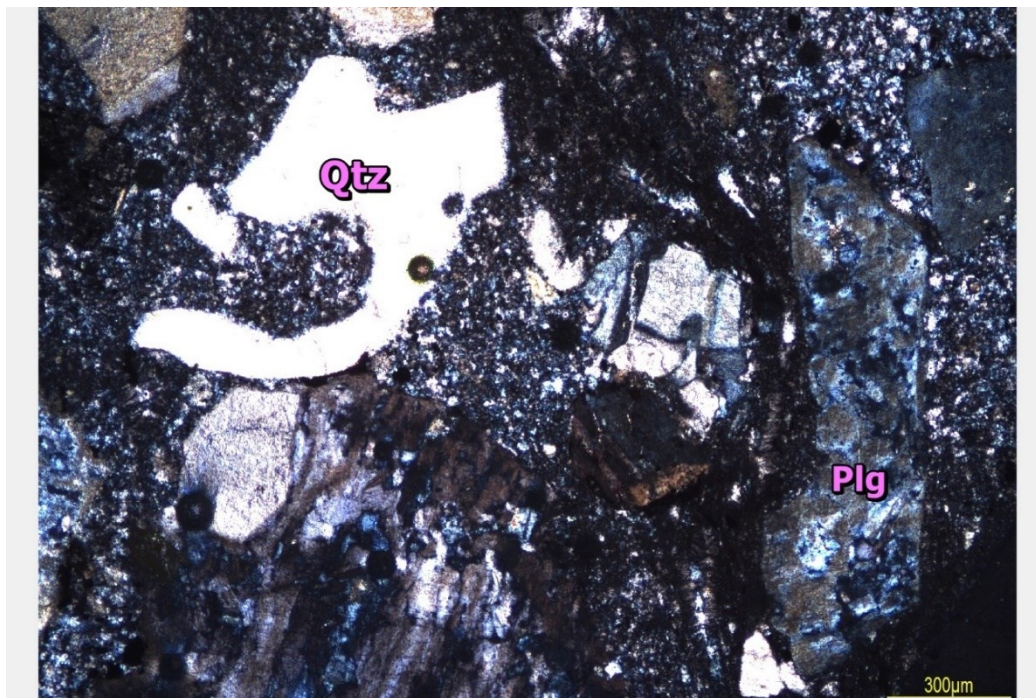


Ilustración 10. Exsolución de cuarzo (Qtz) por mezcla de magmas, además se nota la sericitización en las plagioclasas (Plg). Nícoles cruzados, 5x.

LR18 Granodiorita

3. CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA Y MINERALÓGICA DE FUENTES GEOGÉNICAS

Localidad: Dinamita, Durango.

13R X: 627820; Y: 2846405.

Los cristales en la muestra de mano son de granulometría mediana a gruesa de composición félsica (plagioclasa y cuarzo), minerales máficos en menos porcentaje (hornblenda y biotita) además de presentar oxidación en el afloramiento.

La muestra es una roca ígnea félsica de textura porfirítica, granodiorita. Cuenta con la presencia de hornblenda euhedral, la mayoría de ellas con alteración a clorita. Sus colores de interferencia son de segundo orden (azul, rosa y púrpura), dentro de estas alteraciones también se encuentran las augitas de alto relieve y colores de interferencia de tercer orden en tonos pastel, las biotitas (Ilustración 11) son de forma anhedral y normalmente se encuentran en zonas cercanas a las hornblendas. La textura de desmezcla antipertrítica se presenta en la plagioclasa (con zonación) que crece dentro de feldespato alcalino.

Los fenocristales más grandes pertenecen a cuarzo (Ilustración 12) y plagioclasa sericitizada y zonada. La textura de mirmequita aparece en cuarzo anhedral que tiene un intercrecimiento con la plagioclasa (sódica). Los pocos circones presentes en la roca se emplazaron aprovechando las alteraciones, como la de la plagioclasa sericitizada, así como la oxidación en la lámina que aprovecha las fracturas en la roca. Los minerales opacos también aparecen exclusivamente en las zonas de alteración. La alteración hidrotermal afecta a toda la roca, ayudando a la formación de minerales secundarios como la clorita. El apatito aparece diseminado en distintos tamaños en toda la roca.

Por la presencia de biotita, podemos inferir que la temperatura de cristalización de la roca era alta, rodeando los 400°C, tomando en cuenta este parámetro, es probable que la alteración presente en la roca sea del tipo potásica, con un pH casi neutro, formada normalmente por el emplazamiento de un pórfido, esta alteración cuenta con minerales como feldespato potásico, biotita secundaria con cuarzo y magnetita, anhidrita y sulfuros asociados (Barnes y Prestvik, 2000).

3. CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA Y MINERALÓGICA DE FUENTES GEOGÉNICAS

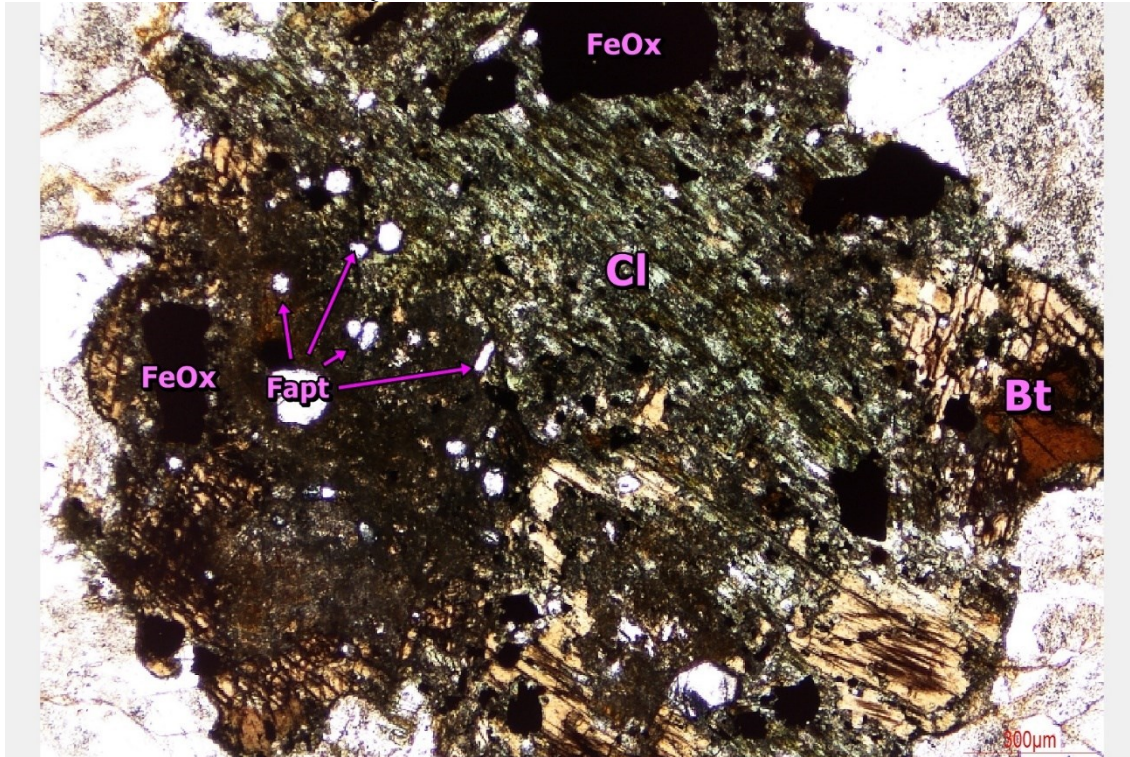


Ilustración 11. Cristales de fluorapatito (Fapt) diseminados en una alteración de biotita (Bt) a clorita (Cl), aprovecha este proceso los óxidos de hierro (FeOx) para formarse. Nícoles paralelos, 5x.

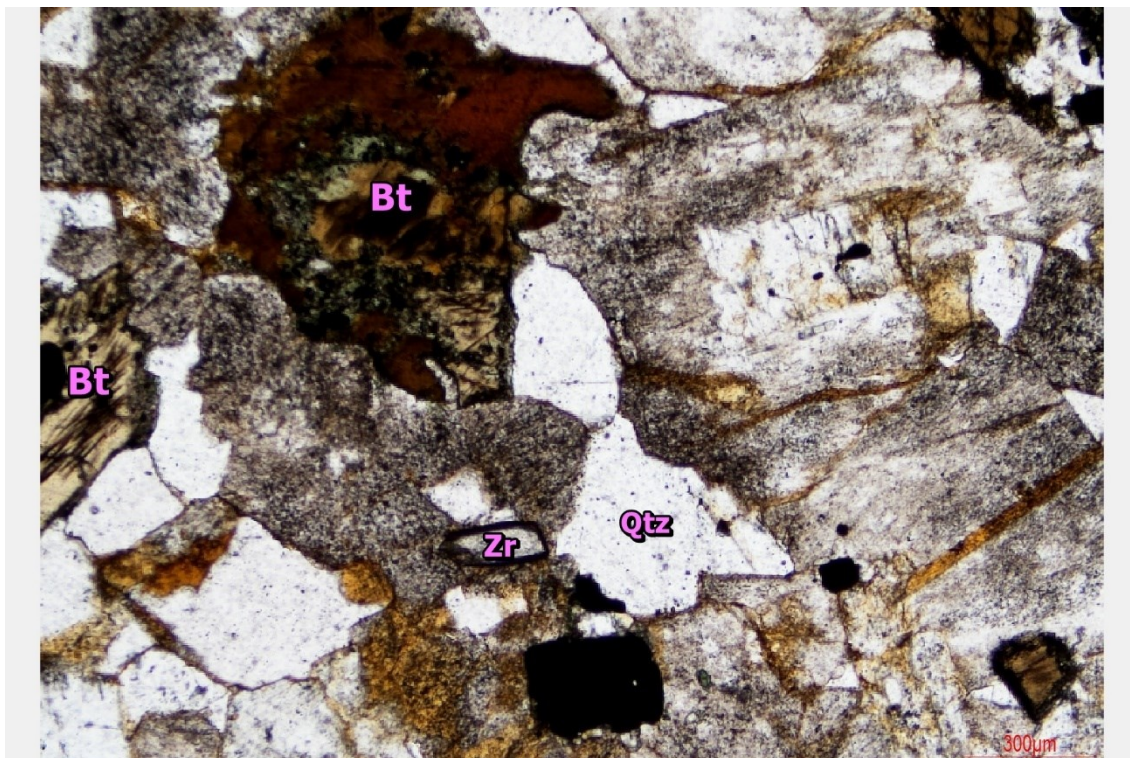


Ilustración 12. Se observa un circón (Zr) que destaca por su relieve, cuarzos (Qtz) subhedrales así como biotitas (Bt) que se están alterando. Nícoles paralelos, 5x.

LR20 Riolita Vallecillos

3. CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA Y MINERALÓGICA DE FUENTES GEOGÉNICAS

Localización: Vallecillos, Durango.

13R X: 626811; Y: 2829681.

En muestra de mano la roca presenta un tono rojizo, bandeamiento de flujo, zonas oxidadas, poros y cristales de grano fino de cuarzo. Roca ígnea extrusiva, derrame riolítico en color guinda-rojizo. El cuarzo se presenta de forma subhedral y anhedral en distintos tamaños, además de contar con fracturamiento, sigue la dirección del flujo diseminándose, algunos cristales se presentan como cúmulos del mismo cristal y se encuentra asociado a feldespatos alcalinos en texturas gráficas.

El orto piroxeno aparece de forma subdural y anhedral con clivaje en una dirección, color arena y sin color de interferencia (negro). Por otro lado, los minerales anisótropos aparecen de forma elongada orientados de forma concordante con la textura fluidal (Ilustración 13 y 14); la forma del sanidino es subhedral, con fracturas presentes, ángulo de extinción oblicua, color crema y en interferencia gris y negro del primer orden, relieve bajo.

Circón anhedral de relieve alto en color crema y clivaje en una dirección, intercrecido dentro del cuarzo.

La matriz es félsítica con una composición de cuarzo y feldespato alcalino. El cuarzo y feldespato alcalino se intercrecen en una textura granofírica en distintos sitios de la muestra de roca.

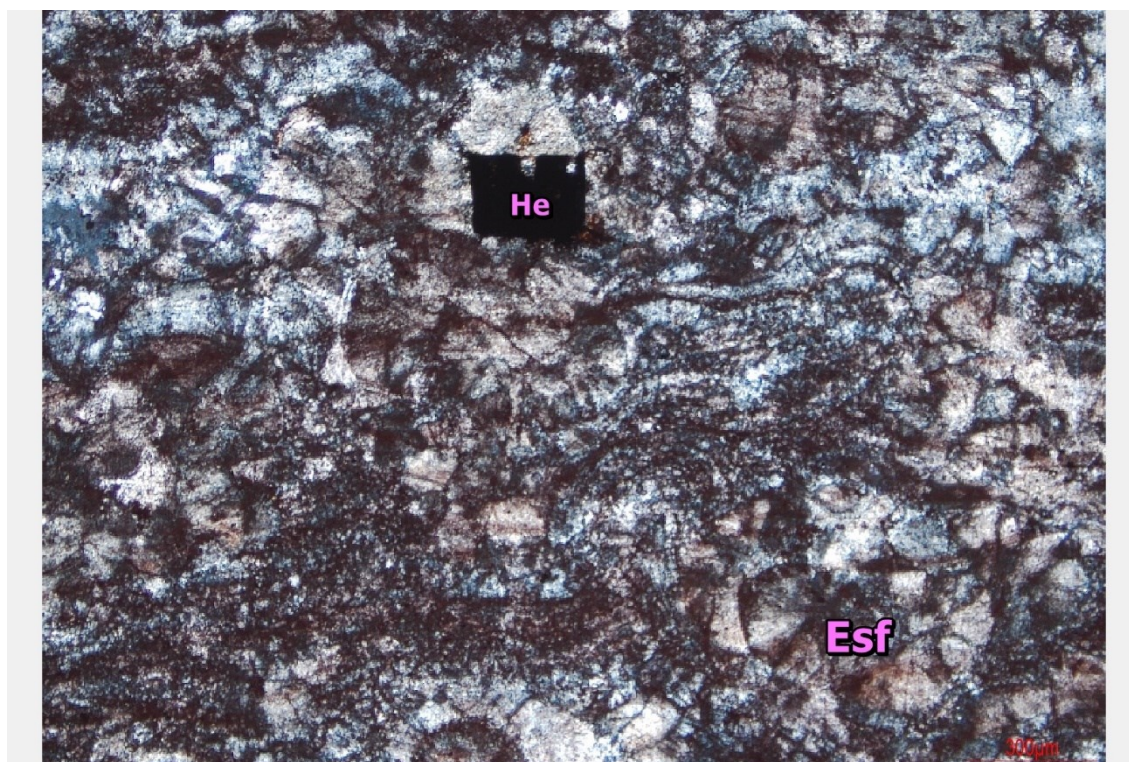


Ilustración 13. Cristal de hematita (He) en una matriz fluidal de esferulitas (Esf). Nícoles cruzados, 5x.

3. CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA Y MINERALÓGICA DE FUENTES GEOGÉNICAS

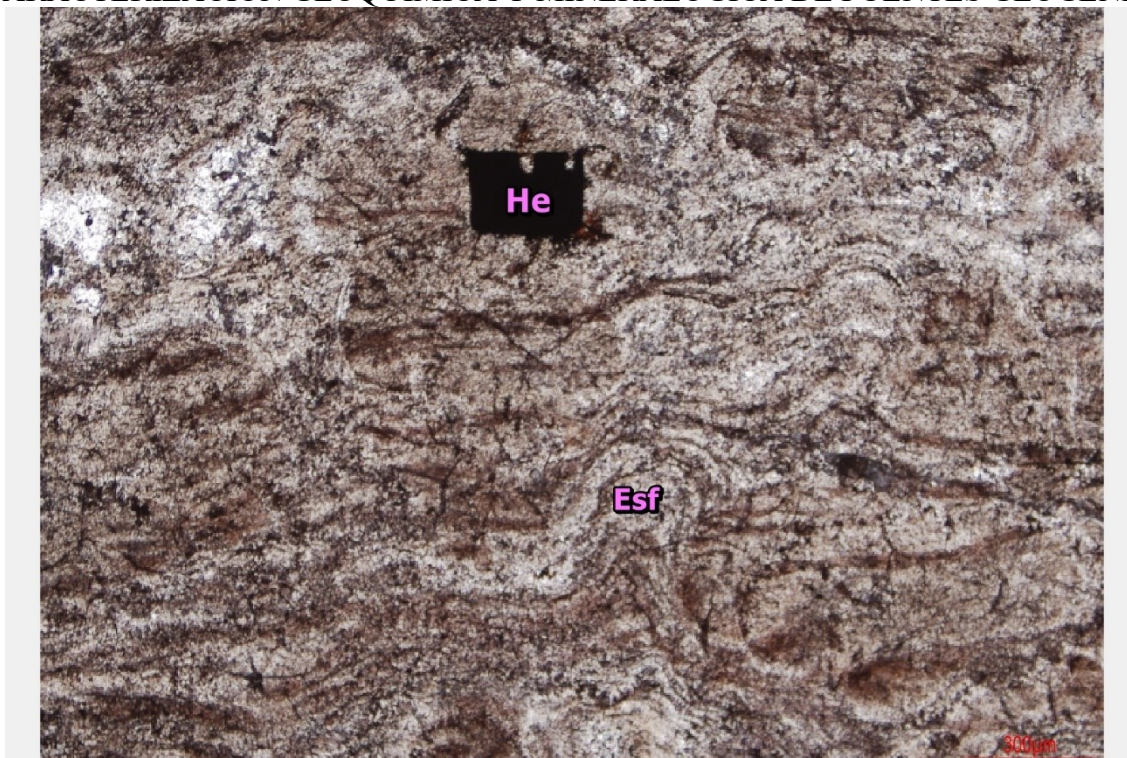


Ilustración 14. Cristal de hematita (He) en una matriz fluidal de esferulitas (Esf). Nícoles paralelos, 5x.

LR21 Toba Riolítica Vallecillos

Localización: Vallecillos, Durango.

13R X: 626452; Y: 2830933.

En muestra de mano se observa una roca ígnea extrusiva en tono rosa - salmón con múltiples poros, cristales de plagioclasa y cuarzo en forma de fiame, además de oxidación mineralizada, aparece sin soldar.

Las plagioclasas de forma euhedral y de extinción recta aparecen alteradas a calcita y algunas otras, de mayor tamaño, están siendo seritizadas también se pueden observar en ellas una textura glomeroporfírica, que se manifiesta como agregados de cristales (González 2015). En el caso de los cuarzos, aparecen en grano fino y de hábito principalmente anhedral. Se encuentra un mineral no identificado, probablemente por falta de pulido en la lámina, de relieve medio con colores de interferencia de segundo orden en tonos rosas y naranjas en una forma anhedral. Se aprecia oxidación principalmente rodeando cristales minerales que ayudan a la alteración de estos, como la de plagioclasa a calcita.

Hay presencia de calcedonia con textura de desvitrificación cercana a las zonas oxidadas. El circón (Ilustración 15) parece estar incrustado en uno de los seis lados del cuarzo y en algunas plagioclasas; la textura de sieve se hace presente en grandes cristales de plagioclasa por la disolución de dicho mineral en el fundido original. La textura eutaxítica es típica de rocas piroclásticas y cuenta con *glass shards* (estructuras vítreas con forma arqueada-aplanada) causadas

3. CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA Y MINERALÓGICA DE FUENTES GEOGÉNICAS por la compresión y deformación que resulta por la acumulación de ceniza caliente. Plagioclasa euahedral con textura pertítica.

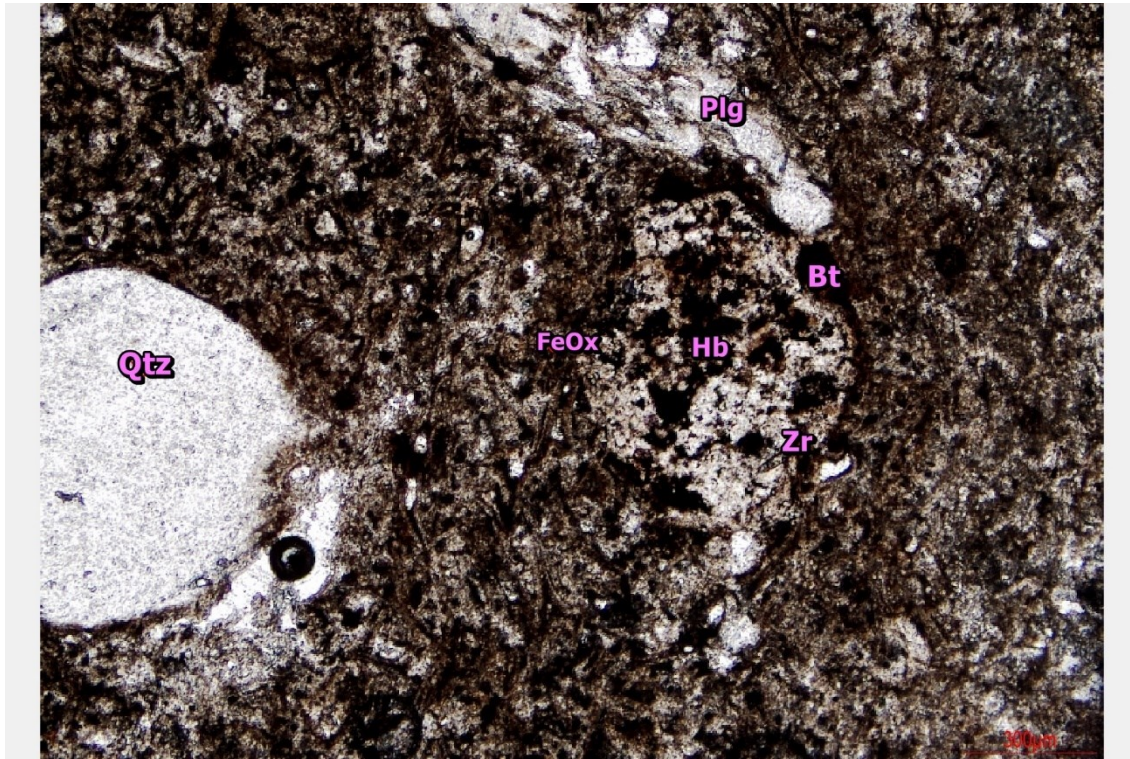


Ilustración 15. Se observa disolución en el cristal de cuarzo (Qtz), una plagioclasa (Plg) alterada, múltiples óxidos de hierro (FeOx), así como alteraciones en los cristales de horblenda (Hb) y biotita (Bt). Se aprecia un circón (Zr) incrustado. Nícoles paralelos, 5x.

3. CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA Y MINERALÓGICA DE FUENTES GEOGÉNICAS

3.2. Geoquímica de roca total

Los análisis de roca total engloban los elementos mayores y menores que contienen las rocas y sedimentos. Los resultados de todos los elementos analizados se encuentran en los Anexos de esta tesis; los elementos de interés se presentan en las Tablas 3 y 4, los valores típicos de estos elementos en rocas ígneas / riolitas son de 30 mg/kg de As, 740 mg/kg de F y 3.6-5 mg/kg de U (Stecher 1998):

Tabla 3. Resultados de elementos de interés presentes en las muestras de roca.

ID	Geología	Grupo	As mg/kg	F mg/kg	U mg/kg
LR26	Basalto	Rocas ígneas extrusivas	5	500	0.9
LR10	Riolita	Rocas ígneas intrusivas	12	<200	1.8
LR20	Riolita Vallecillos	Rocas ígneas intrusivas	99	500	7.1
LR21	Toba riolítica Vallecillos	Rocas ígneas intrusivas	66	<200	5.2
LR24	Mineralización oxidada	Rocas ígneas intrusivas	4130	80	<0.5
LR03	Endoskarn	Rocas ígneas intrusivas	5	1700	4.9
LR04	Endoskarn alterado	Rocas ígneas intrusivas	5	<200	0.9
LR18	Granodiorita	Rocas ígneas intrusivas	9	1200	9.2
LR13	Caliza Fm. Treviño	Cretácico Inferior	6.7	2430	0.7
LR14	Ignimbrita Fm. Nazas	Jurásico Inferior	31	<200	1.9

Como se observa en el Tabla 3, las muestras que presentan valores que sobrepasan los valores típicos para rocas ígneas de los elementos de interés son las dos riolitas, con 99 y 66 mg/kg de As, la ignimbrita de la Fm. Nazas con 31 mg/kg, y la mayor portadora es la mineralización oxidada, con 4130 mg/kg.

Para el F⁻ destacan las cantidades encontradas en el endoskarn (LR03) con 1700 mg/kg del elemento, la granodiorita (LR18) con 1200 mg/kg respectivamente, y la mayor cantidad se encontró en la caliza de la Fm. Treviño con la presencia de 2430 mg/kg. Para finalizar, las muestras riolitas también contienen cantidades altas de U, con 7.1 y 5.2 mg/kg del elemento; la mayor cantidad encontrada fue de 9.2 mg/kg de U en la granodiorita LR18.

3. CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA Y MINERALÓGICA DE FUENTES GEOGÉNICAS

Tabla 4. Resultados de análisis de los elementos de interés presentes en las muestras de sedimentos.

ID	Descripción	As mg/kg	F mg/kg	U mg/kg
LS01	Sedimento Intrusivo El Sarnoso	110	140	0.7
LS05	Arroyo Cerro Colorado	9.2	110	2.3
LS07	Arroyo Jaboncillo-La Rosita	21	150	5.4
LS08	Arroyo Poblado La Mina	16.2	280	4.1
LS11	Sedimento Río Nazas	43.2	350	3.7
LS13	Margen del río Nazas	27.2	150	4.6
LS14	Margen del río Nazas	21.3	250	2.8
LS15	Margen del río Nazas	16.6	70	4.1
LS16	Canal de flujo	31.6	660	4
LS18	Canal de flujo	14.3	620	7.2
LS20	Sedimento de intrusivo	16.1	280	3
LS25	Abanico aluvial de riolitas	39.2	550	3.5

Para el caso de los sedimentos (Tabla 4), las muestras destacables son la LS01, la más cercana al intrusivo de la zona, con la cantidad de 110 mg/kg de As, con casi la mitad de esta cantidad, encontramos la muestra LS11 con 43.2 mg/kg de As y el LS25, zona cerca a riolitas, con 39.2 mg/kg de As en su composición.

Las cantidades más altas de F en los sedimentos fueron 660 y 620 mg/kg, encontrados en canales de flujo de la zona, posiblemente enriqueciéndose a medida que avanzaba el cauce por la CL (muestras LS16 y LS18). Aunque 550 mg/kg del elemento se encontraron también en la zona de riolitas mencionadas anteriormente, en la muestra LS25. Para el U, no se encontró relación alguna entre los dos sitios que mostraron mayor aporte del elemento, LS07 en la zona Jaboncillo-La Rosita con 5.4 mg/kg de U y los sedimentos de la muestra LS18 pertenecientes a un canal de flujo con 7.2 mg/kg del mismo elemento.

3.3. Caracterización mineralógica por DRX y MEB

Las muestras para DRX se analizaron en el laboratorio del Instituto de Metalurgia de la UASLP, bajo las siguientes condiciones de operación para el haz de rayos X: 40 kV, 35 mA, θ 4-90°, un *stepsize* de 0.02°, *timestep* de 0.03 segundos y un tiempo de difracción de 21 minutos. Los resultados fueron evaluados con ayuda del software DIFRACC.EVA V5.2 con la base de datos PDF-2 *release* 2022.

Las muestras analizadas y su composición mineralógica se encuentran en el Tabla 5, los difractogramas completos se encuentran en los Anexos de esta tesis.

3. CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA Y MINERALÓGICA DE FUENTES GEOGÉNICAS

Tabla 5. Mineralogía principal encontrada en las rocas y sedimentos del estudio mediante DRX.

ID	Descripción	Mineralogía	Cristalino/Amorfo %
LR03	Intrusivo El Sarnoso	Calcita, grosularia, wollastonita, diópsido y biotita	79.1/20.9
LR14	Ignimbrita Fm. Nazas	Cuarzo, ortoclasa, microclina, calcita, albita y hematita	76.4/23.6
LR20	Riolita Vallecillos	Cuarzo, microclina, ortoclasa, calcita, muscovita, hematita, augita y hedenberguita	78.8/21.2
LR21	Toba riolítica Vallecillos	Cuarzo, microclina, ortoclasa, calcita, albita y hematita	79.4/20.6
LS01	Sedimento intrusivo El Sarnoso	Calcita, cuarzo, ortoclasa, anortita y hematita	76.9/23.1
LS13	Sedimento aguas arriba del Río Nazas	Cuarzo, ortoclasa, anortita, calcita y hematita	72.6/27.4
LS15	Sedimento aguas abajo del Río Nazas	Cuarzo, albita, sanidino, microclina y hematita	75/25

El mayor porcentaje de la mineralogía presente en las rocas y sedimentos es típico de rocas félsicas, encontrando en ellas cuarzo (SiO_2), microclina (KAlSi_3O_8), albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) y anortita ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$). La zona de reacción del intrusivo agrega calcita (CaCO_3) a su composición que también fue detectada bajo microscopio petrográfico tanto en roca como en sedimentos. Se visualiza, en la mayoría de las muestras, la presencia de óxidos de hierro (Ilustración 16), en estos minerales, el Fe se libera con la oxidación, en donde se pierden electrones del catión, modificando de esta manera el tamaño y la carga del mismo, generando un desequilibrio en la estructura mineral, obligando al catión a abandonar la red original y dejar un espacio libre para los H^+ . La solubilidad del Fe se ve afectada por los compuestos que puede formar con los sulfatos, sulfuros y carbonatos, la importancia de su presencia radica en que pueden adsorber elementos potencialmente contaminantes, como el As.

Además, siguiendo con el enfoque de las fases portadoras, se ha reportado que los vidrios silícicos pueden contener más As que otros tipos de rocas comunes (Onishi y Sandell 1955), similar puede ocurrir con el U, que se ha encontrado distribuido de forma dispersa en vidrio volcánico amorfo como fuente primaria (Banning *et al.*, 2012). De forma similar, el F⁻ ha sido encontrado en rocas riolitas ricas en vidrio en cantidades máximas de 4900 mg/kg (Coats *et al.*, 1963). En las muestras analizadas, el porcentaje de vidrio de rocas y sedimentos es alrededor del 23%, pudiendo representar una fuente geogénica de los elementos de interés. Bajo este método no sé detecto la presencia de minerales con As, F o U en su estructura cristalina, esto puede deberse a los límites de detección del método.

3. CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA Y MINERALÓGICA DE FUENTES GEOGÉNICAS

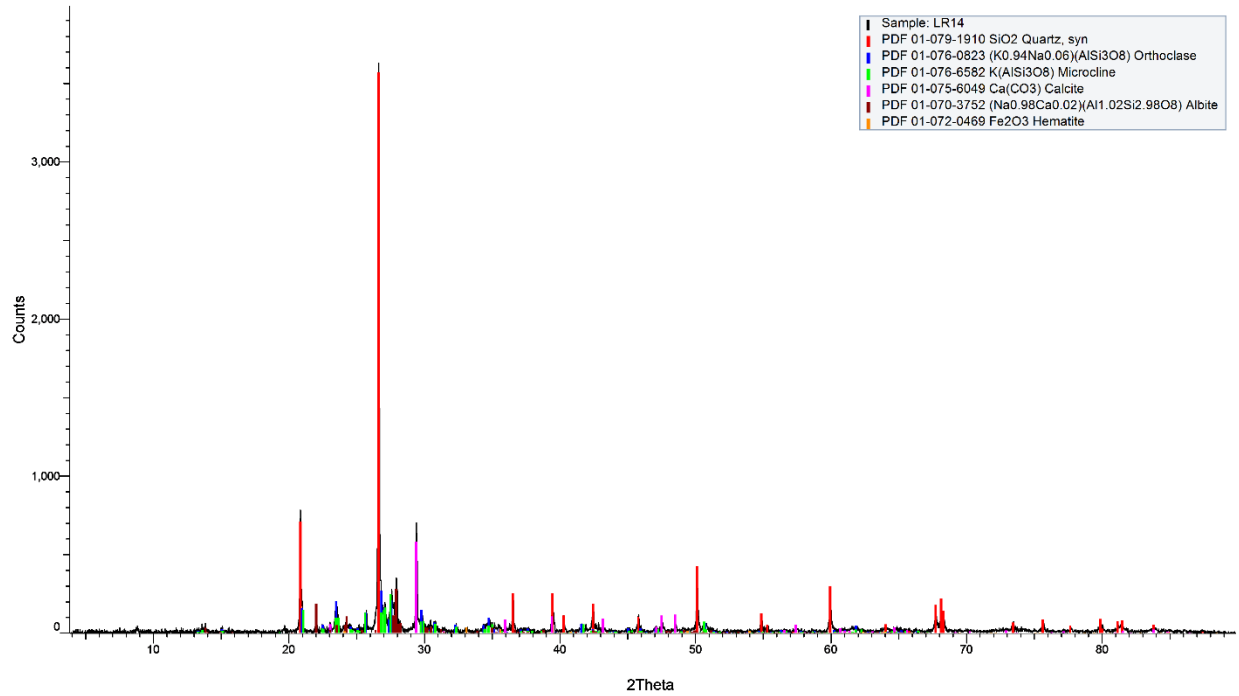


Ilustración 16. Difractograma de la muestra LR14 Ignimbrita Fm. Nazas.

Los minerales identificados bajo el Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) (Ilustración 17) para la muestra LR18, granodiorita, proveniente del poblado Dinamita, en Durango, son:

3. CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA Y MINERALÓGICA DE FUENTES GEOGÉNICAS
 Circón (ZrSiO_4), Ilmenita (TiO_3Fe), Feldespato Alcalino (KAlSi_3O_8), Biotita ($\text{K}(\text{Mg}, \text{Fe})_3(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$), Fluorapatito ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$), Hornblenda ($((\text{Ca}, \text{Na})_{2-3}(\text{Fe}, \text{Al})_5(\text{Al}, \text{Si})_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$), Cuarzo (SiO_2), Monacita enriquecida en torio ($((\text{Ce}, \text{La}, \text{Th})\text{PO}_4)$) y óxidos de hierro. El uranio se encontró dentro de la estructura de circones, sin embargo, debido a su poco porcentaje dentro del mismo (<3%), podría representar una interferencia de otro elemento.

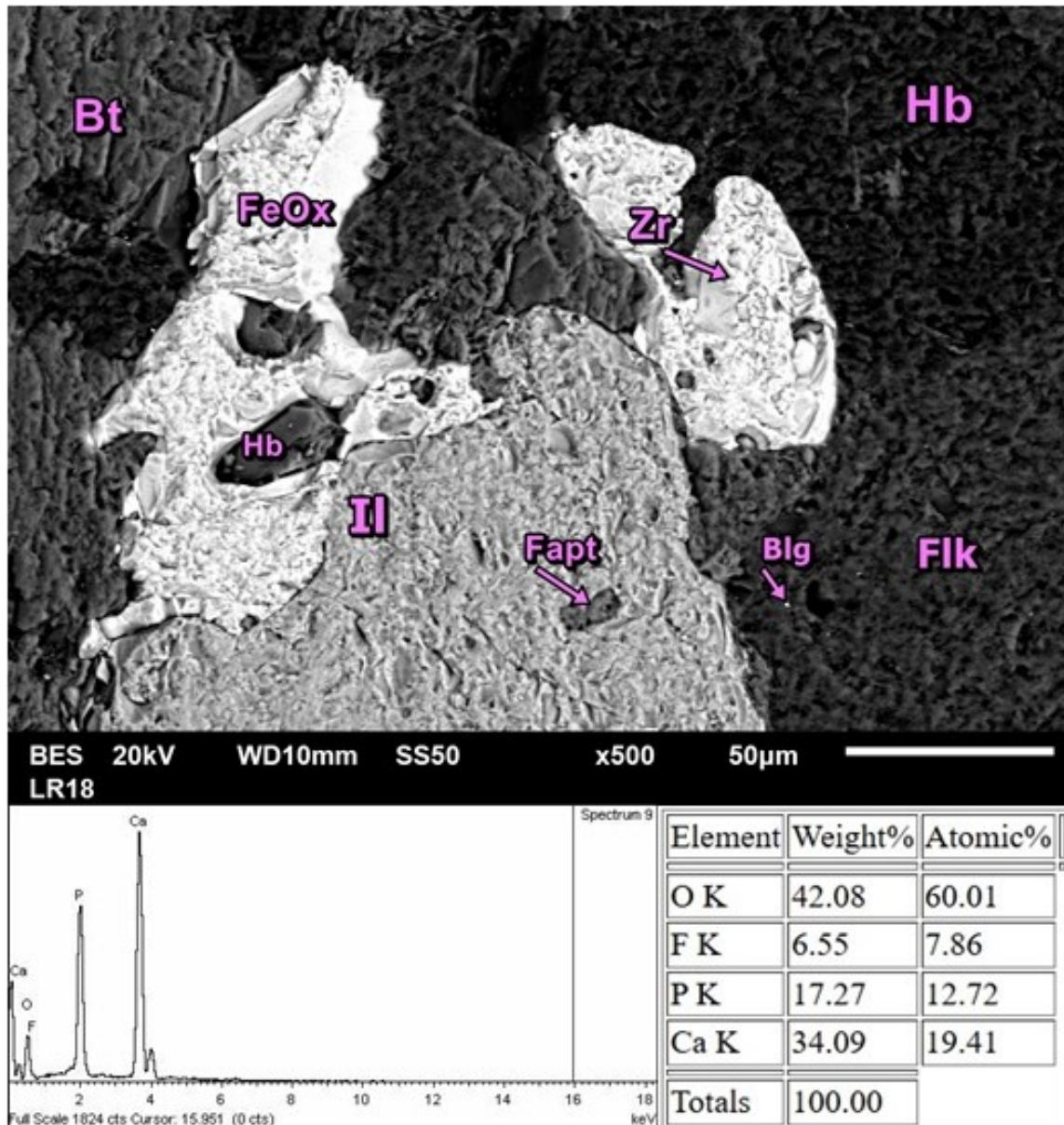


Ilustración 17. Muestra LR18, espectro y porcentaje de uno de los fluorapatitos que parecen diseminados en distintos tamaños en toda la matriz rocosa. Bt= biotita. FeOx= óxidos de hierro. Zr= circón. Hb= hornblenda. Il= ilmenita. Fapt= fluorapatito. Flk= feldespato alcalino y Blg= boulangerita.

La riolita con identificación LR20 riolita Vallecillos, presenta los siguientes minerales (Ilustración 18): Una matriz de Cuarzo (SiO_2) y Feldespato Alcalino (KAlSi_3O_8) con óxidos de

3. CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA Y MINERALÓGICA DE FUENTES GEOGÉNICAS
 hierro, Ilmenita empobrecida en Ti donde se reemplaza por Fe ((FeTiO₃)), Circón (ZrSiO₄), Chernovita, perteneciente al grupo de la Xenotima, donde el As sustituye al P (YAsO₄) también contiene en cantidades menores Ce y Nd. Los minerales portadores se encontraron dentro de los poros de la roca, por lo que algún otro mineral importante pudo haberse perdido al momento de la elaboración de la muestra, ya que se realizó un pulido con abrasivo de 80 a 1,000 y agua.

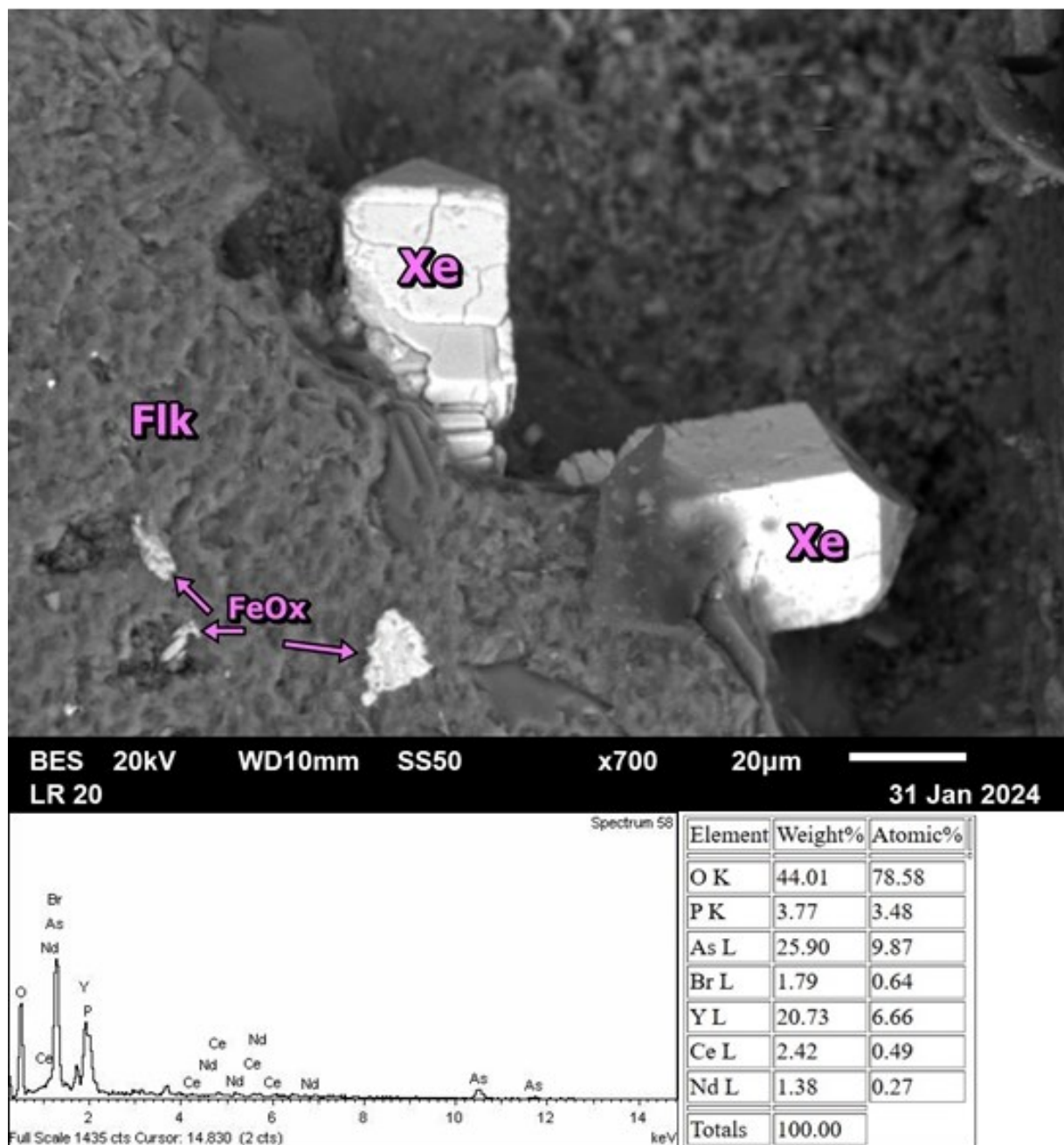


Ilustración 18. Cristales de Xenotima con As reemplazando el P. Flk= feldespato alcalino. FeOx= óxidos de hierro.
 Xe= xenotima.

En la muestra LR21 toba riolítica se pudieron identificar los siguientes minerales bajo MEB (Ilustración 19): Una matriz de calcita con cuarzo y feldespato alcalino (CaCO₃), (SiO₂) y (KAlSi₃O₈), Ilmenita con Ti reemplazada por Fe (FeTiO₃), óxidos de Cerio acompañados de Nb, Xenotima reemplazando el P por As (La, Ce, Nd, As)PO₄, Circón (ZrSiO₄) con Nb en su

3. CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA Y MINERALÓGICA DE FUENTES GEOGÉNICAS estructura, Monacita con As en su estructura ((Ce, La, Nd, As)PO₄), Wakefieldita del grupo de la Xenotima con As y demás variaciones del grupo (YVO₄) (As, Y, Ce, Nd). La xenotima se forma principalmente en rocas ígneas ácidas, metamórficas, vetas formadas por orogenias y en sedimentos como mineral detrítico, es mucho más dura que el circón, de manera similar, la monacita se forma en pegmatitas, rocas metamórficas y filones (Pellant 2010).

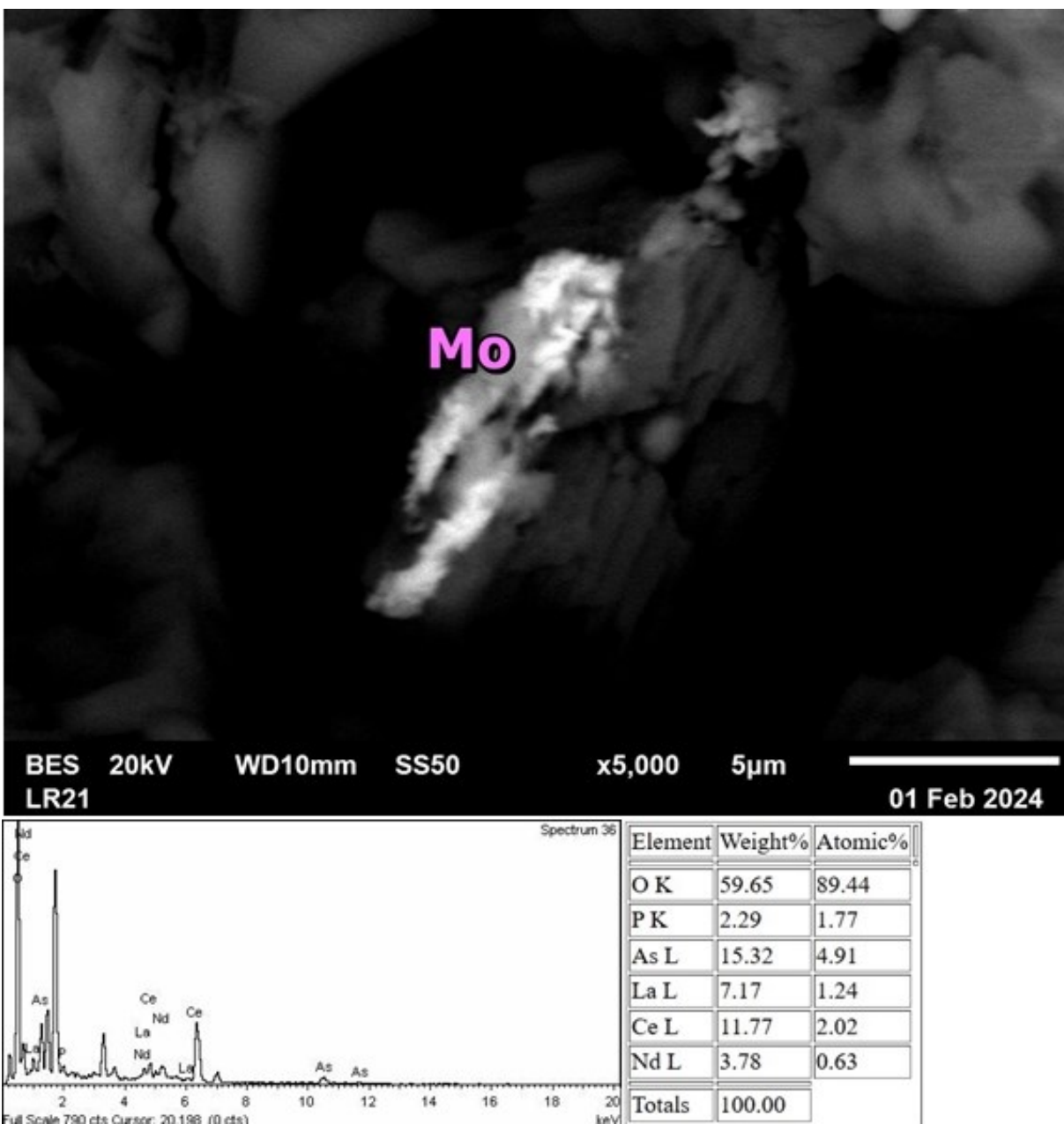


Ilustración 19. Monacita con As en su estructura cristalina. Mo= monacita.

4. ANÁLISIS HIDROGEOQUÍMICOS DE LOS SISTEMAS DE FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA

4. Análisis hidrogeoquímicos de los sistemas de flujo de agua subterránea

Los promedios de los resultados más relevantes y familias de agua se encuentran en el Tabla 6, para los resultados completos revisar los Anexos. Los diagramas de Stiff para las muestras de agua se encuentra en la Ilustración 20.

Tabla 6. Promedios de las variables presentes en las familias de agua.

Familia	As µg/L	F⁻ mg/L	U µg/L	T °C	pH	Cond µs/cm	TDS mg/L	OD mg/L	Alk
Sulfatada-Sódica	167.48	1.75	19.97	28.18	7.31	3904.35	1912.88	1.43	182.68
Sulfatada-Mixta	445.05	1.77	12.90	28.15	6.81	2098.28	1028.88	3.37	184.44
Bicarbonatada-Sódica	122.98	1.95	2.20	32.98	8.04	378.35	185.17	0.63	107.61
Mixta-Sódica	157.57	2.63	7.11	30.09	7.44	1444.36	706.27	1.77	190.85
Mixta-Cálcica	24.61	0.42	7.99	28.34	7.04	739.29	362.18	3.65	148.83
Bicarbonatada-Cálcica	30.41	0.70	7.87	26.71	6.86	615.67	301.60	4.61	205.71
Bicarbonatada-Mixta	50.57	0.52	3.31	29.86	7.17	469.00	229.60	5.80	139.68
Sulfatada-Cálcica	35.42	0.68	18.83	29.00	6.87	1840.07	896.93	2.96	153.51
Mixta-Mixta	38.17	1.65	6.57	26.87	6.86	1463.00	716.67		185.81

DIAGRAMAS DE STIFF PARA MUESTRAS DE AGUA

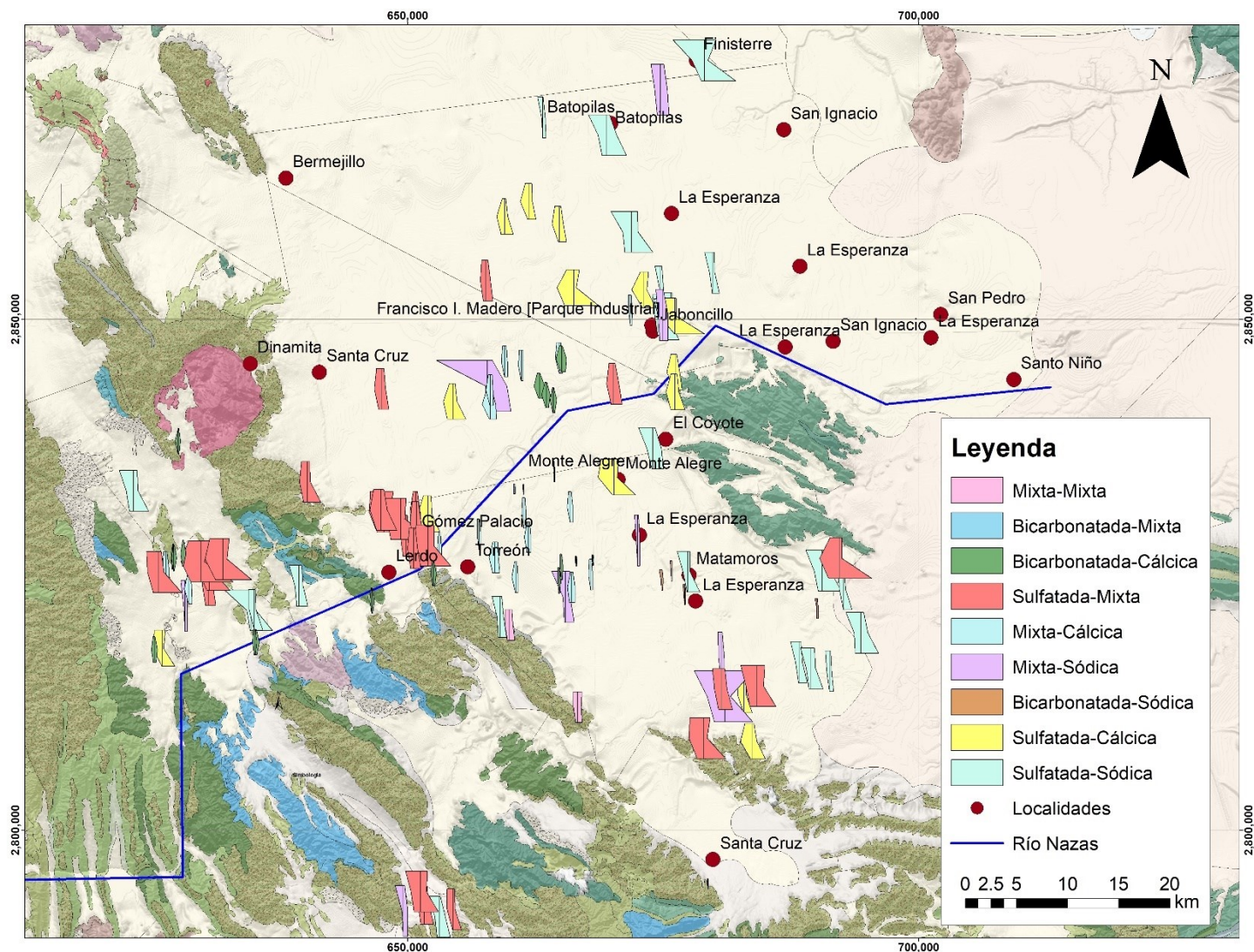


Ilustración 20. Diagramas de Stiff para las muestras de agua y su ubicación geográfica dentro del área de estudio.

4. ANÁLISIS HIDROGEOQUÍMICOS DE LOS SISTEMAS DE FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA

4.1. Familias de agua subterránea y calidad de agua

De los resultados anteriores, podemos agrupar en tres categorías principales a las familias de agua:

- HCO_3 , SO_4 , Mix-Na:
As 157.57 - 93.43 $\mu\text{g/L}$
 F^- 2.63 - 1.84 mg/L
U 13.51 - 2.20 $\mu\text{g/L}$
- SO_4 , Mix-Mix:
As 55.32 - 38.14 $\mu\text{g/L}$
 F^- 0.68 - 1.68 mg/L
U 13.30 - 3.31 $\mu\text{g/L}$
- HCO_3 , SO_4 , Mix-Ca:
As 35.42 - 24.61 $\mu\text{g/L}$
 F^- 0.70 - 0.42 mg/L
U 18.83 - 7.87 $\mu\text{g/L}$

El sulfato en el agua de la CL es una característica del lugar, se origina por las condiciones geológicas de la región en donde afloran desde el subsuelo las rocas sedimentarias de edad Mesozoica que contienen cantidades variables de yeso y anhidrita llegando a formar parte del material granular del suelo por procesos de intemperismo. Las diferencias en la composición del agua subterránea sugieren la presencia de distintos medios geológicos con características hidrogeoquímicas e hidrogeológicas diferentes y también diferentes sistemas de flujo subterráneo (Molina-Maldonado 2004).

Las mayores concentraciones de As, F^- y U se encuentran principalmente en las zonas de descarga como se aprecia en la Ilustración 21, aunque también se aprecian altas cantidades de As principalmente en agua y rocas en la zona de Vallecillos, esto apoya la hipótesis de que la interacción entre las rocas con elementos contaminantes y el agua repercute en la contaminación de la misma. En la Ilustración 22 se encuentra el diagrama de Piper para las muestras de agua recolectadas en la zona de estudio.

4. ANÁLISIS HIDROGEOQUÍMICOS DE LOS SISTEMAS DE FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA

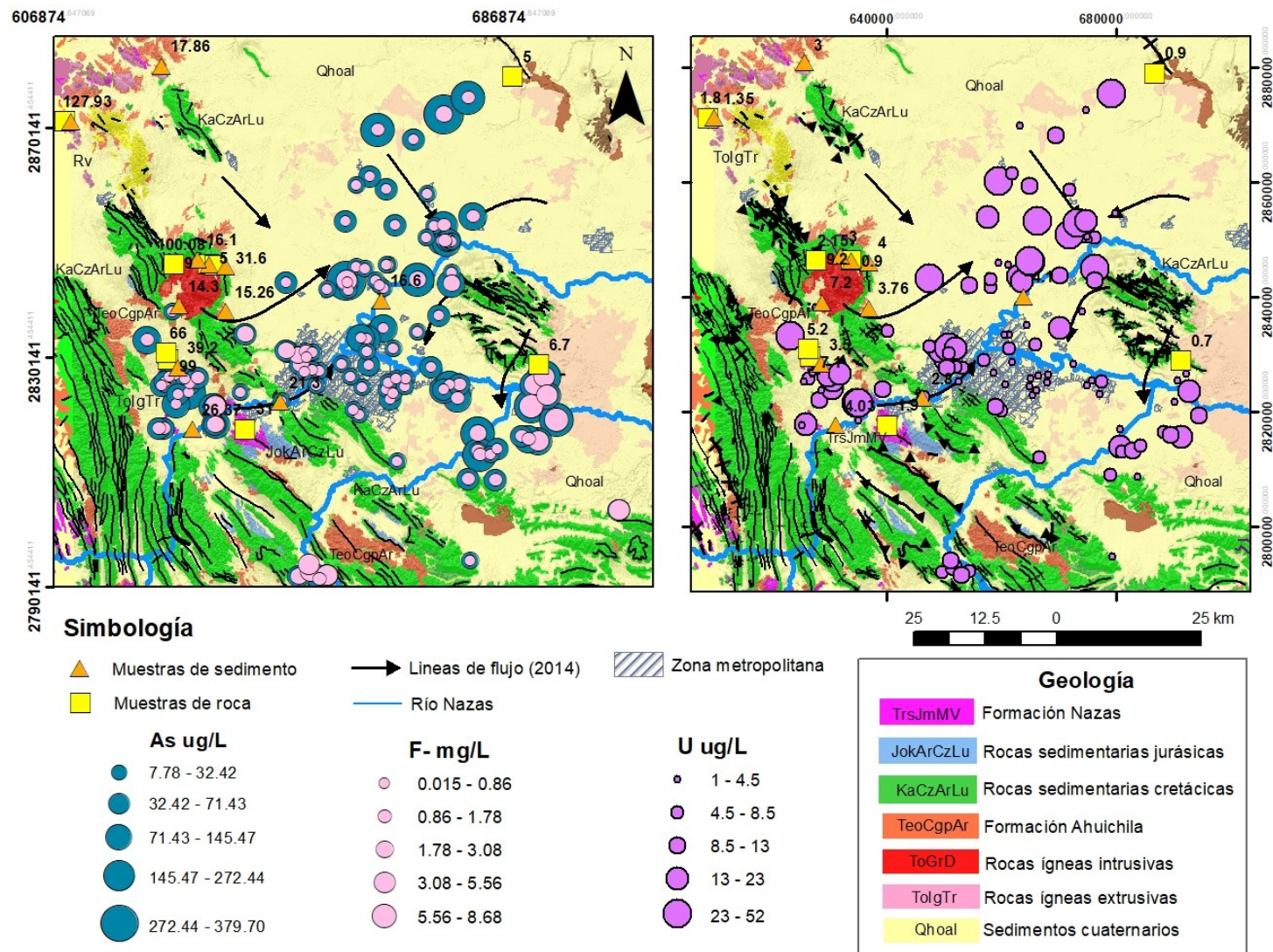


Ilustración 21. Ubicación de muestras con sus respectivas cantidades de contaminantes en agua y materia sólida.

4. ANÁLISIS HIDROGEOQUÍMICOS DE LOS SISTEMAS DE FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA

El estudio de (Brouste *et al.*, 1997) realizado en la CL, sugiere que tanto las facies hidrogeoquímicas como la mineralización del agua subterránea se explica por medio de los procesos de evaporación, aunque éste no sea el único proceso responsable del incremento de la salinidad en el agua. Resultados similares arrojan el estudio de (Gutiérrez-Ojeda 1995), donde apoyándose de modelación hidrogeoquímica, confirma la existencia de reacciones de vapor y lo asocia al incremento de arsénico en el agua; del mismo modo, (Ojeda y Flores 2004) y (Molina-Maldonado 2004) se basaron en resultados de isótopos para identificar la evaporación como un proceso de relevancia en la zona de estudio.

Analizando muestras de agua subterránea provenientes de un acuífero carbonatado y granular y de un acuitado arcilloso en la zona de Viesca en la CL, Ortega-Guerrero (2016) indica que el agua subterránea proviene de agua meteórica que llegó a los lagos y por medio de los cauces de los ríos Nazas-Aguanaval, además, señala que el agua paleolacustre sufrió una evaporación progresiva basándose en sus resultados por el enriquecimiento de $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ y patrones geoquímicos de los acuíferos que generaron aguas salinas ricas en As, llegando a reportar hasta 5000 $\mu\text{g/L}$ de As en paleoaguas subterráneas de más de 30 000 años. También, menciona que la adsorción en óxidos de hierro, superficies de minerales arcillosos y carbono orgánico limitaron la cantidad del As en aguas subterráneas, donde las aguas enriquecidas en este elemento y otros solutos, avanzan progresivamente desde los márgenes lacustres hacia el acuífero granular principal por la inversión de los gradientes hidráulicos que se originaron a raíz de la explotación intensiva de los acuíferos en la zona y a la reducción de la escorrentía de los ríos al interceptar sus causas en las presas que se construyeron; asegura, así, que la desorción del As seguirá aportando el contaminante a las aguas subterráneas, prolongando los problemas de salud a raíz de su consumo (Ortega-Guerrero 2017).

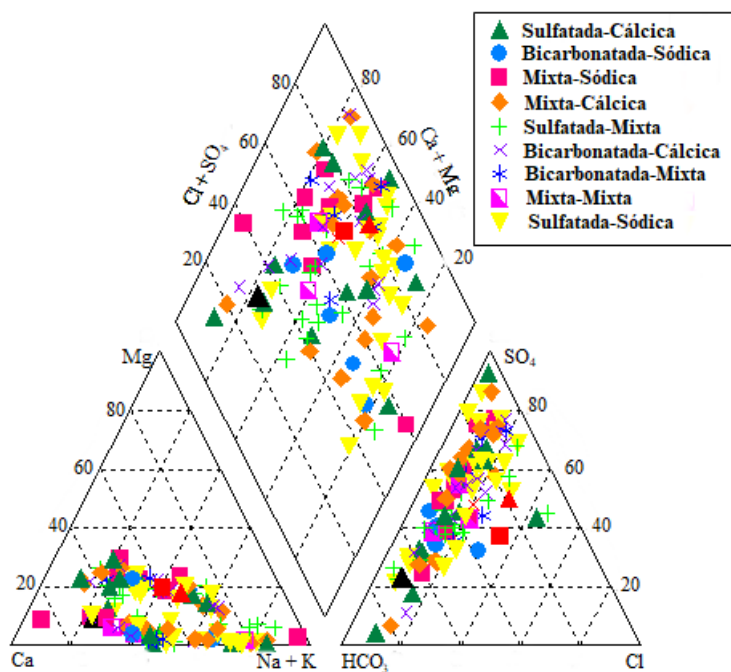


Ilustración 22. Diagrama de clasificación de Piper para aguas subterráneas caracterizadas en el presente estudio.

4. ANÁLISIS HIDROGEOQUÍMICOS DE LOS SISTEMAS DE FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA

4.2. Análisis estadístico de aguas

Se realizó una matriz de correlación con el programa SPSS utilizando las siguientes variables: temperatura de campo ($^{\circ}\text{C}$), pH de campo, conductividad eléctrica de campo ($\mu\text{S}/\text{cm}$), alcalinidad total de laboratorio ($\text{mg}/\text{L}-\text{CaCO}_3$), Cl (mg/L), SO_4 (mg/L), NO_3 (mg/L), F^- (mg/L), Na (mg/L), K (mg/L), Ca (mg/L), Mg (mg/L), Si (mg/L), B (mg/L), Li (mg/L), Mn (mg/L), Ge (mg/L), As (mg/L), Mo (mg/L), I (mg/L) y U (mg/L). Con los datos de $p\text{-valor} < 0.05$ se rechaza la hipótesis nula y existe suficiente evidencia estadística para afirmar que la percepción sobre el As , F^- y U está relacionado con las siguientes variables:

Se relacionan de forma positiva con el F^- el pH de campo, aunque muestra poca correlación, esta correlación baja también se presenta con el Cl , SO_4 , K , Mg y correlación baja negativa con NO_3 y Si ; con la conductividad eléctrica de campo muestra correlación media al igual que con la alcalinidad total, Na , Li y Mo . **La correlación alta se muestra entre el fluoruro y el B , el I y el As .**

En el caso del As , se muestra correlación baja positiva con la temperatura de campo, la conductividad eléctrica de campo, el Na , Li , Ge , Mo y relación baja negativa con el Ca ; una correlación media ocurre entre el arsénico y el pH de campo, así como B , I y correlación media negativa con el NO_3 ; por su parte, **la correlación alta solo se presenta con el F^- .**

Por último, el U muestra poca correlación con Cl , Mo y Ge (baja negativa). Se relaciona en grado medio con múltiples variables: conductividad eléctrica de campo, SO_4 , Na , K , Ca , Mg , Si , B , Li , Mn , I y correlación media negativa con la temperatura de campo y el pH de campo. **Las correlaciones altas para el uranio ocurren entre el elemento y la alcalinidad total y el NO_3 .** La tabla completa de correlaciones con sus coeficientes de correlación se muestra en el Tabla 7.

Para finalizar el análisis estadístico de las muestras de agua, se realizó un análisis de factores en el programa SPSS, el método utilizado fue componentes principales con una rotación varimax donde el porcentaje de varianza acumulado fue de 74.71 %. Se obtuvieron cuatro componentes donde se enlistan las variables pertenecientes a cada uno de ellos a continuación:

1. Conductividad de Campo, Cl^- , SO_4 , K , Ca , Mg , Li
2. F^- , Na , B , As , Mo , I
3. $^{\circ}\text{C}$, pH, Alk, NO_3 , Ge
4. Si , Mn , U

4. ANÁLISIS HIDROGEOQUÍMICOS DE LOS SISTEMAS DE FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA

Tabla 7. Matriz de correlaciones para parámetros en muestras de agua.

	T°C	pH	CE μS/cm	Alk mg/l- CaCO ₃	Cl mg/L	SO ₄ mg/L	NO ₃ mg/L	F ⁻ mg/L	Na mg/L	K mg/L	Ca mg/L	Mg mg/L	Si mg/L	B μg/L	Li μg/L	Mn μg/L	Ge μg/L	As μg/L	Mo μg/L	I μg/L	U μg/L
T°C	1	0.564	-0.098	-0.548	-0.128	-0.081	-0.538	0.033	-0.139	-0.307	-0.171	-0.183	-0.155	-0.210	-0.057	-0.039	0.605	0.256	-0.055	-0.086	-0.447
pH		1	-0.376	-0.435	-0.290	-0.351	-0.655	0.107	-0.066	-0.437	-0.600	-0.565	-0.021	-0.134	-0.095	0.040	0.641	0.451	0.134	0.084	-0.425
CE μS/cm			1	0.288	0.751	0.924	0.453	0.306	0.796	0.691	0.759	0.773	-0.014	0.684	0.643	0.247	-0.137	0.121	0.335	0.593	0.458
Alk mg/L				1	0.148	0.212	0.510	0.338	0.460	0.480	0.135	0.270	0.015	0.532	0.203	-0.046	-0.499	-0.047	0.405	0.276	0.578
Cl mg/L					1	0.634	0.302	0.286	0.631	0.770	0.588	0.652	-0.083	0.514	0.651	0.171	-0.165	0.027	0.246	0.478	0.250
SO ₄ mg/L						1	0.483	0.199	0.764	0.617	0.842	0.750	0.030	0.653	0.621	0.258	-0.053	0.057	0.335	0.551	0.484
NO ₃ mg/L							1	-0.107	0.308	0.478	0.582	0.542	0.061	0.348	0.237	0.026	-0.470	-0.320	0.079	0.104	0.559
F ⁻ mg/L								1	0.488	0.299	-0.061	0.133	-0.103	0.510	0.404	0.086	-0.049	0.549	0.419	0.530	0.060
Na mg/L									1	0.641	0.391	0.424	0.015	0.859	0.699	0.331	-0.043	0.277	0.610	0.775	0.465
K mg/L										1	0.528	0.702	-0.128	0.624	0.662	0.002	-0.334	-0.084	0.250	0.447	0.323
Ca mg/L											1	0.759	0.058	0.318	0.442	0.204	-0.161	-0.225	0.091	0.212	0.477
Mg mg/L												1	-0.162	0.479	0.360	-0.100	-0.377	-0.055	0.111	0.283	0.306
Si mg/L													1	-0.029	0.072	0.195	0.237	-0.004	-0.145	0.009	0.343
B μg/L														1	0.607	0.209	-0.147	0.332	0.556	0.771	0.465
Li μg/L															1	0.399	0.147	0.150	0.203	0.617	0.370
Mn μg/L																1	0.219	0.030	0.244	0.480	0.340
Ge μg/L																	1	0.267	-0.080	0.026	-0.165
As μg/L																		1	0.269	0.383	-0.086
Mo μg/L																			1	0.598	0.270
I μg/L																				1	0.326
U μg/L																					1

5. Origen y movilización de As, F y U a partir de rocas y sedimentos

Las extracciones secuenciales (SEP, por sus siglas en inglés) tienen múltiples campos de aplicación en la geología como lo son la geoquímica ambiental en medios acuáticos, edafología e hidrogeología subterránea porque representan, en la actualidad, la mejor aproximación para describir asociaciones geoquímicas de los elementos traza con las diferentes fracciones de los sólidos (López y Collado-Mandado 2002).

Se muestran a continuación tablas de porcentajes en donde se aprecia la cantidad de As, F⁻ y U que se liberó en cada una de las fases de extracción secuencial, que son las siguientes:

1. Solubles
2. Intercambio iónico
3. Ligado a carbonatos
4. Ligado a oxihidróxidos de Fe y Mn amorfos
5. Unidos a oxihidróxidos de Fe cristalinos
6. Ligado a fosfatos
7. Sílica amorfa/ vidrio
8. Fase residual

En la Ilustración 23 se aprecia que el As es liberado en dos fases principales: la fase número dos de intercambio iónico, arsenato por fosfato, promediando 63.18 mg/kg de As; en la fase de ligado a fosfatos se liberó 45.78 mg/kg del mismo elemento. A pesar de que la solubilidad de los fosfatos es baja (ej.: apatita, $K_{sp} = 10^{-60.6}$ Valsami-Jones 1998) y altamente inestable, su estructura se modifica significativamente por la sustitución acoplada de CO_3^{2-} , de esta manera, la solubilidad de un mineral aumenta considerablemente con el aumento de carbonatos (Jahnke 1984). Al analizar las gráficas, podemos destacar las muestras LR03, LR14, LR18 y LR21 en donde se movilizó por lo menos el 50% del Arsénico total que presentó la muestra, en el resto de las rocas, se mantiene retenido en la fase residual.

5. ORIGEN Y MOVILIZACIÓN DE AS, F- Y U A PARTIR DE ROCAS Y SEDIMENTOS

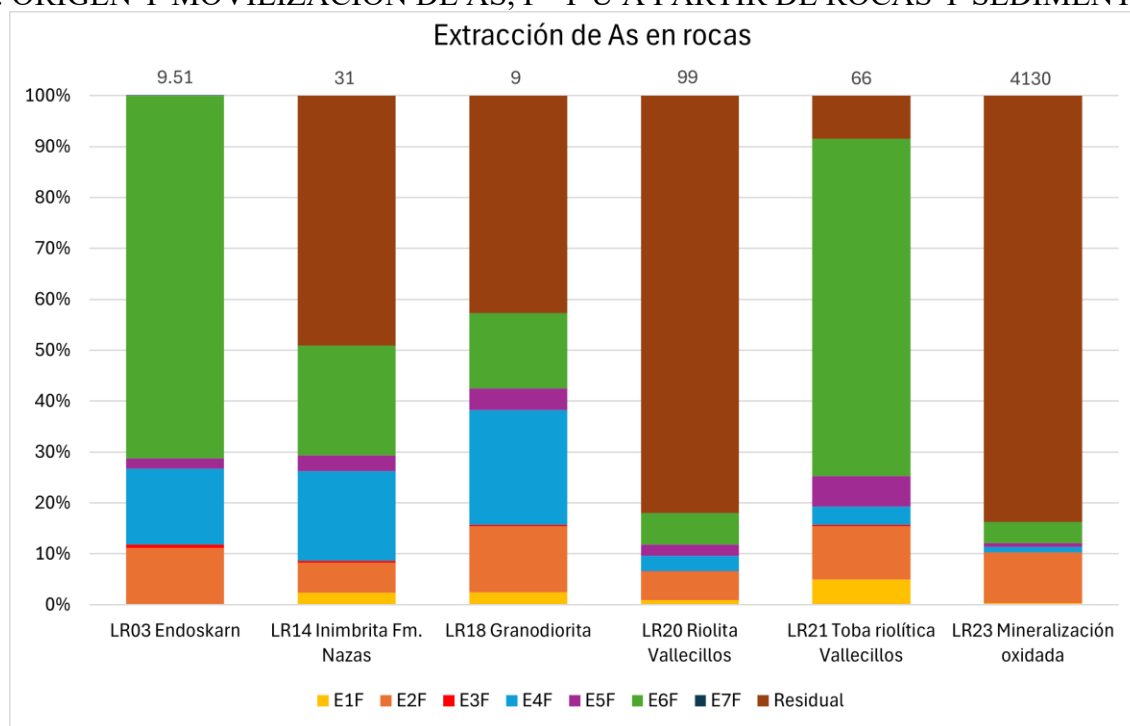


Ilustración 23. Gráfico de barras apiladas con porcentaje de movilización para resultados de extracciones secuenciales en As.

El F⁻ se encuentra unido a los oxihidróxidos de Fe cristalinos, fase cinco, con un valor de extracción promedio de 36.54 mg/kg, además de movilizarse en fase número siete, unido al vidrio, arrojando un promedio de 312.52 mg/kg (Ilustración 24). En porcentaje, la mayoría de las rocas muestran movilización del elemento de más del 50% a través de las siete fases, a excepción de la LR03 y LR23, en donde el fluoruro se mantuvo retenido en la fase residual en un 79 y 84%.

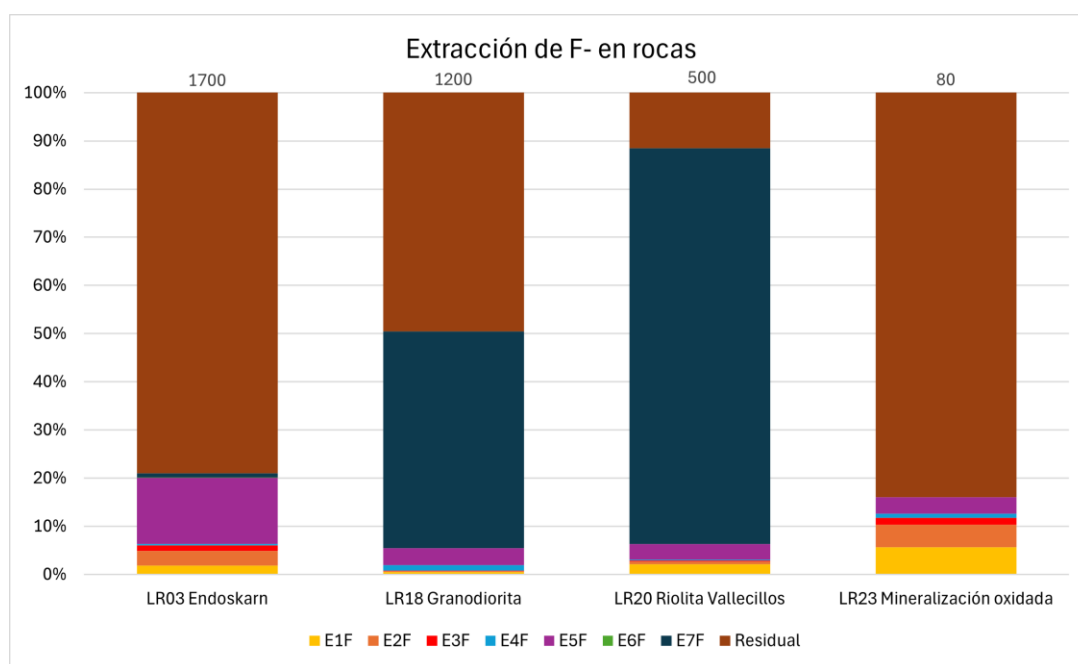


Ilustración 24. Gráfico de barras apiladas con porcentaje de movilización para resultados de extracciones secuenciales de F⁻ en rocas.

5. ORIGEN Y MOVILIZACIÓN DE AS, F- Y U A PARTIR DE ROCAS Y SEDIMENTOS

El U se encuentra unido a los oxihidróxidos de Fe y Mn amorfos según los resultados de las SEP, en donde la cantidad del elemento extraída en la fase cuatro es de 0.07 mg/kg, probablemente aprovechando la gran superficie de adsorción de los óxidos; también el U se encuentra ligado a la fase número cinco, en los fosfatos, con un valor extraído promedio de 0.46 mg/kg, es común encontrar U ligado a fases fosfatadas como la apatita, ya que es uno de los principales sedimentos uraníferos.

Por otro lado, la alteración secundaria provoca la oxidación del U, dándole mayor solubilidad y mayor movilidad a este elemento durante la meteorización de la roca parental (Banning y Rüde 2015). Aun así, en porcentaje, en todas las rocas el uranio se mantiene casi en su totalidad en la fase residual, liberándose muy poco de este elemento con las extracciones planteadas, tal como se aprecia en la Ilustración 25.

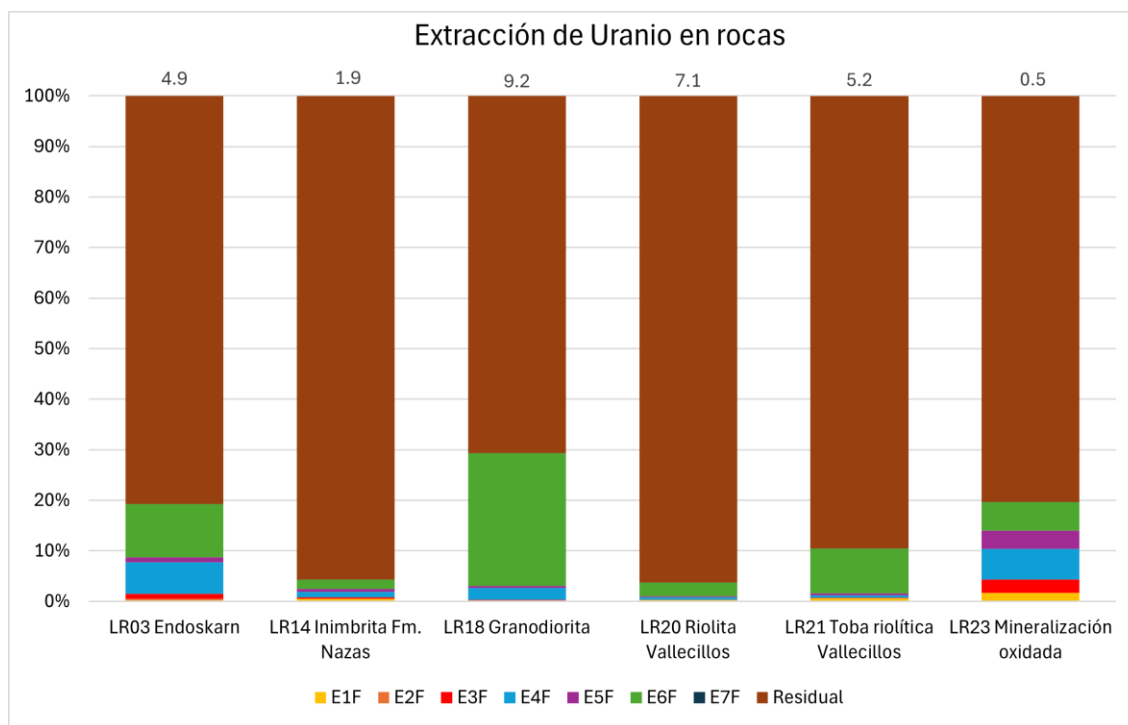


Ilustración 25. Gráfico de barras apiladas con porcentaje de movilización para resultados de extracciones secuenciales en rocas con uranio.

5. ORIGEN Y MOVILIZACIÓN DE AS, F- Y U A PARTIR DE ROCAS Y SEDIMENTOS

En el caso de los sedimentos, el As se moviliza principalmente en la fase soluble liberando en promedio 69.58 mg/kg de arsénico al agua, y, aun así, ninguno de los sedimentos liberó ni el 50% de la cantidad total que contenía, reteniéndolo en la fase residual, a excepción de la muestra LS08 (Ilustración 26).

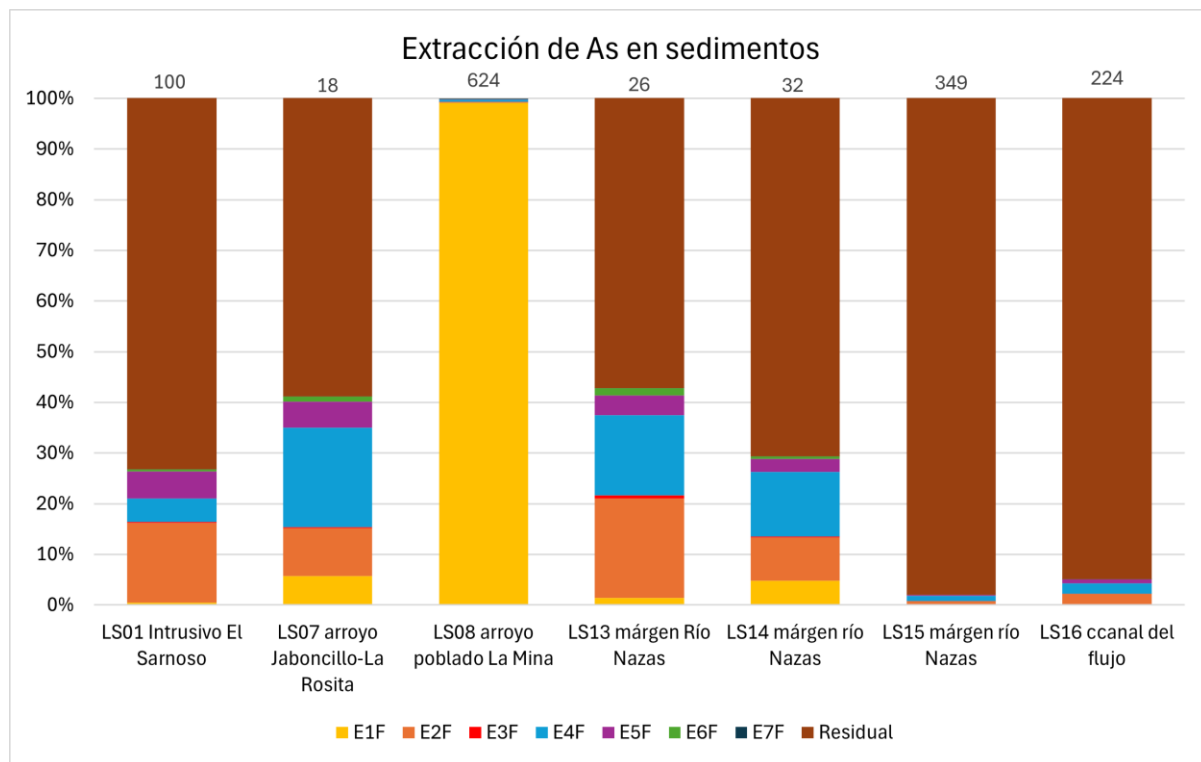


Ilustración 26. Gráfico de barras apiladas con porcentaje de movilización para resultados de extracciones secuenciales de As en sedimentos.

5. ORIGEN Y MOVILIZACIÓN DE AS, F- Y U A PARTIR DE ROCAS Y SEDIMENTOS

Continuando con los resultados para sedimentos, en este caso el F⁻ se moviliza principalmente con la fase número cinco, unido a los óxidos de Fe cristalinos con promedio de extracción de 57.11 mg/kg del elemento, y con valores similares para la fase uno (solubles) y siete (unido al vidrio) promediando 15.44 y 12.61 mg/kg de F respectivamente.

En cuanto a las muestras, la LS01 y LS15 sumaron un porcentaje del 57.87 y 74.5, el resto de los sedimentos retuvieron más de la mitad del fluoruro total en la fase residual, representado en la Ilustración 27.

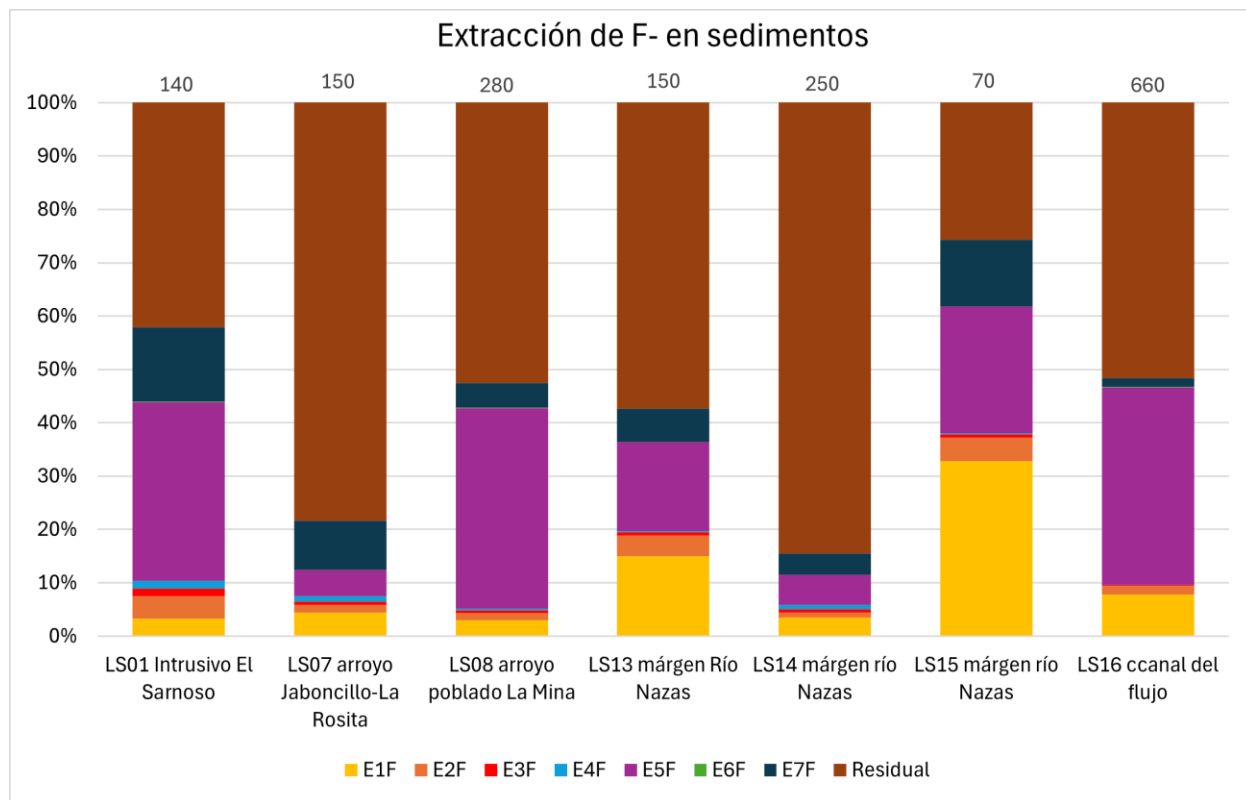


Ilustración 27. Gráfico de barras apiladas con porcentaje de movilización para resultados de extracciones secuenciales para el caso de F⁻ en sedimentos.

5. ORIGEN Y MOVILIZACIÓN DE AS, F- Y U A PARTIR DE ROCAS Y SEDIMENTOS

El U en sedimentos se moviliza hacia el agua del acuífero con la fase de carbonatos en donde se liberaron en promedio 0.26 mg/kg del elemento, aunque en porcentaje, todas las muestras retienen la mayor parte del uranio en sus fases residuales.

La muestra LR03 fue la que mostró mayor movilización del elemento con las fases de extracción propuestas para este trabajo, logrando liberar solo un 22% de la cantidad total del elemento (Ilustración 28). A pesar de la poca cantidad de literatura disponible alrededor de la movilización de U, el caso de dicho elemento ligado a fases carbonatadas es muy común, dado la similitud de radios iónicos de U(IV) y Ca(II) (Banning y Rude 2015).

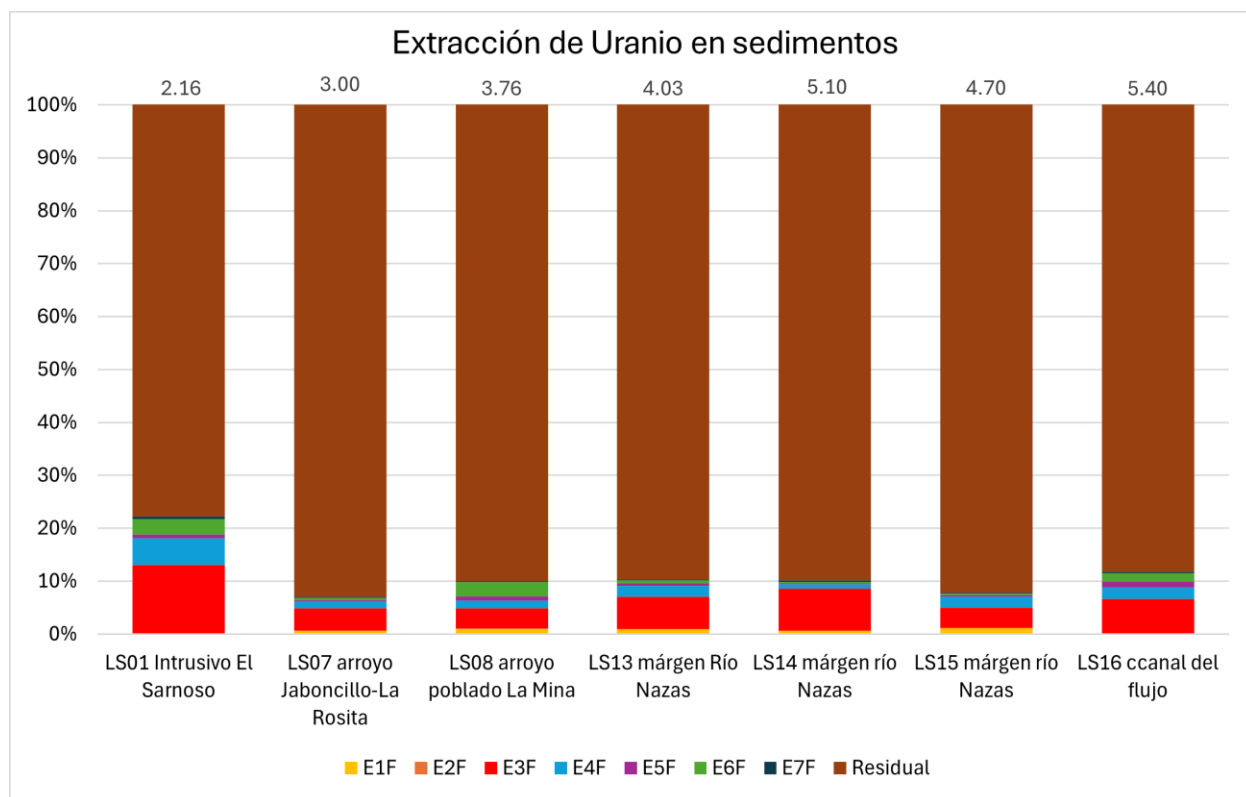


Ilustración 28. Gráfico de barras apiladas con porcentaje de movilización para resultados de extracciones secuenciales para U en sedimentos.

5. ORIGEN Y MOVILIZACIÓN DE AS, F- Y U A PARTIR DE ROCAS Y SEDIMENTOS

Se encuentra un caso especial para dos de las muestras de roca, ya que, al realizar la extracción secuencial, se registró que se extrae más cantidad de fluoruro que la que se supone contiene en su totalidad según los análisis de roca total, por lo que la suma de las fases se sustituye como el total, la Ilustración 29 muestra este comportamiento, en donde predomina la fase de sílica amorfa donde se extrae más del 90% del elemento.

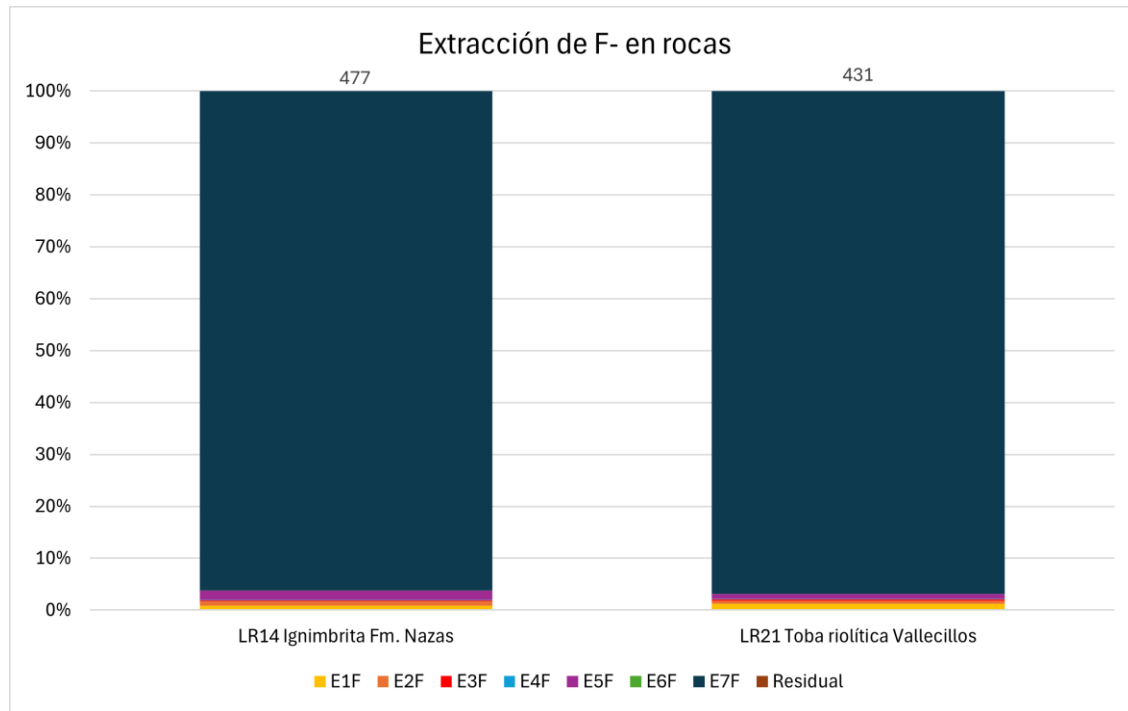


Ilustración 29. Gráfico para extracción de fluoruro en su totalidad en dos muestras de roca.

6. Discusión de resultados

En base a los resultados de roca total, podemos destacar que las riolitas de la localidad Vallecillos, Durango y la Ignimibrita perteneciente a la Fm. Nazas del mismo estado, son las principales portadoras de As, en cuanto a los sedimentos, se destaca el contenido de este elemento en la muestra LS01 cercana al intrusivo El Sarnoso y las que fueron recolectadas siguiendo el cauce del Río Nazas.

En el caso de F, la caliza de la Fm. Treviño (LR13) es la principal portadora del elemento, seguido por el intrusivo El Sarnoso (LR03) y la granodiorita del mismo sitio, siendo estas últimas las principales rocas portadoras de Uranio también, aunque las riolitas antes mencionadas también incluyen una cantidad considerable del elemento.

Con el análisis estadístico de agua podemos concluir que se relacionan positivamente de manera alta el As y F^- , negativa con poca correlación As y U, y que no se encontró correlación estadística significativa entre U y F^- .

La movilización de los contaminantes al acuífero se asocia a distintos procesos fisicoquímicos, tanto el As, F^- , U y cualquier otro soluto, deben su movilización al flujo del agua subterránea y a la interacción de ésta con el medio sólido (Cortina *et al.*, 2008). En el caso de las rocas de la zona de estudio, gracias a las pruebas de extracción secuencial, se logró encontrar que el As se moviliza por el proceso de arsenato por fosfato, en este proceso de intercambio iónico, una especie iónica que está presente en la fase acuosa se intercambia por un ion de su mismo signo presente en una fase mineral (intercambio aniónico en caso del As), esto ocurre debido a que, según la literatura, los aniones del sistema del fosfato comparten similitudes químicas con los del sistema del arsénico, en donde ambos grupos compiten por la complejación en los grupos activos en las superficies de los óxidos, ambos se pueden adsorber formando complejos de coordinación de esfera interna, cabe mencionar que el fosfato se adhiere mejor que el arsénico, sobre todo en óxidos de hierro y aluminio por lo que la adición de fosfato incrementa la liberación de As y su movilidad, y que este proceso puede aumentar en sitios donde se hace uso de fertilizantes (Cortina *et al.*, 2008). Existen otros factores que juegan un papel importante en la movilización, como lo son la concentración de dichos fosfatos, presencia de bicarbonato y/o silicato, el pH, tiempo de reacción (velocidades de desorción y lixiviación), entre otros.

De igual manera, la movilización del As se asocia a la fase de ligado a fosfatos, según la mineralogía descrita por medio del MEB, se encontraron como portadoras de As a los minerales monacita y xenotima, que comparten la misma estructura mineral de fosfatos, de ahí que se estén movilizando bajo este extractante. Estos dos (intercambio aniónico y disolución de fosfatos) representan los mecanismos principales de movilización de arsénico en la Comarca Lagunera en el caso de las rocas.

Para el caso del F en las rocas, el elemento se encontró solamente en los fluorapatitos, donde según las extracciones secuenciales, se moviliza con óxidos de Fe cristalinos, aunque se puede inferir que grandes cantidades de este elemento se encuentran en el vidrio volcánico de las rocas, dados los altos valores de F^- en la fase de sílica amorfa. Se moviliza con la fase de sílica amorfa dado que el F tiene tendencia a concentrarse en la fracción fluida del sistema de fundición

6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

disminuyendo mediante avanza la evolución geoquímica, por esto, el F presenta mayor afinidad por los fundidos silicatados, compartiendo la propiedad de elemento incompatible con los elementos de tierras raras en la cristalización fraccionada (aunque esta no es la única fuente, el F puede llegar a una roca como transferencia de volátiles o por diferenciación magmática) (Stecher 1998). Además, el elemento aprovechó la adsorción de los óxidos de Fe cristalinos para estar presente en la oxidación de las rocas y posteriormente movilizarse con los cambios de pH y redox dados en el acuífero.

Un caso especial es la roca LR13, perteneciente a la Fm. Treviño, esta presenta más de 2000 mg/kg de F según la geoquímica realizada, en la lámina delgada se logra apreciar principalmente una matriz mudstone con restos de fósiles. En un estudio realizado en el suroeste de Irán, se reportaron capas de fosfato compuestas de grainstone-packestone de fósforo con microfósiles, además de contenido de U y REE's, donde la mineralización de fosfato tiene componentes sin-genéticos, diagenéticos y epigenéticos; gracias a un análisis de correlación entre P_2O_5 y REE, U y otros elementos traza, se sugirió una sustitución catiónica en la fluorapatita carbonatada (francolita). Los fosfatos son depósitos sedimentarios que se formaron en periodos geológicos muy específicos, en bajas latitudes, cuencas vastas y poco profundas que eran tectónicamente estables, donde abundan la apatita sedimentaria amorfa y criptocristalina, así como fluorapatita carbonatada. Dichos depósitos varían en profundidad, ambiente de formación, mineralogía del fosfato, presencia de materia orgánica, condiciones químicas y redox, condiciones paleoclimáticas y meteorización, dicha variación de factores afectará la sustitución isomórfica y el intercambio catiónico con Ca^{2+} en la red de la francolita, de esta manera, en condiciones favorables, las REE, pero además también U, As, F, V, Mo, Se, Sr, Cd, Ag, Cr, Te y Zn pueden enriquecerse en la red de la francolita (Haddad *et al.*, 2023). Por esta razón, se plantea que las altas concentraciones de F que presenta la roca provienen de sedimentos ricos en el elemento que se encuentran relleno los huecos de los fósiles presentes en la matriz, sin embargo, se requieren más estudios y análisis del caso.

Por el otro lado, los óxidos de hierro son producto de la alteración de las rocas (se encuentran en forma de óxidos libres), donde los fosfatos pueden reemplazar al grupo hidroxilo de su estructura química, pudiendo impedir la cristalización del compuesto donde no se alcanzan las formas geométricas regulares. En general, el Fe presente en los minerales se puede liberar debido a la oxidación, transformación en Fe^{3+} , y movilización como Fe^{2+} . Dichos procesos se pueden dar en forma de hierro cristalizado, amorfo y de intercambio movable y asimilable, en el caso de las muestras de la zona de estudio y para el caso en particular del fluoruro, se asocian a óxidos de Fe cristalinos, donde los fosfatos entran a la estructura de los óxidos y se liberan mediante éstos se van oxidando (Acevedo-Sandoval *et al.*, 2004). El contacto con la fase líquida de los óxidos de hierro se le denomina grupos funcionales hidróxidos, las cargas controlan las características de absorción y adsorción. Las fases cristalinas presentan una menor área superficial que los amorfos. Además, los óxidos, hidróxidos y oxihidróxidos de Fe son capaces de adsorber metales traza y fosfatos (como es el caso de las muestras de la zona de estudio), donde se liberan posteriormente al agua del acuífero, aumentando este fenómeno mientras más se oxidan, más cambios de pH y condiciones redox presentes. En general, podemos concluir en que el fluoruro se encuentra presente en los fluorapatitos que se erosionaron para rellenar el valle el acuífero, también, el elemento puede llegar a ser adsorbido en los óxidos de Fe cristalinos, donde llega al agua subterránea gracias a procesos de oxidación principalmente donde ocurre la desorción del mismo.

El uranio se libera en la fase de oxihidróxidos de Fe y Mn amorfos debido a las condiciones oxidantes del medio, el uranio (VI) pudo haber formado compuestos con el oxígeno, como uranilo,

6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

presente en la muestra LR18 descrita bajo MEB, que a la vez interactúa y/o coprecipita con óxidos de Fe y Mn, a su vez, se moviliza con la fase de apatita, debido a su asociación positiva con los fosfatos, donde el uranio forma complejos estables.

En sedimentos, la movilización del As ocurre principalmente en la fase soluble, en donde agua con pH meteórico (5.5) es suficiente para movilizar el elemento hacia el acuífero, visto desde el punto de vista ambiental, esto representa un gran problema, ya que con la interacción agua/sedimento se disuelve el As liberándose al agua directamente, esto debido al estado de intemperismo de dicho sedimento y su nivel de oxidación, que potencializa su movilización. Similar ocurre con el fluoruro, movilizándose con el agua de lluvia, unido a los oxihidróxidos de Fe cristalinos, que se conoce su alta capacidad de sorción (Cortina *et al.*, 2008) y en la sílica amorfa, esto se ve influenciado por el valor de pH (13), ya que a valores mayores de 8.5 ocurre la desorción de minerales como consecuencia de la meteorización y el intercambio iónico, en este proceso, se liberan oxianiones como vandatos, fosfatos, uranilos, entre otros (Cortina *et al.*, 2008). La movilización de uranio en los sedimentos se asocia principalmente a la presencia de carbonatos, oxihidróxidos de Fe y Mn amorfos, esto se justifica tomando en cuenta que, en los ambientes sedimentarios de fondo marino o lagos, el uranio tiende a reducirse y coprecipitarse con óxidos, además, estudios han demostrado que la adsorción de U se ve afectada de forma significativa con los complejos de carbonatos (Gandhi *et al.*, 2022).

Los enriquecimientos de los elementos litófilos en la corteza continental son muy extremos y requieren de varios procesos de fusión, secuestrando cada vez más a los elementos que se cree que fueron extraídos del manto inferior de la Tierra. Con el movimiento de las placas tectónicas, se añade material del manto y calor de la corteza con actividad volcánica, además de reciclaje de la corteza (McSween *et al.*, 2003).

6.1 Modelo conceptual

Con la evidencia recabada de los análisis de roca total, microscopia electrónica de barrido, difracción de rayos X, petrografía y pruebas de extracciones secuenciales, se puede formular que la cristalización de los minerales portadores de As, F y U proviene de un magma tipo OIB en donde, por la predominancia de los elementos HREE's, sabemos que su origen es cortical superior ya que el diagrama de araña de los elementos muestra una anomalía negativa a Eu. Aquí, el proceso de cristalización fraccionada juega un papel fundamental: los REE's se comportan como elementos incompatibles concentrándose en la masa fundida "*melt*" donde posteriormente, cristalizan como monacita, xenotima (chernovita) y circones principalmente, llevando dichos REE's en su estructura junto con los elementos contaminantes de interés, estos minerales componen las riolitas, granodioritas e intrusivos de la zona, además de otras rocas félsicas que se forman con el residuo proveniente de la cristalización fraccionada (Mange y Wright 2007), el As es altamente móvil en los procesos endógenos ya sea que el medio sea ácido o alcalino, debido a su alto potencial iónico tiende a formar complejos y concentrarse en el magma residual y finalmente en la fase vapor supercrítica liberada.

Así mismo, la presencia de monacita y demás REE's se debe a la complejación que existe entre dichos elementos y los fluoruros, un ejemplo de esto se aprecia en la muestra LR18 donde se destaca la tendencia positiva en el contenido de fluorapatita y monacita con REE's en su estructura, los complejos de fluoruros desempeñan un rol importante en el transporte de REE's, se requieren complejos acuosos fuertes. Otro de los minerales clave son los circones, encontrados en

6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

casi todas las muestras portadoras, destacando la LR03, cuya estructura se compone de tierras raras y uranio, relacionadas al alto contenido de SiO₂ que aumenta en la roca huésped, yendo de carbonatita a pegmatita granítica derivada de un fraccionamiento mineral.

Además, dichos elementos se categorizan como litófilos, por lo que, en parte, se encuentran formando óxidos minerales (ej.: óxido de Ce presente en la muestra LR21) en fosfatos y arsenatos, potenciando la adsorción de los contaminantes en su superficie.

En cuanto a la metalogenia, podemos mencionar que las rocas ignimbríticas tienen una edad pre-oxfordiana (165 ± 3 Ma U-Pb, circón o 220 Ma Pb-a) dando origen a la Fm. Nazas que es una secuencia volcanogenética y depósitos clásticos, representando un arco magmático cordillerano ubicado al sur de la traza propuesta de la megafalla Mojave-Sonora en el NE de México, de componente lateral izquierdo pre-oxfordiano en la zona.

Toda esta actividad volcánica formó parte de un arco Triásico-Jurásico relacionado con el margen continental activo de América del Norte occidental y la subducción de la placa Kula (Barboza-Gudiño *et al.*, 1998). Dicho fallamiento presente propició la argilitización, cloritización y otras evidencias de origen hidrotermal que se pueden apreciar en las secciones delgadas de las rocas, así como la formación de minerales secundarios como clorita que reemplaza hornblendas y/o biotitas y sericitas reemplazando feldespatos, además de contar con pulsos magmáticos mucho más jóvenes en la zona, como la Orogenia Nevadina, Orogenia Laramídica y otra más ocurrida en el terciario medio, esta última es la responsable de las rocas ígneas ácidas de la zona y los minerales asociados a ella (Damon *et al.*, 1981).

Fluorapatito, monacita, xenotima (chernovita) y circones son los principales minerales portadores de As, F⁻ y U encontrados en este trabajo; donde la meteorización de la riolitas, granodioritas, ignimbritas e intrusivos, rocas que los componen, se erosionaron relleno el valle del acuífero en forma de sedimentos, logrando una interacción entre la matriz sólida y el agua. Aquí, los elementos quedan disponibles en el agua subterránea del acuífero por distintos procesos: por la disolución de los minerales a distintos grados de pH, liberados por cambios en el potencial redox a la hora del bombeo del acuífero, por desorción de óxidos amorfos de Fe y Mn donde anteriormente se adsorbieron los contaminantes, además, por intercambio iónico reemplazando el arsenato por fosfato.

6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

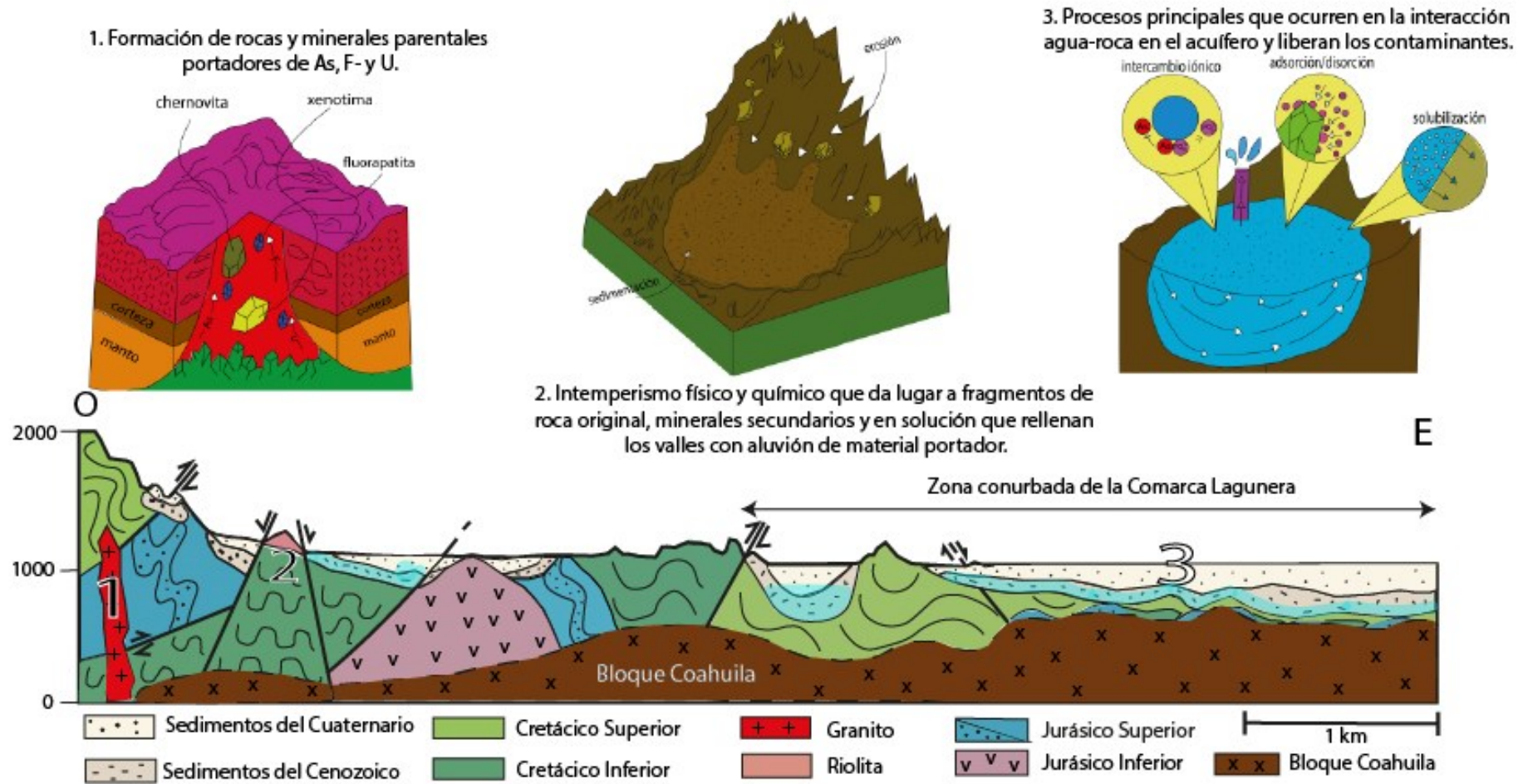


Ilustración 30. Modelo conceptual propuesto para la formación y movilización de contaminantes en el agua subterránea de la Comarca Lagunera. Flores-Salinas y Bandin-Tello, 2024.

6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.2. Conclusiones y recomendaciones

1. Se acepta la hipótesis propuesta al haber caracterizado las rocas ígneas félsicas y haber encontrado presencia de los elementos de interés en ellas, señalando como portadores principales a las xenotimas (chernovitas), monacitas y circones como fuentes geogénicas de contaminación en el agua subterránea de la CL. Sin embargo, altas concentraciones de F también se encuentran en las rocas sedimentarias de la zona. De esta manera se concluye que hay multifuentes de As, F⁻ y U en la zona, donde también factores como evaporación, uso de fertilizantes, aprovechamiento intensivo del acuífero, entre otros, seguramente potencian su movilización hacia el agua.
2. Los mecanismos principales de movilización hacia el acuífero se deben a la alta solubilidad del material, su adsorción y desorción en óxidos de Fe y/o Mn cristalinos y/o amorfos, ligados a los fosfatos, aumento en la solubilidad de U por adición de carbonatos y la alteración del vidrio en las rocas.
3. Se pudo observar en las gráficas de resultados para las extracciones secuenciales, que gran parte del elemento de interés se quedó en la fase residual, por lo que no logró ser extraída en su totalidad con los siete pasos propuestos, por lo que se sugiere seguir una metodología distinta, aplicada específicamente en rocas ígneas félsicas y los demás tipos de muestras para que los resultados sean mucho más confiables.
4. En la muestra LR13, la caliza de la Fm. Treviño presenta alto contenido de fluoruro (>2000 mg/kg de F), por lo que requiere ser caracterizada a detalle. En la lámina delgada analizada se encontró gran cantidad de fósiles como miliólidos, braquiópodos, entre otros. Se ha documentado la presencia de flúor e itrio dentro de la estructura de apatito de origen post-sedimentario en donde su enriquecimiento es controlado por la presencia del elemento, tiempo de sedimentación y las condiciones del ambiente, además, otros minerales como el arsénico, bario, plomo, torio, uranio y elementos de tierras raras se han encontrado en huesos fósiles, aún sin ser estudiados en su totalidad (Parker y Toots 1970).
5. Con la petrografía se encontraron importantes alteraciones hidrotermales y mezclas de magmas evidenciadas en la variabilidad de texturas, por lo que estos procesos geológicos ayudaron en el emplazamiento de los elementos contaminantes en las rocas, aprovechando zonas de alteración principalmente.
6. El mayor porcentaje de la mineralogía presente en las rocas y sedimentos es típico de rocas félsicas, aunque también se visualiza, en la mayoría de las muestras, la presencia de óxidos de hierro, estos fungen como adsorbentes de los contaminantes en las rocas y sedimentos.
7. El grupo de familias de agua HCO₃, SO₄ y Mix-Na presentan las mayores cantidades de As, promediando 157.57 µg/L, 2.63 mg/L de F y 2.20 µg/L de U.
8. Las mayores concentraciones de As, F⁻ y U se encuentran principalmente en las zonas de descarga, aunque también se aprecian altas cantidades de As principalmente en agua y

6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

rocas en la zona de Vallecillos, esto apoya la hipótesis de que la interacción entre las rocas con elementos contaminantes y el agua repercute en la contaminación de la misma.

9. En cuanto a los análisis estadísticos, una correlación alta se muestra entre el F^- y el B, el I y el As. En As la correlación alta solo se presenta con el F^- y las correlaciones altas para el U ocurren entre el elemento y la alcalinidad total y el NO_3 .
10. El modelo conceptual propone una formación de los minerales portadores bajo cristalización fraccionada, donde posteriormente el material rico en As, F y U se meteorizó rellenando el valle de la CL, con este material parental se formó parte el acuífero principal que abastece de agua a la población, la interacción del líquido con el material sólido contaminado, aunado a cambios de pH y redox principalmente, logrando que los elementos disponible se movilicen hacia el agua del acuífero, generando los altos valores de As, F^- y U en el agua subterránea de la zona.
11. La clave para lograr una eficiente distribución de las aguas subterráneas reside en identificar las áreas y mecanismos que facilitan la entrada de compuestos indeseables en el flujo de agua y a la vez desarrollar predicciones fiables del transporte de contaminantes (Cortina *et al.*, 2008) como lo son las redes de monitoreo. Para lograr predicciones eficientes se requiere de contar con toda la información posible sobre el sistema de flujo de agua subterránea y el medio con el que interactúa, por lo que contar con una base de datos clara, suficiente y actualizada del tipo de rocas, sedimento y la geoquímica de estos y movilidad, así como la del agua que compone al acuífero (tanto química como velocidad y dirección de flujo), es de vital importancia para comprender y mantener al margen el nivel de contaminantes presentes en el acuífero de la Comarca Lagunera, por lo que se recomienda la creación y seguimiento a redes de monitoreo. Además, se recomienda la perforación de nuevos pozos de agua subterránea que abastecerán a la población Lagunera en zonas altas, ya que el relleno del valle cuenta con material rico en contaminantes. Algunas opciones podrían ser las formaciones sedimentarias como la Fm. Indidura, Aurora o Cúpido, sin embargo, se requieren, de estudios geofísicos y de prospección de agua para asegurar el recurso dentro de los poros de las formaciones y las capacidades de porosidad y permeabilidad de las mismas. Sabiendo que el aprovechamiento intensivo del acuífero principal modifica las condiciones de pH y potencial redox principalmente, cambios que son necesarios para la liberación de los contaminantes en el agua, se exhorta a seguir promoviendo el cuidado del agua, así como revisar las concesiones con las que cuentan las empresas en la zona de estudio, todo con el fin de disminuir el bombeo y anudado a esto, la liberación de As, F^- y U al agua que funge como vital líquido para las personas de la CL.

Referencias

- Abdullin, F., Solé, J., y Solari, L. (2014). Datación mediante trazas de fisión y análisis multielemental con LA-ICP-MS del fluorapatito de Cerro de Mercado (Durango, México). *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 31(3), 395-406.
- Acevedo-Sandoval, O., Ortiz-Hernández, E., Cruz-Sánchez, M., y Cruz-Chávez, E. (2004). El papel de óxidos de hierro en suelos. *Terra Latinoamericana*, 22(4), 485-497.
- Al Lawati, W. M., Jean, J.-S., Kulp, T. R., Lee, M.-K., Polya, D. A., Liu, C.-C., y Van Dongen, B. E. (2013). Characterisation of organic matter associated with groundwater arsenic in reducing aquifers of southwestern Taiwan. *Journal of Hazardous Materials*, 262, 970-979.
- Alarcón-Herrera, M. T., Montenegro Flores, I., Navar Romero, P., Domínguez Martín, I., y Vázquez Trejo, R. (2001). Contenido de arsénico en el agua potable del valle del Guadiana, México. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 16(4), 63-70.
- Altamirano, M., & Delgado, V. (2019). Contaminación natural por arsénico en las aguas subterráneas de la comunidad rural “La Fuente”, para sugerir y promover el uso de fuentes alternativas de agua segura municipio La Paz Centro, León, Nicaragua. *Revista Torreón Universitario*, 8(23), 58-72.
- Alvarado, H. G. H., Robledo, A. del C. E., y Pérez, J. A. M. (2022). Hidroarsenicismo. Un acercamiento a su significado en localidades emblemáticas del norte de México. *Transdisciplinar. Revista de Ciencias Sociales Del CEH*, 2(3), 64-97.
- Apambire, W. B., Boyle, D. R., y Michel, F. A. (1997). Geochemistry, genesis, and health implications of fluoriferous groundwaters in the upper regions of Ghana. *Environmental geology*, 33, 13-24.
- Aparicio González, J. C. (2018). *Estudio geohidrológico del acuífero principal de la Comarca Lagunera, Estados de Durango y Coahuila*.
- Aparicio Mijares, F. J. (1993). *Fundamentos de Hidrología de Superficie México*. Editorial Limusa.
- Armienta, M. A. (1989). Diferenciación de la contaminación inorgánica en las aguas subterráneas del valle de la ciudad de San Luis Potosí. *Geofísica Internacional*, 28(4), 763-783.
- Armienta, M. A., Finkelman, R. B., y Rubio Arias, H. (2013). *Medical geology: its relevance to Mexico. TecnoCiencia Chihuahua*, VII, 3, 152-162.
- Armienta, M. A., Villaseñor, G., Rodríguez, R., Ongley, L. K., y Mango, H. (2001). The role of arsenic-bearing rocks in groundwater pollution at Zimapán Valley, México. *Environmental geology*, 40, 571-581.
- Armienta, N., M. A. y Segovia. (2008). Arsenic and fluoride in the groundwater of Mexico. *Environmental Geochemistry and Health*, 30, 345-353.
- Banning, A. (2021). Geogenic arsenic and uranium in Germany: Large-scale distribution control in sediments and groundwater. *Journal of Hazardous Materials*, 405, 124186.
- Banning, A., y Råde, T. R. (2015). Apatite weathering as a geological driver of high uranium concentrations in groundwater. *Applied Geochemistry*, 59, 139-146.
- Banning, A., Cardona-Benavides, A., y Råde, T. R. (2012). Uranium and arsenic dynamics in volcano-sedimentary basins--An exemplary study in North-Central Mexico. *Applied Geochemistry*, 27(11), 2160-2172.
- Banks, D., Markland, H., Smith, P.V., Mendez, C., Rodríguez, J., Huerta, A., Sæther, O.M. 2004. Distribution, salinity and pH dependence of elements in surface waters of the catchment areas of

REFERENCIAS

- the Salars of Coipasa and Uyuni, Bolivian Altiplano, *Journal of Geochemical Exploration* 84 141–166.
- Barboza-Gudiño, J. R., Tristán-González, M., y Torres-Hernández, J. R. (1998). Dictamen geológico sobre asentamientos del terreno en los fraccionamientos Aeropuerto. *San Ángel y Valle de los Cedros: Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Instituto de Geología, reporte no publicado*.
- Barnes, C. G., y Prestvik, T. (2000). Conditions of pluton emplacement and anatexis in the Caledonian Bindal Batholith, north-central Norway. *Norsk Geologisk Tidsskrift*, 80(4), 259-274.
- Barrera-Prieto, Y., Espino-Valdés, M. S., y Herrera-Peraza, E. (2009). Presencia de arsénico en la sección norte del acuífero Meoqui-Delicias del estado de Chihuahua, México: Arsenic presence in North section of Meoqui-Delicias aquifer of State of Chihuahua, Mexico. *Tecnociencia Chihuahua*, 3(1), 8-18.
- Bautista Tomas, L. (2010). *Concentraciones de arsénico en leche cruda de establos de la Comarca Lagunera*. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.
- Benavente, D., Cañaveras, J. C., Martínez-Martínez, J., Cervera, M. C. M., García, M. Á. R., y Ordóñez, S. (2012). Identificación de minerales mediante difracción de rayos X utilizando bases de datos online de libre acceso. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 20(3), 280-280.
- Birkle, B., P. y Merkel. (2000). Environmental impact by spill of geothermal fluids at the geothermal field of Los Azufres, Michoacán, Mexico. *Water, Air, and Soil Pollution*, 124, 371–410.
- Borgoño, J. M., Vicent, P., Venturino, H., y Infante, A. (1977). Arsenic in the drinking water of the city of Antofagasta: epidemiological and clinical study before and after the installation of a treatment plant. *Environmental Health Perspectives*, 19, 103–105.
- Brahman, K. D., Kazi, T. G., Afridi, H. I., Naseem, S., Arain, S. S., Wadhwa, S. K., y Shah, F. (2013). Simultaneously evaluate the toxic levels of fluoride and arsenic species in underground water of Tharparkar and possible contaminant sources: a multivariate study. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 89, 95–107.
- Briceño Polo, A. (2019). Contaminación geogénica en las aguas subterráneas de España. Universidad de Alcalá, Facultad de Ciencias Ambientales. Tesis de maestría.
- Brindha, L., K. y Elango. (2011). Fluoride in groundwater: causes, implications and mitigation measures. *Fluoride Properties, Applications and Environmental Management*, 1, 111–136.
- Brouste, L., Marlin, C., y Dever, L. (1997). Geochemistry and residence time estimation of groundwater from the upper aquifer of the Chihuahua desert (Comarca Lagunera, Northern Mexico). *Applied Geochemistry*, 12(6), 775-786.
- Bundschuh, J., Pérez Carrera, A., y Litter, M. (2008). Distribución del arsénico en las regiones ibérica e iberoamericana. *Editado por CYTED Impreso en Argentina*.
- Camacho, L. M., Gutiérrez, M., Alarcón-Herrera, M. T., de Lourdes Villalba, M., y Deng, S. (2011). Occurrence and treatment of arsenic in groundwater and soil in northern Mexico and southwestern USA. *Chemosphere*, 83(3), 211-225. (2011). *Chemosphere*, 83(3), 211–225.
- Cardona, A., Carrillo, J. J., y Hernández, M. A. A. (1993). Elemento traza: contaminación y valores de fondo en aguas subterráneas de San Luis Potosí, SLP, México. *Geofísica Internacional*, 32(2), 277-286.
- Carrillo-Chávez, A., Drever, J. I., y Martínez, M. (2000). Arsenic content and groundwater geochemistry of the San Antonio-El Triunfo, Carrizal and Los Planes aquifers in southernmost Baja California, Mexico. *Environmental Geology*, 39, 1295-1303.
- Carrillo-Rivera, J. J., Cardona, A., y Edmunds, W. M. (2002). Use of abstraction regime and knowledge of hydrogeological conditions to control high-fluoride concentration in abstracted groundwater: San Luis Potosí basin, Mexico. *Journal of hydrology*, 261(1-4), 24-47.

REFERENCIAS

- Castellano-Alvarado, L., Viniegra, G., y Eslava-García, R. (1964). El arsenicismo en la Comarca Lagunera. *Salud Pública de México*, 6(3), 373_385-373_385.
- Castro-Larragoitia, J., Kramar, U., y Puchelt, H. (1997). 200 years of mining activities at La Paz/San Luis Potosí/Mexico—Consequences for environment and geochemical exploration. *Journal of Geochemical Exploration*, 58(1), 81-91.
- Cervantes, M. C., y Franco, A. M. (2006). Diagnóstico ambiental de la Comarca Lagunera. In *Á. López López y R. Carmona Mares (Presidencia), Foro Interdisciplinario sobre la Comarca Lagunera. Simposio llevado a cabo en la sede de la Sociedad Mexicana de Geografía y Estadística, Ciudad de México, México.*
- Chowdhury, U. K., Biswas, B. K., Chowdhury, T. R., Samanta, G., Mandal, B. K., Basu, G. C., ... Others. (2000). Groundwater arsenic contamination in Bangladesh and West Bengal, India. *Environmental Health Perspectives*, 108(5), 393–397.
- Coats, R. R., Goss, W. D., y Rader, L. F. (1963). Distribution of fluorine in unaltered silicic volcanic rocks of the western conterminous United States. *Economic Geology*, 58(6), 941–951.
- CONAGUA. Comisión Nacional del Agua. (1999). *Estudio de la simulación hidrodinámica de los acuíferos de la Comarca Lagunera, Coahuila y Durango y de la Cuenca Alta del Río Aguanaval, Zac. 1.*
- CONAGUA. Comisión Nacional del Agua. (2002). *El Agua en la Comarca Lagunera.*
- CONAGUA. Comisión Nacional del Agua. (2018). *Atlas del Agua en México 2018.*
- CONAGUA. Comisión Nacional del Agua. (2020). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el Acuífero Principal-Región Laguna (0523), estado de Coahuila. México D.F., México.*
- Cortina, J. L., Armienta, M. A., Rovia, M., Martínez, X., y Ballinas, L. (2008). Movilidad del arsénico y procesos de transporte. *Distribución del arsénico en las regiones Ibérica e Iberoamericana. Editorial Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo, Buenos Aires*, 77-93.
- Da Silva, Í. D., Sánchez, S. B., y Prieto, J. M. C. (2009). Descripción de las Venas de Fluorapatito en Pegmatitas de la Zona de la Fregeneda (Salamanca). *Macla: revista de la Sociedad Española de Mineralogía*, (11), 77-78.
- Damon, P. E., Shafiqullah, M., y Clark, K. F. (1981). Evolución de los arcos magmáticos en México y su relación con la metalogénesis. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 5(2), 223-238.
- de Medellín, A. (2019). Consideraciones y pautas técnicas para la elaboración de estudios de caracterización de grupos de valor, de interés y partes interesadas. *Antioquia de Medellín.*
- Del Razo, L. M., y Corona, J. C. (1993). Fluoride levels in well-water from a chronic arsenicism area of Northern Mexico. *Environmental Pollution*, 80(1), 91–94.
- Del Razo, L. M., Arellano, M. A., y Cebrian, M. E. (1990). The oxidation states of arsenic in well-water from a chronic arsenicism area of northern Mexico. *Environmental pollution*, 64(2), 143-153.
- Del Razo, M., Ledón, J. M., y Velasco, M. (2018). Arsénico y fluoruro en agua: riesgos y perspectivas desde la sociedad civil y la academia en México. Ciudad de México: Secretaría de Gobernación (SEGOB).*
- Enriquez Robledo, A. D. C., Hernández Alvarado, H., y Morales Pérez, J. A. (2021). Hidroarcanismo en la Comarca Lagunera y Políticas Públicas. *Revista Enfoques: Ciencia Política y Administración Pública*, 19(35), 21–43.
- Esquivel-Victoria, O. A., E. S. y Escolero-Fuentes. (2023). Application of mass-balance method to evaluate recharge rate patterns in a Quaternary aquifer in northern Mexico. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 24(3).

REFERENCIAS

- Figuerola Salguero, G. D. (2006). Desarrollo de un metodología analítica para el análisis de elementos de tierras raras (REE) y trazas en rocas utilizando LA-ICP-AE. *Tesis de Maestría*.
- Galindo, G., Fernandez-Turiel, J. L., y Gimeno, D. (2005). *El arsénico en las aguas termales del sur de la cuenca del río Salí, Tucumán, Argentina*.
- Gálvez Montaña, L. (2014). Estudio de líneas de crecimiento en fluoritas asturianas mediante ablación láser acoplada a ICP-MS. *Tesis de maestría*.
- Gandhi, T. P., Sampath, P. V., y Maliyekkal, S. M. (2022). A critical review of uranium contamination in groundwater: treatment and sludge disposal. *Science of the Total Environment*, 825, 153947.
- Gill, F., R. y Godfrey. (2022). *Igneous rocks and processes: a practical guide*. John Wiley y Sons.
- Godoy, J. M., Ferreira, P. R., de Souza, E. M., da Silva, L. I., Bittencourt, I., y Fraifeld, F. (2018). High uranium concentrations in the groundwater of the Rio de Janeiro state mountainous region.
- González Naranjo, G. A. (2006). *Análisis estructural y estudio paleomagnético en el área Potrero El Colorado, porción occidental de la sierra La Fragua, Coahuila, México*. Universidad Autónoma de Nuevo León.
- González, M. T., y Hernández, J. R. T. (1998). The late Triassic-early Jurassic active continental margin of western north America in northeastern Mexico. *Geofísica Internacional*, 37(4), 283-292.
- González, P. D. (2015). Texturas de los cuerpos ígneos.
- Gutiérrez-Avila, H., y Winkler, S. B. (1989). Remoción del arsénico del agua para consumo humano en domicilios de comunidades rurales de la Comarca Lagunera, México. *Salud Pública de México*, 31(3), 305-313.
- Gutiérrez-Ojeda, C. (1995). *Origin of arsenic in the alluvial aquifer of the Region Lagunera, States of Coahuila and Durango, Mexico*.
- Gutiérrez, M., & Alarcón-Herrera, M. T. (2022). Fluoruro en aguas subterráneas de la región centro-norte de México y su posible origen. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 38.
- Gutiérrez, M., Valdés, M. S. E., Herrera, M. T. A., Munguía, A. P., & Hidalgo, H. S. (2021). Arsénico y flúor en agua subterránea de Chihuahua: su origen, enriquecimiento, y tratamientos posibles: Arsenic and fluoride in groundwater from Chihuahua: origin, enrichment, and possible treatments. *Tecnociencia Chihuahua*, 15(2), 828-828.
- Guzmán-Soria, E., García-Salazar, J. A., Saturnino Flores, J., Fortis Hernández, M., Valdivia Alcalá, R., y Portillo Vázquez, M. (2006). La demanda de agua en la Comarca Lagunera, México. *Agrociencia*, 40(6), 793-803.
- Haddad, F., Yazdi, M., Behzadi, M., Yakymchuk, C., y Khoshnoodi, K. (2023). Mineralogy, geochemistry, and depositional environment of phosphates in the Pabdeh Formation, Khormuj anticline, SW of Iran. *Environmental Earth Sciences*, 82(18), 418.
- Hernández Martínez, J. L., Méndez Chávez, Y. J., Romero, F. M., y Martínez Villegas, N. V. (2023). *Analysis of environmental issues at Villa de la Paz-Matehuala-Cerrito Blanco, San Luis Potosí [Análisis de la problemática ambiental en Villa de la Paz-Matehuala-Cerrito Blanco, San Luis Potosí]*.
- Hernández-Mendoza, H., Ríos-Lugo, M. J., Romero-Guzmán, E. T., y Gaytán-Hernández, D. (2017). Cuantificación de los niveles de uranio en agua subterránea en el municipio de San Diego de la Unión México. *ISSSD*.
- Hita, L. G., Diaz, F. S., y Mata, I. (1995). Estudio hidrogeoquímico e isotópico del acuífero granular de la Comarca Lagunera, México. In *Estudios de hidrología isotópica en America Latina 1994. Estudios de hidrología isotópica en America Latina sobre los recursos hidricos y la contaminación de las aguas subterranas* (pp. 237-276). IAEA Vienna.

REFERENCIAS

- Hurtado, J., R. y Gardea-Torresdey. (2004). Environmental evaluation of fluoride in drinking water at “Los altos de Jalisco,” in the central Mexico region. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*, 67(20–22), 1741–1753.
- Hobday, D. K., y Galloway, W. E. (1999). Groundwater processes and sedimentary uranium deposits. *Hydrogeology Journal*, 7, 127–138.
- Imlay, R. (1940). Neocomian faunas of northern Mexico. *Geological Society of America Bulletin*, 51, 117–190.
- Imlay, R. W. (1936). Evolution of the Coahuila Peninsula, Mexico: Part VI, Geology of the Western Part of the Sierra de Parras. *Geological Society of America Bulletin*, 47, 1091–1152.
- Imlay, R. W. (1937). Geology of the middle part of the Sierra de Parras, Coahuila, Mexico. *Geological Society of America Bulletin*, 567–630.
- IMTA. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. (1991). *Estudio hidrogeoquímico e isotópico del acuífero granular de la Comarca Lagunera. México*.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2021). *Censo de Población y Vivienda 2020*.
- Jahnke, R. A. (1984). The synthesis and solubility of carbonate fluorapatite. *American Journal of Science*, 284(1), 58–78.
- Julián, P. L., y Collado, J. M. (2002). Extracciones químicas secuenciales de metales pesados. Aplicación en ciencias geológicas. *Estudios geológicos*, 58(5-6), 133–144.
- Kundu, B., M. C. y Mandal. (2009). Assessment of potential hazards of fluoride contamination in drinking groundwater of an intensively cultivated district in West Bengal, India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 152, 97–103.
- Langmuir, D. (1997). *Aqueous environmental geochemistry*. New Jersey.
- Lara García, L. M., y Carrillo Gaona, G. S. (2021). Efectos adversos del consumo excesivo del flúor en la salud humana, revisión sistemática. *Universidad Cooperativa de Colombia, Facultad de Ciencias de La Salud*.
- Leke, R. J., Oduma, J. A., Bassol-Mayagoitia, S., Bacha, A. M., y Grigor, K. M. (1993). Regional and geographical variations in infertility: effects of environmental, cultural, and socioeconomic factors. *Environmental health perspectives*, 101(suppl 2), 73–80.
- Lillo Ramos, F. J. (2021). La actividad antrópica, un aspecto clave en la contaminación geogénica de arsénico en las aguas subterráneas.
- López, J.-M., J. y Collado-Mandado. (2002). Extracciones químicas secuenciales de metales pesados. Aplicación en ciencias geológicas. *Estudios Geológicos*, 58(5–6), 133–144.
- Luque Espinar, J. A., Pardo-Igúzquiza, E., Giménez Forcada, E., Grima Olmedo, J., y Grima Olmedo, C. (2018). *Riesgo para la salud por consumo de flúor presente en las aguas subterráneas de España*. Asociación Internacional de Hidrogeólogos Grupo Español.
- Mahlknecht, J., Steinich, B., y Navarro de León, I. (2004). Groundwater chemistry and mass transfers in the Independence aquifer, central Mexico, by using multivariate statistics and mass-balance models. *Environmental Geology*, 45, 781–795.
- Mange, M. A., y Wright, D. T. (2007). *Heavy minerals in use*. Elsevier.
- Manikandan, S., Chidambaram, S., Ramanathan, A. L., Prasanna, M. V., Karmegam, U., Singaraja, C., ... y Jainab, I. (2014). A study on the high fluoride concentration in the magnesium-rich waters of hard rock aquifer in Krishnagiri district, Tamilnadu, India. *Arabian Journal of Geosciences*, 7, 273–285.
- McSween, H. Y., Richardson, S. M., y Uhle, M. E. (2003). *Geochemistry: pathways and processes*. Columbia University Press.
- Medina-Pizzali, M., Robles, P., Mendoza, M., y Torres, C. (2018). Ingesta de arsénico: el impacto en la alimentación y la salud humana. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública*, 35, 93–102.

REFERENCIAS

- Mejía-González, M. Á., González-Hita, L., Briones-Gallardo, R., Cardona-Benavides, A., y Soto-Navarro, P. (2014). Mecanismos que liberan arsénico al agua subterránea de la Comarca Lagunera, estados de Coahuila y Durango, México. *Tecnología y ciencias del agua*, 5(1), 71-82.
- Méndez, M. A., M. y Armienta. (2003). Arsenic phase distribution in Zimapán mine tailings, Mexico. *Geofísica Internacional*, 42(1), 131-140.
- Molina-Maldonado, A. (2004). Estudio hidrogeoquímico en la comarca Lagunera, México. *Mexico City: MSc Thesis, Posgrado En Ciencias de La Tierra, National Autonomous University of Mexico, UNAM*.
- Morales-Arredondo, J. I., Hernández, M. A., Hernández-Mendiola, E., Estrada-Hernández, R. E., y Bermea, O. M. (2018). Hydrogeochemical behavior of uranium and thorium in rock and groundwater samples from southeastern of El Bajío Guanajuatense, Guanajuato, Mexico. *Environmental Earth Sciences*, 77, 1-13.
- Moreira, M. A. (1998). Modelos mentales, modelos conceptuales y modelización. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 15(2), 107-120.
- Ojeda, O., G. y Flores. (2004). Proyectos de recarga artificial de acuíferos en la comarca lagunera, México. *Instituto Mexicano de Tecnología de Agua. 1p. Torreón, Coahuila, México*.
- Onishi, H., y Sandell, E. B. (1955). Geochemistry of arsenic. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 7(1-2), 1-33.
- Ortega-Guerrero, A. (2017). Evaporative concentration of arsenic in groundwater: health and environmental implications, La Laguna Region, Mexico. *Environmental Geochemistry and Health*, 39, 987-1003.
- Ortiz, D., Castro, L., Turrubiarres, F., Milan, J., y Diaz-Barriga, F. (1998). Assessment of the exposure to fluoride from drinking water in Durango, Mexico, using a geographic information system. *Fluoride*, 31(4), 183-187.
- Oruc, N. (2008). Occurrence and problems of high fluoride waters in Turkey: an overview. *Environmental Geochemistry and Health*, 30(4), 315-323.
- Parker, R. B., y Toots, H. (1970). Minor elements in fossil bone. *Geological Society of America Bulletin*, 81(3), 925-932.
- Partida, E. G., Hinojosa, E. T., y Verma, M. P. (2001). Interacción agua geotérmica-manantiales en el campo geotérmico de Los Humeros, Puebla, México. *Tecnología y ciencias del agua*, 16(2), 185-194.
- Pellant, C. (2010). *Rocas y minerales*. Omega.
- Pérez, T. D. J. S., y Mijares, F. J. A. (1991). Diseño de cárcamos de bombeo rectangulares. *Tecnología y ciencias del agua*, 89-100.
- Planer-Friedrich, B., Armienta, M., y Merkel, B. (2001). Origin of arsenic in the groundwater of the Rioverde basin, Mexico. *Environmental Geology*, 40(10), 1290-1298.
- Quintanilla, J., Coudrain-Ribsten, A., Martinez, J., Camacho, V., 1995. Hidroquímica de las aguas del Altiplano de Bolivia (Hydrochemistry of the waters of the Bolivian Altiplano; in spanish). In Ribstein, P., Francou, B., Coudrain-Ribsten, A., Mourguiart, P. (Eds.), "Eaux, Glaciers et Changements Climatiques dans les Andes Tropicales". Bull. de l' Institut Français d' Études Andines, vol 24/3, pp. 461 – 471.
- Quinto, A., Santoyo, E., Torres, V., González, E., y Castillo, D. (1995). Estudio geoquímico-ambiental de los efluentes naturales producidos en la zona geotérmica de Acoculco, Puebla. *Tecnología y ciencias del agua*, 10(3), 21-27.
- Ramírez Gutiérrez, G. (2011). *Marco Geológico-Estratigráfico Del Valle de Cuatro Ciénegas, Coahuila, México*. Tesis de maestría. Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Rangel-Moreno, K., Mérida-Ortega, Á., Gamboa-Loira, B., Flores-García, M. K., Rothenberg, S. J., y López-Carrillo, L. (2022). Dietary contribution to total urinary arsenic in Mexican women. *Food Additives y Contaminants: Part A*, 39(8), 1453-1462.

REFERENCIAS

- Razo, I., Carrizales, L., Castro, J., Díaz-Barriga, F., y Monroy, M. (2004). Arsenic and heavy metal pollution of soil, water and sediments in a semi-arid climate mining area in Mexico. *Water, Air, and Soil Pollution*, 152, 129-152.
- Rentería Villalobos, M., Montero Cabrera, M. E., Reyes Cortés, M., Herrera Peraza, E. F., Rodríguez Pineda, A., Manjón Collado, G., ... y Valenzuela Hernández, M. (2007). Characterization of source rocks and groundwater radioactivity at the Chihuahua valley. *Revista mexicana de física*, 53, 16-22.
- Reyes-Cortés, M., Reyes-Cortés, I. A., Espino Valdez, S., Rentería-Villalobos, M., Burillo Montúfar, J. C., y Montero-Cabrera, M. E. (2012). Origen y distribución de la radiactividad natural en la zona norte de la cuenca de Chihuahua, México. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 29(3), 659-675.
- Reyes-Gómez, V. M. (2010). Dinámica del arsénico en el valle de Tabalaopa-Aldama-El Cuervo, en Chihuahua, México. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 6(1), 21-31.
- Reyes-Gómez, V. M., Alarcón-Herrera, M. T., Gutiérrez, M., y López, D. N. (2013). Fluoride and arsenic in an alluvial aquifer system in Chihuahua, Mexico: contaminant levels, potential sources, and co-occurrence. *Water, Air, y Soil Pollution*, 224, 1-15.
- Rogers, C. L. (1957). *Geología general y depósitos de fosfatos del distrito de Concepción del Oro, Estado de Zacatecas*. Instituto Nacional Para La Investigación de Recursos Minerales, Boletín, 38, 129.
- Romero Guzmán, E. T., Hernández Mendoza, H., Reyes Gutiérrez, L. R., y Vilchis Cruz, A. (2017). Relación de actividad $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ de aguas subterráneas de San Felipe del Progreso, Estado de México. XXX Congreso Nacional de Química Analítica Asociación Mexicana de Química Analítica (AMQA).
- Sariñana-Ruiz, Y. A., Vazquez-Arenas, J., Sosa-Rodríguez, F. S., Labastida, I., Armienta, M. A., Aragón-Piña, A., ... y Lara, R. H. (2017). Assessment of arsenic and fluorine in surface soil to determine environmental and health risk factors in the Comarca Lagunera, Mexico. *Chemosphere*, 178, 391-401.
- Saxena, V., y Ahmed, S. (2003). Inferring the chemical parameters for the dissolution of fluoride in groundwater. *Environmental Geology*, 43, 731-736.
- Soria, E. G., Salazar, J. A. G., Flores, J. S. M., Hernández, M. F., Alcalá, R. V., y Vázquez, M. P. (2006). La demanda de agua en la Comarca Lagunera, México. *Agrociencia*, 40(6), 793-803.
- Soto-Rojas, A. E., Ureña-Cirett, J. L., y Martínez-Mier, E. D. L. A. (2004). A review of the prevalence of dental fluorosis in Mexico. *Revista Panamericana de Salud Pública*, 15, 9-17.
- Stecher, O. (1998). Fluorine geochemistry in volcanic rock series: examples from Iceland and Jan Mayen. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62(18), 3117-3130.
- Tardy, M. (1973). Sobre la tectónica de la Sierra Madre Oriental en el sector de Parras, Coahuila: El cabalgamiento de la Serie Parrense. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, 34(1-2), 63-70.
- Torres-Martínez, J. A., Mora, A., Mahlknecht, J., Daesslé, L. W., Cervantes-Avilés, P. A., y Ledesma-Ruiz, R. (2021). Estimation of nitrate pollution sources and transformations in groundwater of an intensive livestock-agricultural area (Comarca Lagunera), combining major ions, stable isotopes and MixSIAR model. *Environmental Pollution*, 269, 115445.
- Valenzuela-Vasquez, L., Ramirez-Hernandez, J., Reyes-Lopez, J., Sol-Uribe, A., y Lazaro-Mancilla, O. (2006). The origin of fluoride in groundwater supply to Hermosillo City, Sonora, Mexico. *Environmental Geology*, 51(1), 17-27.
- Valsami-Jones, E., Ragnarsdottir, K. V., Putnis, A., Bosbach, D., Kemp, A. J., y Cressey, G. (1998). The dissolution of apatite in the presence of aqueous metal cations at pH 2-7. *Chemical Geology*, 151(1-4), 215-233.

REFERENCIAS

- Welch, A. H., Helsel, D. R., Focazio, M. J., y Watkins, S. A. (1999). Arsenic in ground water supplies of the United States. In *Arsenic exposure and health effects III* (pp. 9-17). Elsevier Science Ltd.
- Wyatt, C. J., Quiroga, V. L., Acosta, R. T. O., y Méndez, R. O. (1998). Excretion of arsenic (As) in urine of children, 7–11 years, exposed to elevated levels of As in the city water supply in Hermosillo, Sonora, México. *Environmental Research*, 78(1), 19-24.

Anexos

Petrografía

LR05 Granodiorita

Localidad: Intrusivo El Sarnoso, Dinamita, Durango.

13R X: 633814; Y: 2846251.

Granodiorita granular félsica intrusiva con cristales de 2-6 mm aproximadamente, presenta oxidación en muestra de mano; en lámina delgada se observan fracturas con dicha oxidación, alteración a clorita del clinopiroxeno, coronas de reacción alrededor de los minerales opacos e incrustaciones de éstos en biotita y clinopiroxeno. Se observa seritización en plagioclasas. La textura es holocristalina con matriz de cuarzo y los minerales predominantes presentes son plagioclasas, circones, feldespato alcalino y biotita.

Roca granular félsica intrusiva de composición diorítica, con cristales de 2-6 mm aproximadamente, presenta oxidación y se tomó de un macizo rocoso, se cree que es el intrusivo de la zona de Dinamita, originalmente cartografiado como "granito".

En lámina delgada se presenta una roca ígnea intrusiva félsica con fracturas donde se presenta oxidación, alteración a clorita de la biotita que se encuentra alterada, presenta coronas de reacción alrededor de minerales opacos e incrustaciones de éstos en biotita y clinopiroxenos, que predomina en su forma subhedral con colores de interferencia del segundo orden. Se aprecia seritización en los cristales más grandes de plagioclasa, por lo que se puede deducir una alteración de tipo potásica en donde las temperaturas de reacción son de 400 a 600°C y algunas inclusiones de hematita, los pH's de esta alteración son neutros o alcalinos. Predominan los cuarzoes de forma anhedral. La evidencia del magma en disolución se presenta en las plagioclasas con textura antipertítica que aparecen en la roca.

ANEXOS

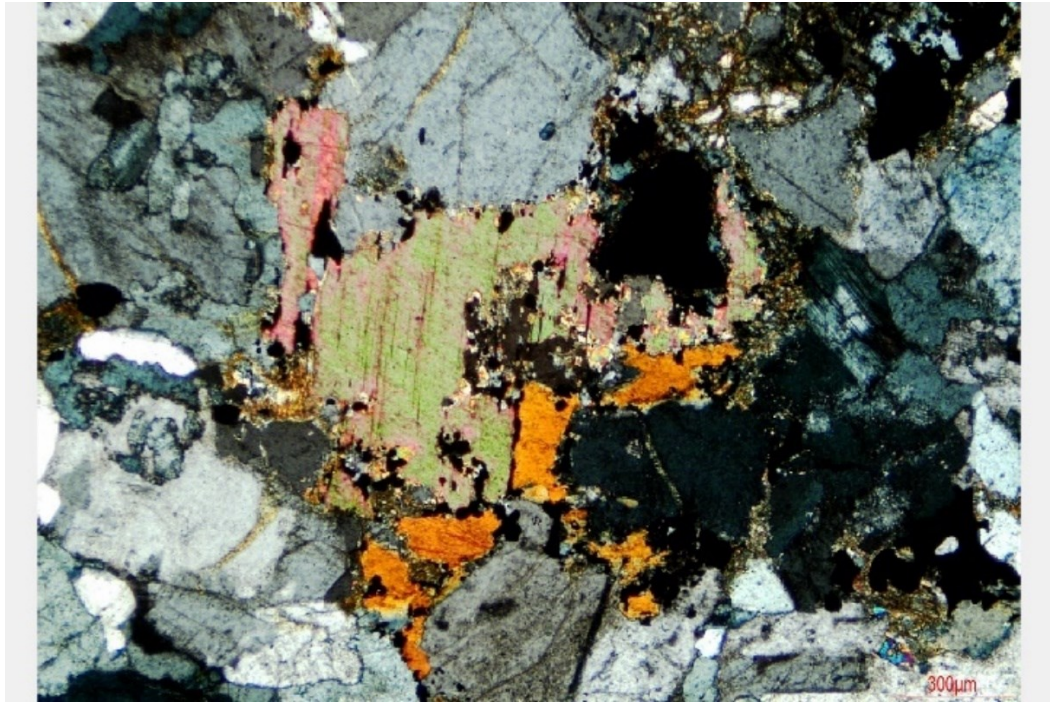


Ilustración 31. Biotita y clinopiroxeno alterado bajo aumento 5x en nicoles cruzados.

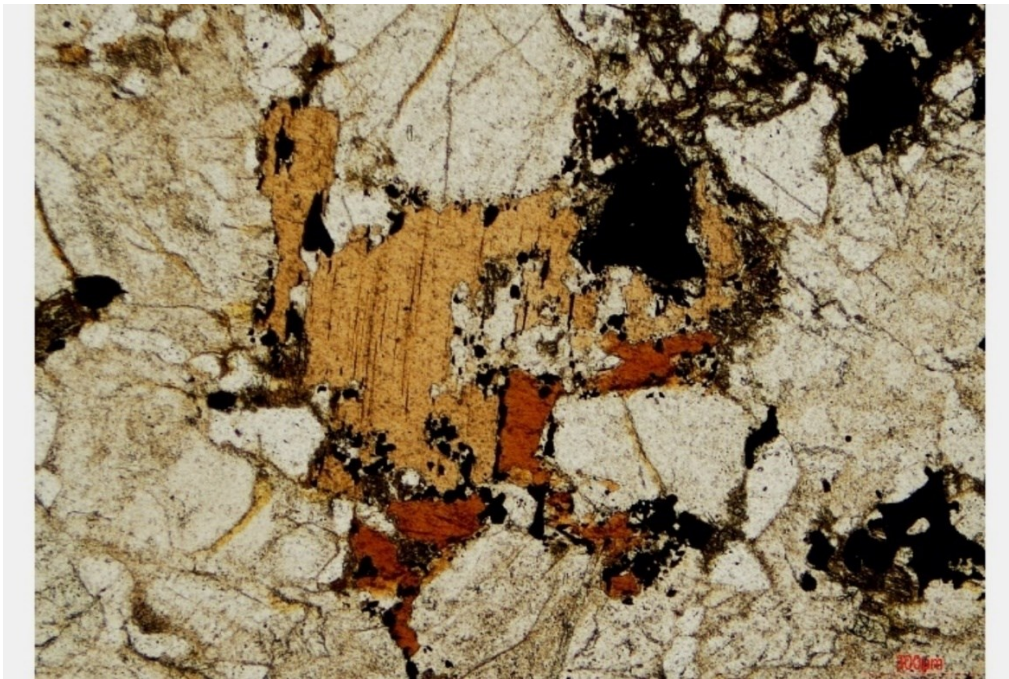


Ilustración 32. Minerales ópacos y matriz con seritización, 5x nicoles paralelos.

LR10 Riolita**Localidad: Cerro Colorado, Mapimí, Durango.****13R X: 608960; Y: 2871161.**

Roca ígnea extrusiva que presenta distinta reología en la zona, cuenta con un bandeamiento de colores marrones-rojos-blancos y microfallas en muestra de mano, textura fanerítica y poros por liberación de gases. El afloramiento presenta brechas de falla, fallas normales, oxidación y alteración avanzada en la roca. La textura de la roca es fluida vítrea, con matriz de flujo que incluye biotitas, cuarzo y feldespato alcalino. La muestra se tomó en el cerro Colorado en Mapimí, Durango, es una roca ígnea extrusiva riolítica, que presenta distinta reología en la zona, cuenta con bandeamiento de colores marrones-rojos-blancos y microfallas en la muestra de mano, textura fanerítica y huecos de liberación de gases; otras muestras en la misma zona aparecen blanquaceas por alteración y se aprecia oxidación. La zona muestra brechas de falla, fallas normales y alteración de roca como consecuencia del mismo fallamiento.

La textura de la roca es felsítica, evidenciando un alto grado de sobre enfriamiento, donde la matriz está conformada por cristales anhedrales como mosaico de grano fino compuesto de cuarzo y feldespato alcalino.

La plagioclasa se encuentra alterada a epidota, este tipo de alteración representa soluciones de pH neutro a alcalino en rangos de temperatura bajos de 200 a 300°C, esta alteración propolítica también afecta a las biotitas de la roca cloritizándola. La augita aparece muy poco frecuente, su forma es subhedral. La biotita se encuentra presente en la matriz en cristales muy pequeños de forma acicular. El cuarzo aparece anedral y en algunas secciones de la lámina parece seguir la dirección del flujo.



Ilustración 33. Presencia de vidrio y circón incrustado en biotita, nicols paralelos con objetivo 5x.

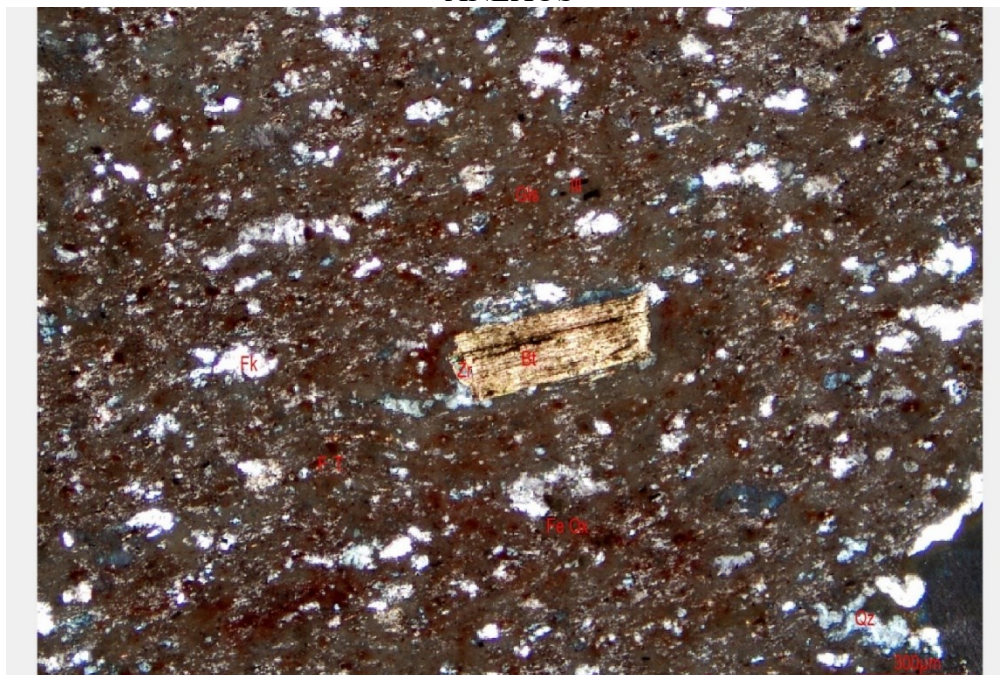


Ilustración 34. Biotita en matriz fluidal, aumento 5x nicoles cruzados.

LR11 Andesita

Localidad: Cerro Colorado, Mapimí, Durango.

13R X: 609746; Y: 2870712.

El afloramiento muestra fracturamiento y pequeñas vetas de cuarzo, en algunas zonas aparece intemperismo y caliche. El color en muestra de mano es azul grisáceo de estructura maciza con un grado de cristalinidad merocristalina y fanerítica, cuyos cristales son principalmente de grano fino distribuidos en una matriz equigranular. Los feldespatos alcalinos aparecen alterados a calcita por la alteración propilítica de la roca, además de oxidación y presencia de minerales opacos, la mayoría de los cristales de plagioclasa euhedrales se encuentran alterados y con procesos de seritización. Se cuenta con la presencia de hornblenda, circón y feldespatos alcalinos. El afloramiento se ubica en Mapimí, Durango, una roca fracturada con pequeñas vetas de cuarzo, en algunas zonas muestra intemperismo representado por caliche. Además, a unos metros de la muestra se presenta la misma roca, pero alterada, presentado tonos en su matriz más azules-verdes. La roca ígnea extrusiva en muestra de mano se presenta de color grisáceo azulado de estructura maciza con un grado de cristalinidad merocristalina y fanerítica, cuyos cristales son principalmente de grano fino distribuidos en una matriz equigranular.

La lámina delgada presenta una matriz vítrea en donde predominan los minerales de plagioclasa euhedrales de relieve bajo de extinción oblicua con maclas de Carlsbad representativas y algunas zonadas, algunas de ellas cuentan con textura intrafasiculada, donde los cristales prismáticos de la plagioclasa están rellenos de piroxenos, esto es debido al sobreenfriamiento de la roca y un mayor crecimiento de plagioclasa respecto al piroxeno y que tiene un bajo punto eutéctico. Oxidación presente en las zonas de la alteración de los minerales. La hornblenda presenta cristales principalmente euhedrales con oxidación en los bordes diseminada en toda la roca, algunas están alteradas. El circón aparece incrustado en plagioclasas alteradas. Es una roca altamente alterada en donde la mayoría de los minerales están fracturados y alterados, incluyendo zonas de vidrio rodeando cristales de plagioclasas, opacos y calcita secundaria.

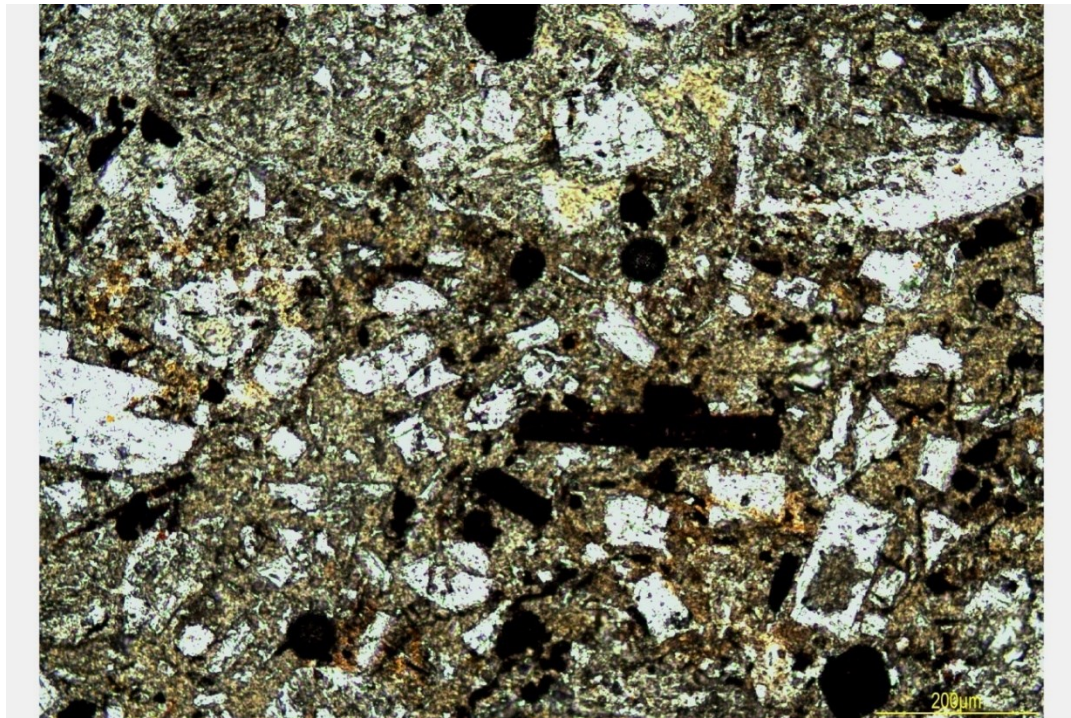


Ilustración 35. Plagioclasas altamente alteradas con óxidos de hierro bajo objetivo 5X. Nícoles paralelos.

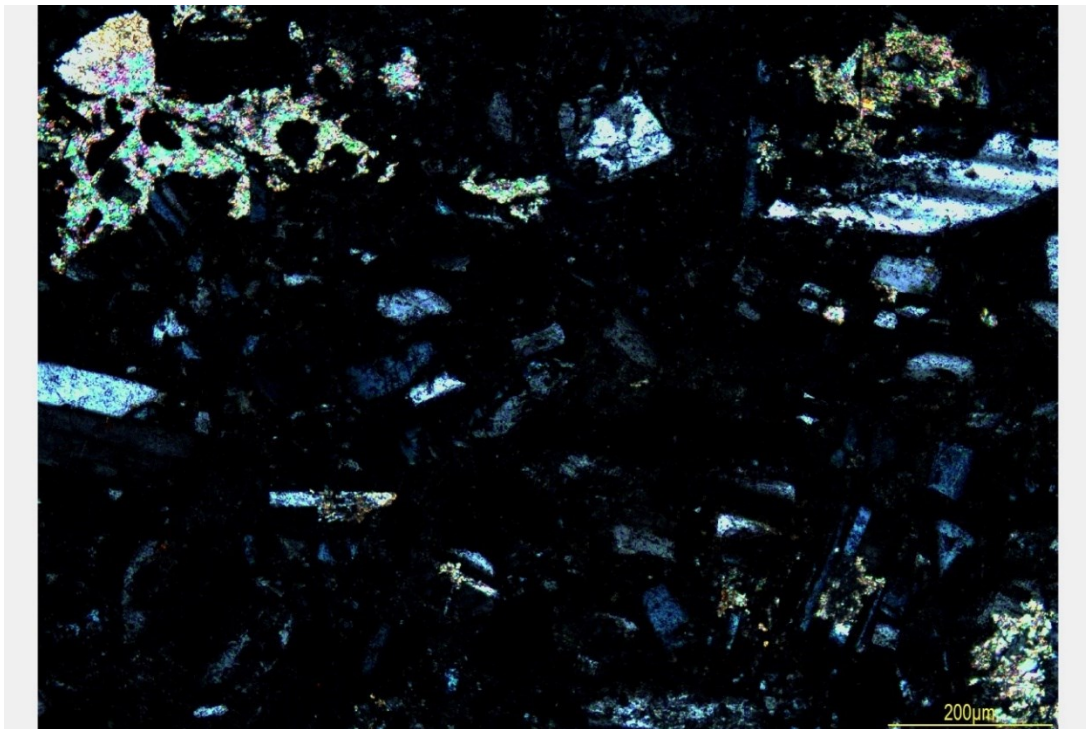


Ilustración 36. Se observa una calcita secundaria generada por alteración de feldespatos. 5x, nı́coles cruzados.

LR12 Toba Riolítica**Localidad: Cerro Colorado****13R X: 625940; Y: 2880998.**

Roca silicificada, en muestra de mano se aprecian pequeños cristales de cuarzo y bandeamiento rojizo, probablemente fluidos que contienen vidrio y clastos menores a 1 mm. Las texturas presentes son de flujo, sieve y axiolítica. Su mineralogía está compuesta por ortopiroxenos, cuarzo, feldespato alcalino, minerales opacos, clastos y plagioclasas en una matriz desvitrificada. Se aprecian cuarzoes dentro de clastos arrastrados por flujo magmático y plagioclasas alteradas a sericita. La textura axiolítica, representada como fibras radiales divergiendo desde el núcleo son formadas por desvitrificación y son representativas de tobas e ignimbritas, además aparecen relacionadas a la oxidación de minerales. La roca se encuentra en una zona de falla. La roca se tomó de un macizo rocoso con alto contenido en sílice, además de presentar efervescencia reaccionado al ácido en algunos de sus componentes. En muestra de mano la ignimbrita presenta una matriz rojiza con pequeños cristales de cuarzo y bandeamiento rojizo, probablemente fluidos que contienen vidrio, clastos y minerales muy pequeños (<1mm) que pueden ser fragmentos vítreos o biotita, la muestra presenta oxidación.

Los cristales presentes en la lámina delgada tienen en general una forma anhedral, principalmente los cuarzoes, los que se encuentran de mayor tamaño presentan incrustaciones de cristales. Los fluidos alteraron a algunos minerales, donde algunos de ellos se encuentran fracturados. Se aprecian cuarzoes dentro de clastos arrastrados con el flujo magmático. Pocas plagioclasas y las presentes se encuentran muy seritizadas dándoles un aspecto sucio. Esferulitas presentes en algunas partes del flujo. Los minerales opacos se encuentran alrededor de la oxidación, que llega a fracturar cristales. La textura sieve se presenta en algunos minerales de mayor tamaño, posiblemente ortopixenos, en donde el cristal se refusionó o se diluyó dentro del fundido en el cual se encuentra inmerso. La textura axiolítica, representada como fibras radiales divergiendo desde el núcleo, se forman por desvitrificación y son representativas de tobas e ignimbritas, además, aparece en conjunto con la oxidación.

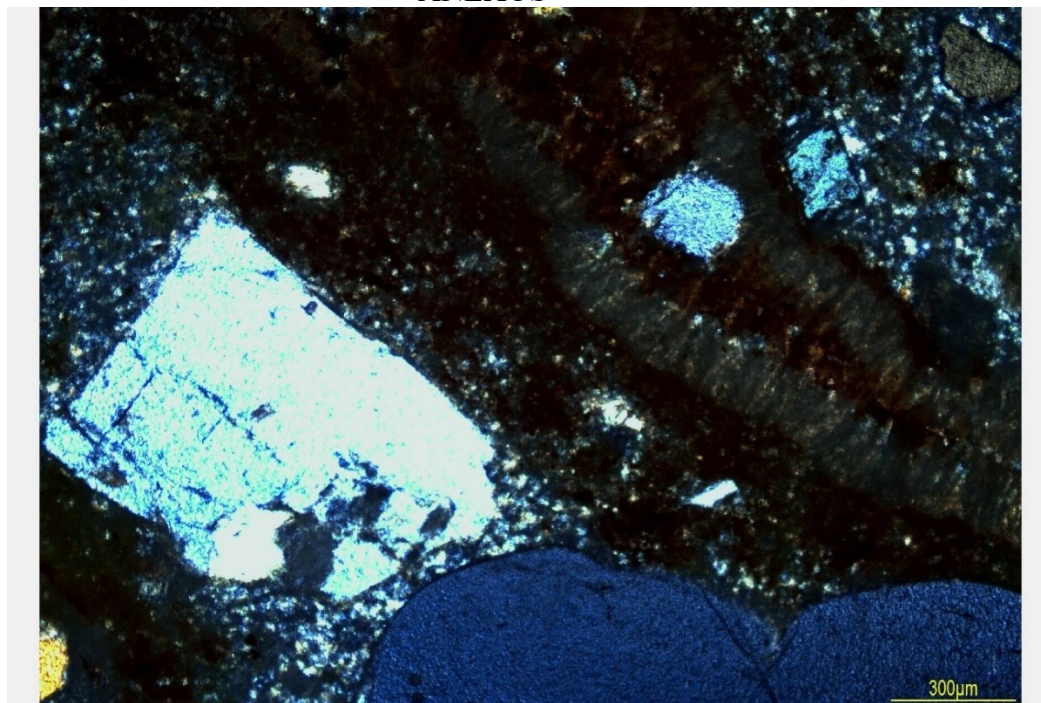


Ilustración 37. Textura axiolítica presente en la roca. Nícoles cruzados, 5x.

LR26 Basalto de olivino

Localización: Finisterre, Fco I. Madero, Coahuila.

13R X: 686714; Y: 2879002.

En muestra de mano se presenta una roca ígnea extrusiva de color negro de composición máfica predominante y cuarzo, con textura afanítica y holohialino, oxidación en algunas zonas. En lámina delgada se aprecia una textura microporfírica de matriz vítrea, la composición es fenocristales 40% de plagioclasa 30%, olivino 7%, clinopiroxeno en 1% que por su forma probablemente correspondan a magnetita. Los cristales de clinopiroxeno, ortopiroxeno y minerales opacos se encuentran embebidos en una matriz de plagioclasa con textura pilotacítica (sin orientación específica), el olivino presenta textura intergranular e intersticial. La plagioclasa se encuentra con hábito prismático de cuatro a cinco caras con forma euhedral y tamaño de grano que va de fino (0.2-0.8 mm) a medio (1-5 mm).

En lámina delgada, se aprecian fenocristales de olivino, clinopiroxeno, ortopiroxeno y minerales opacos embebidos en una matriz de plagioclasa con textura intergranular con orientaciones aleatorias, textura típica de basaltos que se genera por crecimiento a partir de muchos núcleos a tasas similares para todos los minerales, además cuenta con clinopiroxeno de forma subhedral a anhedral en cristales de tamaño fino y olivino intersiticial que varía de tamaños, desde fino a grueso. La plagioclasa se encuentra con hábito prismático de cuatro a cinco caras con forma euhedral y tamaño de grano que va de fino (0.2 - 0.8 mm) a medio (1 - 5 mm), algunas de ellas presentan zonación. Minerales como pequeños olivinos y plagioclasas crecen en una textura glomeroporfírica aglomerándose, característico de rocas ígnea extrusivas.

ANEXOS

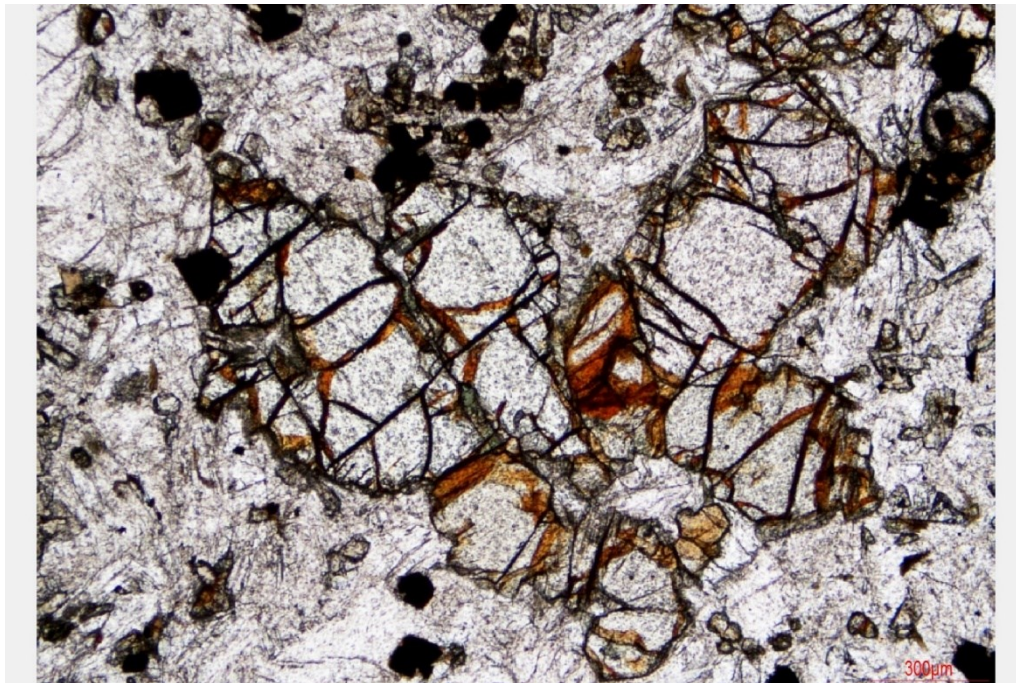


Ilustración 38. Olivino en matriz de plagioclasa, fracturas rellenas de vidrio vista bajo objetivo 5x y nicoles paralelos.

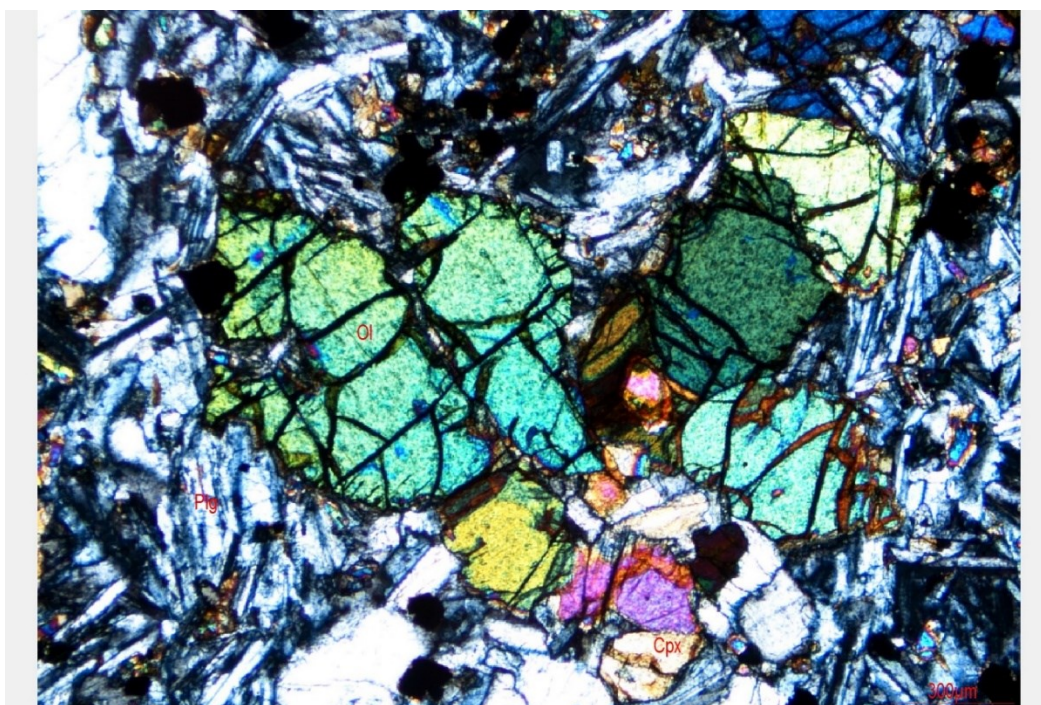


Ilustración 39. Presencia de clinopiroxeno y olivino en basalto en matriz félsica, 5x en nicoles cruzados.

LR27 Diorita**Localización: Sierra el Sarnoso, Dinamita, Durango.****13R: 627859; Y: 2838147.**

La muestra de mano es un núcleo de perforación félsico de composición diorítica con oxidación y alteración de minerales, predomina el tamaño de grano fino y minerales de color acre, además de fracturas paralelas al núcleo. La matriz es félsica (cuarzo y plagioclasa) con textura microcristalina con presencia de feldespato alcalino, cuarzo, minerales opacos, plagioclasa, biotita y vidrio.

Roca ígnea félsica extrusiva microcristalina en donde el cuarzo presente en la matriz aparece en forma anhedral en textura seriada, la roca presenta oxidación en distintas partes de su estructura, principalmente alrededor de plagioclasas alteradas, zona donde también se encuentra presente apatito de forma euhedral y anhedral circular con relieve medio, fracturado, aparece junto a la biotita, parece ser un mineral secundario cristalizado al momento que ocurrió la alteración hidrotermal. La plagioclasa se está alterando a calcita. En cuanto a la oxidación, sigue fracturas entre minerales, favoreciendo la cloritización de las biotitas que aparecen altamente alteradas.

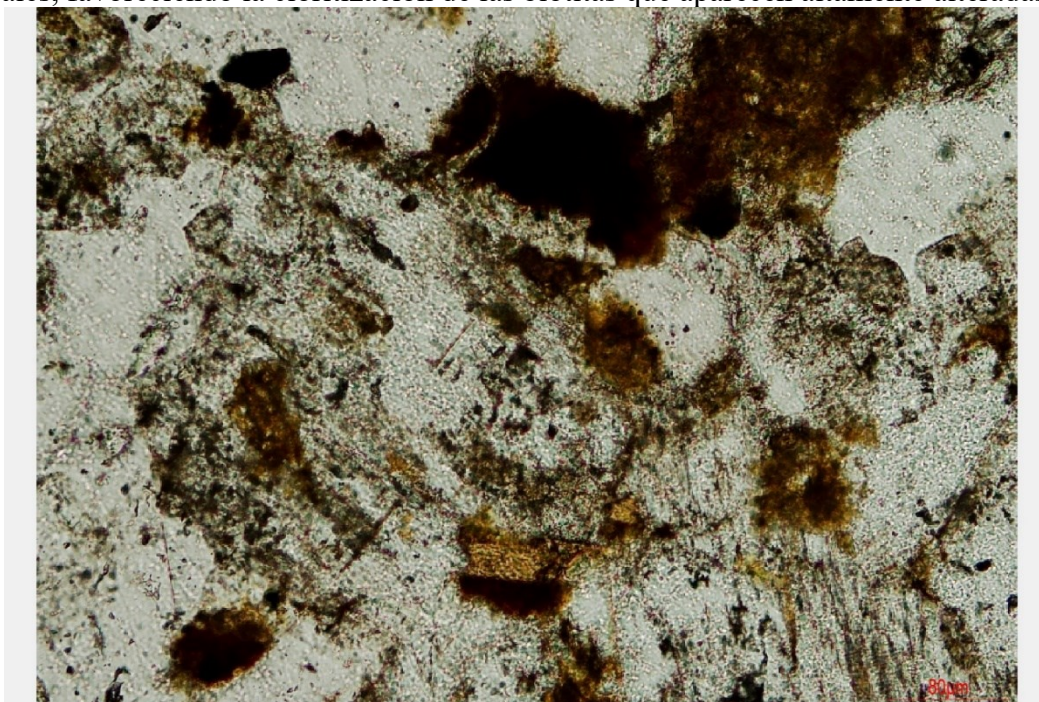


Ilustración 40. Biotitas (minerales color café) bajo objetivo 20x en nicoles paralelos.

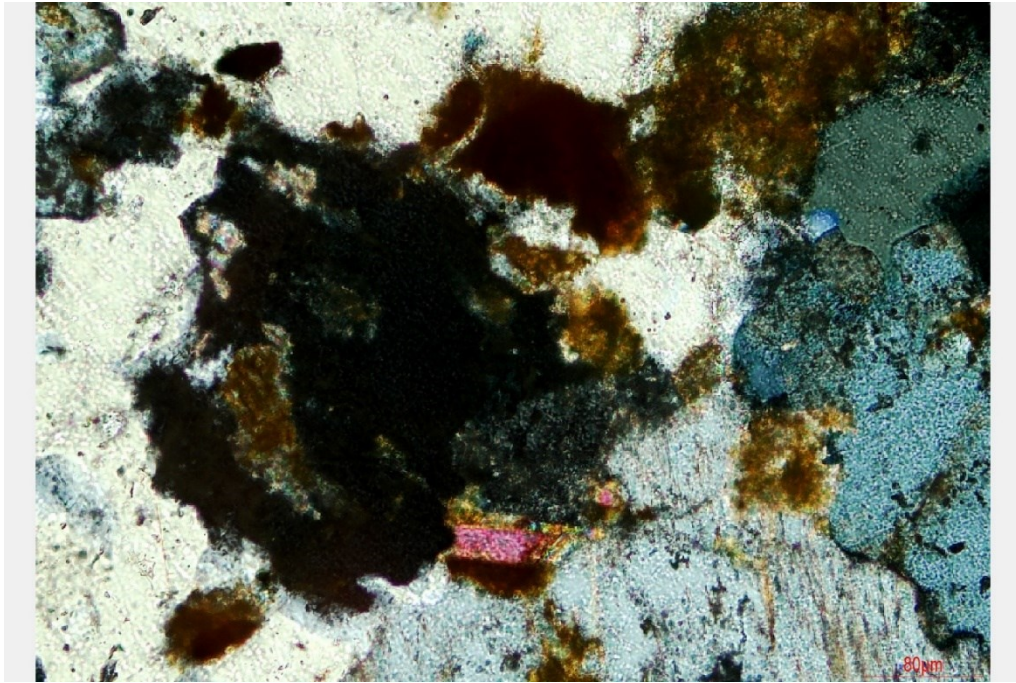


Ilustración 41. Matriz de plagioclasa con seritización entre biotitas, 20x nicoles cruzados.

ANEXOS

ID	Tipo	X	Y	As	F	U	Be	V	Ba	Sr	Y	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Rb	Nb	Mo	Ag	Sn	Sb	Cs	La	Ce	Nd	Sm	Eu	Tb	Yb	Hf	Ta	W	Tl	Pb	Bi	Th
LR03	Endoskarn	633900	2846368	5	1700	4.9	1	50	82	472	10	60	1	20	20	30	17	2	2	0.5	< 1	0.5	2.5	12.5	20.9	10.8	2	0.47	0.3	0.9	1.6	0.3	< 1	0.8	< 5	0.4	3.5
LR04	Endoskarn alterado	633875	2846371	5	<200	0.9	1	6	15	265	1	20	1	20	10	30	7	1	<2	0.5	< 1	0.5	0.5	1.6	2.4	1.1	0.2	0.06	0.1	0.1	0.2	0.1	< 1	0.2	< 5	0.4	0.2
LR10	Riolita	608960	2871161	12	<200	1.8	1	10	1247	77	11	20	1	20	10	30	263	6	<2	0.9	1	7.6	4.5	30.5	54.4	21	3.3	0.71	0.4	1.1	2.2	0.9	< 1	4.3	47	0.4	8.3
LR13	Caliza	691304	2828903	6.7	2430	0.7	1	<2	< 50	394	1	2	1	1	1	2	15	5	<1	0.3	0.03	0.1	< 1	0.5	<3	<5	0.1	0.2	0.5	0.2	1	0.5	< 1	0.01	<3	2	0.2
LR14	Ignimbrita riolítica	640200	2817641	31	<200	1.9	2	22	1856	99	25	80	3	40	20	40	149	9	2	0.5	2	1.8	6.6	40.4	83.4	39.6	6.9	1.06	0.8	2.1	5	1.1	< 1	1.2	20	0.4	16.9
LR18	Diorita	627820	2846405	9	1200	9.2	5	68	791	297	39	20	11	20	10	90	215	31	3	0.5	5	1.2	10.5	62.7	126	53	9.6	1.99	1.2	4.3	17	2.5	< 1	1.3	29	0.4	33.4
LR20	Riolita	626811	2829681	99	500	7.1	6	<5	27	44	68	20	2	20	10	50	433	15	3	0.5	8	17.9	62.6	18.9	46.7	34.5	11.8	0.12	2.2	6.8	5.1	2.2	1	2.8	48	0.4	28.5
LR21	Toba riolítica	626452	2830933	66	<200	5.2	5	6	19	18	53	20	1	20	10	30	299	22	<2	0.5	3	7	6.5	44.7	96.3	40.5	8.5	0.07	1.4	5.2	5.3	2.3	1	1.1	19	0.4	27
LR24	Mineralización oxidada	635032	2846133	4130	80	0.5	28	146	< 50	82	9	2	1	9	4	197	15	5	11	0.3	0.02	1510	< 1	4.4	<3	<5	1.1	0.2	0.5	1.3	1	0.5	521	0.02	360	3	0.2
LR26	Basalto	686714	2879002	5	500	0.9	2	193	697	1030	28	50	25	40	30	60	30	25	2	0.5	18	0.5	0.5	37.4	74.8	39.8	7.8	2.24	1	2.6	4.4	1.7	1	0.1	5	0.4	3.2

UASLP- 2. METODOLOGÍA DE CARACTERIZACIÓN DE MATRICES AMBIENTALES

Geoquímica de sedimentos ppm

ID	Tipo	X	Y	A s	F	U	A u	A g	C u	C d	M o	P b	N i	Z n	S	Al	B a	B e	B i	B r	C a	C o	C r	C s	E u	Fe	H f	H g	I r	K	L i	M g	M n	N a	P	R b	S b	S c	S e	S r	T a	Ti	T h	V	W	Y 2	L a	C e	N d	S m	S n	T b	Y b	L u
LS 01	Sediment o de arroyo en salida este intrusivo Sarnoso	633 912	2846 244	11 0	1 4 0	0. 7	< 2	< 0. 3	5	< 0. 3	< 1	3 4	3	4 6	< 0. 01	3. 16	2 3 0	< 2	< 0. 5	25 .1	< 1	7	< 1	< 0. 2	2. 13	< 2	< 1	< 5	1. 83	1 0	0. 88	39 3	1. 03	0.0 35	9 2	94 .3	1. 7	< 3	2 7 2	< 0. 5	0. 15	5. 3	2 4	2 4	7	14 .1	2 1	< 5	2. 1	< 0. 02	< 0. 5	0. 9	< 0. 05	
LS 05	Arroyo drenando Cerro Colorado hacia este	609 970	2871 083	9. 2	1 1 0	2. 3	< 2	0. 4	6	0. 4	< 1	3 2	4	1 0 5	0. 01	7. 22	7 2 0	< 1	< 0. 5	3. 46	1 1	3	1 1	1. 1	3. 93	< 4	< 1	< 5	2	6 2	0. 98	10 60	1. 77	0.1 15	1 2 6	2. 2	6. 8	< 3	3 9 6	< 0. 5	0. 33	4. 9	7 0	< 1	1 7	22 .6	4 3	1 0	5. 4	< 0. 02	< 0. 5	1. 7	0. 28	
LS 07	Arroyo drenando zona de LR12 Jaboncillo - La Rosita	625 739	2880 786	21	1 5 0	5. 4	< 2	< 0. 3	7	< 0. 3	1	3 1	8	6 6	0. 02	5. 75	5 6 0	< 2	< 0. 5	3. 42	6	2 4	7	0. 5	2. 23	< 4	< 1	< 5	2. 07	3 1	0. 46	93 0	1. 62	0.0 44	1 6 7	3. 4	4. 3	< 3	2 4 5	< 0. 5	0. 22	8. 9	4 4	< 1	2 6	31 .9	6 0	3 1	7. 1	< 0. 02	< 0. 5	2. 9	0. 47	
LS 08	Arroyo aguas arriba de poblado La Mina	636 871	2837 983	16 .2	2 8 0	4. 1	< 2	< 0. 3	7	< 0. 3	1 6	2 8	7	3 9	< 0. 01	5. 13	< 5 0	< 4	< 0. 5	4. 86	< 1	2 0 4	1 4	< 0. 2	2. 1	< 4	< 1	< 5	2. 44	2 1	0. 13	21 6	2. 12	0.0 08	4 2 5	2. 3	0. 7	< 3	5 5	2. 1	0. 04	16 .9	1 8	< 1	1 1	22 .2	4 1	9	3. 2	< 0. 02	< 0. 5	2	0. 34	
LS 11	Sediment os de arroyo Fm. Nazas	640 021	2817 437	42 .2	3 5 0	3. 7	< 2	0. 4	1 2	0. 4	9	2 8	1 4	6 6	< 0. 01	5. 81	7 7 0	< 2	< 0. 5	2. 95	7	1 8 1	1 0	0. 7	2. 48	< 6	< 1	< 5	2. 21	3 8	0. 96	36 5	1. 69	0.0 27	1 6 8	1. 5	7. 7	< 3	8 5	< 0. 5	0. 21	7. 7	5 2	< 1	2 8	24 .5	4 4	1 0	6. 5	< 0. 02	< 0. 1	3	0. 59	
LS 13	Perfil márgen del Río Nazas RE MUESTRA EADO	631 164	2817 544	27 .2	1 5 0	4. 6	< 2	0. 5	8	< 0. 3	2 2	2 4	1 3	6 2	0. 02	4. 78	5 2 0	< 2	< 0. 5	4. 64	5	3 2 9	8	0. 5	2. 05	< 5	< 1	< 5	2. 18	3 8	0. 32	39 5	1. 55	0.0 31	1 4 1	4. 8	3. 8	< 3	1 9 6	< 0. 5	0. 21	10 .6	6 1	< 1	2 4	29 .8	4 8	2 1	6. 7	< 0. 02	< 0. 5	2. 6	0. 44	
LS 14	Margen de Río Nazas	646 263	2822 265	21 .3	2 5 0	2. 8	< 2	0. 6	1 0	0. 8	< 1	4 1	1 0	1 0 2	0. 03	5. 61	8 5 0	< 2	< 0. 5	4. 53	7	3 2	1 8	< 0. 2	2. 25	< 7	< 1	< 5	2. 11	4 5	0. 51	39 4	1. 42	0.0 46	1 2 4	3. 3	5. 7	< 3	3 3 5	< 0. 21	10 .7	4 3	< 1	1 9	27 .3	4 5	1 4	5. 1	< 0. 02	< 0. 5	2	0. 39		
LS 15	Centro del Cauce del Río Nazas	663 922	2839 979	16 .6	7 0	4. 1	< 2	0. 3	6	< 0. 3	2 7	2 2	1 4	4 1	< 0. 01	5. 6	8 9 0	< 2	< 0. 5	1. 4	2	3 4 9	7	0. 9	1. 65	< 4	< 1	< 5	2. 35	3 5	0. 18	25 1	1. 79	0.0 21	2 2 2	2. 8	3. 1	< 3	2 0 8	< 0. 17	10 .8	5 1	< 1	1 9	28 .5	4 3	1 5	4. 7	< 0. 02	< 0. 5	2	0. 33		
LS 16	Canal de flujo	636 898	2845 893	31 .6	6 6 0	4	< 2	< 0. 3	5	< 0. 3	9	2 9	7	5 4	< 0. 01	5. 98	4 6 0	< 4	< 0. 5	5. 05	< 1	2 4	9	0. 6	2. 13	< 7	< 1	< 5	2. 11	1 9	0. 29	53 7	2. 2	0.0 48	3 7 7	6. 7	2. 8	< 3	1 8 3	< 0. 27	22 .8	4 6	1 1	2 0	38 .7	6 5	3 0	5. 4	< 0. 02	< 0. 5	5	0. 4		
LS 18	Flujo	628 733	2838 998	14 .3	2 2 0	7. 2	< 2	< 0. 3	7	< 0. 3	0 4	3 4	1 3	5 9	< 0. 01	5. 23	5 5 0	< 8	< 0. 5	0. 23	< 1	0	0	2	1. 53	< 9	< 1	< 5	2. 66	3 4	0. 05	37 1	1. 94	0.0 08	5 3 5	1. 6	1	< 3	2 2 5	< 0. 1	39 .2	4 1	< 1	2 5	53 .3	9 9	2 7	6. 9	< 0. 02	< 0. 5	3. 6	0. 75		
LS 20	Sediment o de intrusivo	631 923	2847 059	16 .1	8 0	3 2	< 3	< 0. 3	3	< 0. 3	< 1	2 4	5	6 4	0. 01	5. 88	9 0 2	< 2	< 0. 5	8. 68	4	7 7	7	1. 4	2. 36	< 5	< 1	< 5	2. 41	1 9	0. 75	57 5	2	0.0 8	7 0	1. 3	5. 3	< 3	0 7 5	0. 19	10 .9	2 8	< 1	2 0	33 .7	5 8	1 2	5. 7	< 0. 02	< 0. 5	2	0. 19		
LS 25	Abanico aluvial de riolitas	628 569	2828 242	39 .2	5 5 0	3. 5	< 2	0. 4	1 3	0. 6	< 1	2 5	3 6	9 6	0. 04	5. 31	1 4 0	< 2	12 .3	9. 33	9	1 9	2 1	0. 8	2. 17	< 5	< 1	< 5	1. 88	4 1	0. 94	8 8	0. 7	0.0 98	4 2	4. 2	7. 6	< 3	2 6 5	< 0. 24	15 .6	5 0	< 1	2 5	30 .7	5 7	1 2	6. 2	< 0. 02	< 0. 5	3	0. 44		

ANEXOS

Análisis de aguas subterráneas

ID	X-WGS-84	Y-WGS-84	T°C-campo	ORP (mV)	pH-campo	CE-campo µS/cm	Alk (mg/l- CaCO3)-lab	TDS, mg/lit- lab-gravime	F(mg/l)	Na(mg/l)	K(mg/l)	Ca(mg/l)	Mg(mg/l)	Si(mg/l)	B(ppb)	Al(ppb)	P(ppb)	Li(ppb)	Sc(ppb)	Ti(ppb)	V(ppb)	Cr(ppb)	Mn(ppb)	Fe(ppb)	Co(ppb)	Ni(ppb)	Cu(ppb)	Zn(ppb)	Ga(ppb)	Ge(ppb)	As(ppb)	Se(ppb)	Br(ppb)	Rb(ppb)	Sr(ppb)	Y(ppb)	
LL01	675427	2850479	34.9	36.1	8.09	501	90.5	205	0.70	83.85	0.33	27.40	0.57	19.95	86.75	14.83	6.04	63.48	0.05	28.08	25.50	<0.01	2.80	8.88	0.03	0.03	<0.01	2.00	0.08	0.89	70.93	0.75	32.07	26.05	135.90	0.02	
LL02	675779	2850563	35.1	144.4	7.59	1769	76.0	732	0.43	190.88	3.28	158.01	2.75	26.51	125.05	4.58	4.88	168.19	0.14	289.67	14.78	<0.01	14.17	17.51	0.03	0.47	<0.01	7.67	0.05	0.95	38.70	0.70	85.51	240.84	1024.08	0.02	
LL03	676147	2850311	35.1	180.1	7.23	2712	64.0	1125	0.21	313.02	4.86	305.35	3.27	21.35	192.33	7.61	9.22	281.39	0.17	602.26	8.84	<0.01	47.76	17.78	<0.01	0.12	<0.01	4.65	0.03	0.77	15.24	0.88	139.66	316.62	1337.84	0.01	
LL04	674443	2850418	35.0	125.9	7.48	754	60.0	308	0.76	104.42	1.36	48.47	1.48	20.07	125.93	4.17	1.46	80.45	0.06	70.08	29.48	<0.01	12.45	13.52	<0.01	<0.01	<0.01	9.14	0.02	0.93	92.83	0.54	64.83	107.06	450.00	<0.01	
LL05	663198	2869753	30.7	104.0	7.64	578	108.0	254	1.44	103.92	0.70	19.52	0.75	21.60	202.38	1.75	4.50	101.13	0.08	30.05	54.05	<0.01	16.51	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.01	0.78	260.63	0.45	84.94	19.03	95.97	<0.01	
LL06	674832	2824461	32.5	167.5	8.11	378	96.0	160	0.72	63.49	0.55	15.00	0.80	23.46	109.20	2.77	7.33	43.87	0.02	19.08	25.61	<0.01	2.16	<0.01	0.01	14.42	<0.01	4.44	0.09	0.60	80.25	0.15	37.60	12.55	62.66	<0.01	
LL07	677386	2825290	29.7	129.8	7.55	1356	94.3	608	0.98	208.41	2.33	81.11	6.28	31.80	588.14	4.84	6.30	106.24	0.09	124.93	26.04	<0.01	11.04	2.66	0.01	1.42	<0.01	0.44	0.01	0.50	50.91	1.21	303.94	107.43	452.90	<0.01	
LL08	675796	2825363	33.1	90.5	8.13	320	96.0	134	0.68	54.11	0.52	11.93	4.40	22.80	69.00	2.03	8.69	43.36	0.02	14.19	13.43	<0.01	4.32	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.09	0.71	77.47	0.03	26.46	5.87	26.13	<0.01		
LL09	672502	2828353	31.9	93.5	7.60	342	76.0	149	0.45	52.75	1.48	22.09	0.88	27.53	59.00	1.34	6.66	43.33	<0.01	25.60	12.49	<0.01	2.10	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	1.77	0.05	0.43	37.34	0.12	34.32	18.00	90.97	<0.01	
LL10	665903	2831634	27.8	140.7	6.75	619	140.0	289	0.35	49.49	2.77	71.00	4.62	23.79	120.57	1.44	3.31	56.84	<0.01	114.56	7.81	1.86	0.66	<0.01	<0.02	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.36	30.94	0.68	143.93	147.77	617.80	<0.01	
LL11	647677	2831155	27.7	461.3	6.84	1066	188.0	500	0.61	74.72	4.17	102.94	29.28	21.72	184.61	1.92	8.88	61.67	0.05	178.51	4.73	<0.01	4.40	<0.01	0.04	0.63	<0.01	3.24	0.01	0.20	38.96	0.81	168.81	456.60	1941.60	<0.01	
LL12	628212	2821923	25.5	172.3	6.79	841	200.0	414	0.46	99.70	11.56	56.62	20.94	37.04	368.77	3.43	19.97	54.76	0.05	91.15	14.93	<0.01	0.37	<0.01	0.01	0.21	<0.01	8.24	<0.01	0.42	94.97	0.48	118.86	284.97	1120.58	0.02	
LL13	630489	2824010	27.3	192.4	6.76	3443	164.0	1515	0.34	375.65	9.13	234.64	105.31	19.99	1736.07	5.39	18.02	135.13	0.06	452.63	19.46	0.35	0.43	6.17	0.03	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.17	165.40	2.64	1329.69	985.21	5348.54	0.03
LL14	649793	2828838	27.5	185.4	6.80	1572	121.6	747	2.57	121.59	6.15	136.67	38.91	20.69	334.99	2.99	17.41	77.49	0.06	243.98	5.53	0.02	0.65	6.10	0.02	0.30	<0.01	6.02	<0.01	0.16	38.58	1.67	283.71	538.89	2270.21	0.01	
LL15	649324	2830474	24.8	155.9	6.95	852	257.9	779	2.25	150.60	7.14	193.19	48.44	19.35	569.67	4.81	12.73	93.67	0.05	383.29	5.92	0.29	1.08	11.53	0.05	0.52	<0.01	19.63	<0.01	0.19	13.57	1.23	284.73	652.19	2735.56	0.03	
LL16	640191	2834079	32.6	230.2	6.81	1206	174.7	491	2.99	51.12	3.75	103.33	37.84	18.16	138.29	2.26	1.89	49.92	0.03	183.59	4.97	<0.01	0.28	<0.01	<0.01	0.13	<0.01	14.29	<0.01	0.19	52.77	0.64	172.64	651.55	2759.55	<0.01	
LL17	647386	2831349	27.4	187.4	6.76	1233	178.9	529	2.58	88.84	4.72	113.13	34.11	20.84	200.48	2.07	18.16	62.67	0.05	188.11	4.73	<0.01	0.62	5.00	<0.01	0.16	<0.01	6.20	<0.01	0.15	37.66	1.31	212.85	455.32	1947.49	<0.01	
LL18	650793	2831164	24.9	191.1	6.34	2619	266.2	1419	1.50	228.65	9.39	282.35	72.01	16.93	903.70	6.06	12.67	115.46	0.08	724.88	3.69	0.38	2.86	35.95	0.08	0.29	<0.01	3.74	<0.01	0.18	11.18	2.47	498.22	923.77	3872.53	0.06	
LL19	651988	2830968	27.5	162.4	6.62	1783	187.2	826	0.56	90.74	4.75	177.94	47.86	17.99	379.99	0.77	10.69	69.84	0.08	388.92	4.08	<0.01	1.22	36.24	0.03	<0.01	<0.01	4.28	<0.01	0.14	23.72	1.30	278.86	843.05	3542.37	0.04	
LL20	650876	2830172	27.0	201.3	6.81	1163	178.9	523	0.59	80.87	4.72	103.66	29.69	17.26	198.63	6.64	44.33	67.95	0.02	177.93	4.91	<0.01	0.52	1.03	<0.01	0.21	<0.01	27.33	<0.01	0.16	29.74	1.28	231.14	383.60	1618.33	0.02	
LL21	653128	2827668	26.4	231.1	6.76	861	162.2	407	0.47	48.27	3.37	89.97	20.14	16.77	106.95	0.15	10.02	152.11	0.03	<0.01	0.14	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	4.57	<0.01	0.12	32.42	0.52	144.76	292.94	1221.83	<0.01		
LL22	651963	2827825	26.3	206.6	6.81	1139	187.2	519	0.69	84.10	4.84	100.12	27.55	17.12	190.29	1.67	19.34	62.49	0.01	163.85	4.70	<0.01	0.36	<0.01	<0.01	0.03	<0.01	5.34	<0.01	0.15	25.13	1.58	240.72	325.46	1352.73	0.02	
LL23	650556	2827589	26.3	221.4	6.72	1272	178.9	579	0.55	95.54	4.67	119.52	26.57	17.10	234.94	1.01	19.26	68.60	0.04	196.89	4.54	<0.01	0.35	<0.01	<0.01	0.02	0.14	<0.01	0.09	25.01	1.52	257.28	347.17	1458.56	0.02		
LL24	657653	2853791	26.6	161.9	6.83	2498	91.5	1144	0.48	256.77	3.39	194.15	23.54	31.77	351.73	3.20	19.12	157.52	0.08	384.11	15.34	0.78	14.36	9.85	0.07	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.27	46.95	5.77	868.41	322.82	1365.50	0.02
LL25	657761	2843475	36.4	110.9	7.78	1601	74.9	604	4.72	192.21	3.55	59.54	1.08	18.09	1570.42	2.62	2.68	267.18	0.07	75.94	45.35	<0.01	2.00	1.92	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.04	64	331.88	0.04	144.85	684.43	2895.79	0.01	
LL26	647415	2843192	25.6	220.9	6.56	4152	129.0	1921	0.55	251.95	10.61	347.59	109.47	19.71	1096.52	10.77	14.55	148.53	0.11	1049.51	10.70	0.55	0.21	26.12	0.03	0.03	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.21	40.83	4.11	1893.66	2621.77	14495.61	0.09
LL27	646486	2822469	24.3	223.0	6.80	432	158.1	208	0.49	29.33	3.15	57.42	6.56	12.40	49.59	21.62	14.51	29.16	<0.01	82.10	4.48	<0.01	6.21	<0.01	0.03	0.10	<0.01	<0.01	<0.01	0.01	12	18.25	1.18	44.51	86.98	353.69	0.03
LL28	630580	2825456	31.3	194.3	6.69	2916	220.5	1198	0.38	244.94	7.50	194.78	56.89	17.89	1023.42	3.03	4.66	92.44	0.06	395.06	3.96	<0.01	0.34	25.20	0.02	1.37	<0.01	21.86	<0.01	0.01	28	66.48	1.20	586.27	760.59	3167.08	0.08
LL29	629791	2826306	30.8	156.7	6.67	3650	178.9	1503	0.30	259.49	9.01	303.23	77.53	19.24	718.91	5.28	8.05	73.75	0.05	655.45	4.85	<0.01	1.61	15.71	0.03	0.09	<0.01	<0.01	<0.01	0.01	14	45.95	2.35	1578.36	850.96	3535.94	0.07
LL30	626338	2825792	29.3	197.6	6.97	1444	187.2	619	0.36	53.78	6.31	136.75	32.90	31.85	123.65	<0.01	8.58	44.85	0.05	243.51	6.03	<0.01	3.42	18.32	0.02	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.23	38.95	1.17	767.16	513.07	2012.35	0.02
LL31	625641	2825250	28.4	196.5	6.82	1322	216.3	576	0.40	92.45	2.72	124.62	28.21	16.58	261.69	1.18	7.33	26.76	0.01	203.39	5.54	<0.01	0.21	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.11	41.04	0.78	274.63	220.61	925.48	<0.01	
LL32	627554	2838104	21.3	296.4	6.92	575	141.4	281	0.26	6.20	1.45	86.33	5.31	16.87	23.11	1.01	191.35	0.96	<0.01	154.58	2.09	<0.01	5.74	<0.01	0.06	0.09	<0.01	<0.01	<0.01	0.03	22.19	0.11	42.97	41.79	238.48	<0.01	
LL33	652502	2825153	23.7	130.4	6.79	725																															

ANEXOS

Zr(ppb)	Nb(ppb)	Mo(ppb)	Ru(ppb)	Pd(ppb)	Ag(ppb)	Cd(ppb)	Sn(ppb)	Sb(ppb)	Te(ppb)	I(ppb)	Cs(ppb)	Ba(ppb)	La(ppb)	Ce(ppb)	Pr(ppb)	Nd(ppb)	Sm(ppb)	Eu(ppb)	Gd(ppb)	Tb(ppb)	Dy(ppb)	Ho(ppb)	Er(ppb)	Yb(ppb)	Lu(ppb)	HF(ppb)	Ta(ppb)	W(ppb)	Re(ppb)	Os(ppb)	Pt(ppb)	Hg(ppb)	Tl(ppb)	Pb(ppb)	Bi(ppb)	Th(ppb)	U(ppb)	Be(ppb)	Rb(ppb)	K(ppb)	Ir(ppb)	OXIGEN 18 (‰)	DEUTERIUM (‰)		
0.10	0.20	1.70	0.01	0.03	<0.01	0.02	0.02	1.32	0.13	37.71	0.27	4.87	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.04	4.70	0.06	0.14	0.03	0.18	0.12	<0.01	<0.01	0.04	1.72	0.04	0.02	0.03	-7.54	-59.74			
0.17	0.15	2.06	0.01	0.04	<0.01	<0.01	<0.01	0.75	0.16	70.88	0.77	32.90	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	3.04	0.04	<0.01	0.02	0.15	0.11	<0.01	<0.01	0.05	1.98	0.04	0.02	0.02	-7.84	-60.81			
0.16	0.11	2.80	0.01	0.04	<0.01	<0.01	<0.01	0.56	0.13	91.44	0.86	41.36	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	1.82	0.03	<0.01	<0.01	0.10	0.10	<0.01	<0.01	0.04	5.72	0.08	<0.01	<0.01	8.00	-61.46				
0.14	0.11	2.48	0.01	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	1.27	0.12	109.16	0.35	18.32	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	4.57	0.02	<0.01	<0.01	0.17	0.05	<0.01	<0.01	5.24	<0.01	<0.01	<0.01	5.24	<0.01	<0.01	-7.86	-60.42		
0.17	0.12	5.47	0.00	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	2.04	0.07	168.93	0.15	8.61	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.06	0.02	15.73	0.03	<0.01	<0.01	0.41	0.03	<0.01	<0.01	0.02	2.27	0.04	<0.01	<0.01	-8.13	-61.87		
0.11	0.07	2.04	0.00	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	1.09	0.11	68.11	0.15	2.12	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	5.11	0.01	<0.01	<0.01	0.14	0.02	<0.01	<0.01	<0.01	1.92	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	-7.39	-58.79		
0.15	0.11	7.96	0.00	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	1.09	0.06	244.58	0.15	16.72	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.05	0.02	4.48	0.05	<0.01	<0.01	0.16	0.03	<0.01	<0.01	0.06	8.23	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	-7.97	-62.25	
0.07	0.05	1.60	0.00	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	1.05	0.02	37.95	0.11	1.58	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	4.07	0.01	<0.01	<0.01	0.06	0.02	<0.01	<0.01	<0.01	1.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	-7.36	-58.62		
0.04	0.04	1.35	0.00	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.77	<0.01	30.95	0.12	4.76	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	2.45	0.01	<0.01	<0.01	0.04	0.02	<0.01	<0.01	<0.01	1.61	0.10	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	-7.42	-59.35	
0.07	0.04	1.25	0.00	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.41	0.03	24.21	0.93	43.83	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	1.47	0.05	<0.01	<0.01	0.03	0.02	<0.01	<0.01	<0.01	6.54	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	-7.49	-59.56	
0.14	0.05	4.08	0.00	0.04	<0.01	<0.01	<0.01	0.79	0.06	35.41	3.20	31.52	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	1.35	0.10	<0.01	<0.01	0.01	0.72	<0.01	<0.01	<0.01	8.51	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	-7.50	-59.10	
0.11	0.05	3.81	0.00	0.02	<0.01	<0.01	<0.01	0.26	0.03	124.53	1.55	43.42	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	1.34	0.05	<0.01	<0.01	0.03	0.02	<0.01	<0.01	0.01	10.03	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	-7.02	-55.11	
0.18	0.04	4.43	0.00	0.12	<0.01	<0.01	<0.01	0.34	0.03	195.60	2.04	30.15	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.78	0.42	<0.01	<0.01	0.00	0.03	<0.01	<0.01	0.02	17.06	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	-7.51	-57.90	
0.06	0.04	4.91	0.00	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.75	0.04	52.93	3.40	49.62	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	1.10	0.12	<0.01	<0.01	0.01	0.72	<0.01	<0.01	0.01	12.05	0.04	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	-7.66	-60.59	
0.13	0.03	2.40	0.00	0.06	<0.01	0.75	0.18	0.41	0.04	77.88	0.18	64.94	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.72	0.13	<0.01	<0.01	<0.01	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	21.87	0.04	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	-7.31	-58.45	
0.12	0.04	4.54	0.00	0.06	<0.01	0.02	<0.01	0.82	0.05	34.03	5.82	39.86	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	1.47	0.11	<0.01	<0.01	<0.01	0.97	<0.01	<0.01	0.01	8.10	0.07	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	-8.29	-63.41	
0.12	0.03	5.05	0.00	0.04	<0.01	<0.01	<0.01	0.76	0.08	36.46	3.06	47.30	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.91	0.12	<0.01	<0.01	0.01	0.68	<0.01	<0.01	<0.01	8.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	-7.72	-61.29
0.14	0.03	1.65	0.00	0.10	<0.01	<0.01	<0.01	0.37	0.01	107.80	0.50	38.74	0.02	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.64	0.18	<0.01	<0.01	0.01	0.04	<0.01	<0.01	0.01	34.57	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	-7.01	-57.31	
0.10	0.03	4.23	0.00	0.08	<0.01	<0.01	<0.01	0.62	0.07	58.63	3.16	31.32	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.85	0.14	<0.01	<0.01	<0.01	0.78	<0.01	<0.01	0.01	15.02	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	-7.78	-60.71	
0.12	0.03	4.22	0.00	0.03	<0.01	<0.01	<0.01	0.76	0.01	33.59	2.22	61.28	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.83	0.12	<0.01	<0.01	<0.01	0.53	<0.01	<0.01	<0.01	7.34	0.04	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	-7.91	-61.99	
0.10	0.03	3.04	0.00	0.03	<0.01	<0.01	<0.01	0.58	0.05	22.91	2.24	57.35	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.79	0.07	<0.01	<0.01	0.34	<0.01	<0.01	<0.01	5.27	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	-7.52	-59.62		
0.03	0.04	2.82	<0.01	0.03	<0.01	<0.01	<0.01	0.70	0.01	28.02	1.94	70.55	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.02	0.01	0.79	0.13	<0.01	0.02	0.46	<0.01	<0.01	0.02	6.43	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	-7.89	-61.58
0.07	0.03	2.72	<0.01	0.03	<0.01	<0.01	<0.01	0.66	<0.01	35.09	2.06	70.31	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.73	0.11	<0.01	<0.01	0.44	<0.01	<0.01	<0.01	8.83	0.04	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	-7.73	-60.47		
0.08	0.03	5.09	<0.01	0.03	<0.01	<0.01	<0.01	0.75	<0.01	66.61	0.17	45.15	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	1.29	0.24	<0.01	<0.01	0.01	0.05	<0.01	<0.01	0.01	17.81	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	-7.74	-61.35
0.28	0.13	7.99	<0.01	0.07	<0.01	<0.01	<0.01	0.58	0.03	221.07	0.12	45.50	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.23	0.05	9.29	0.03	<0.01	<0.01	0.19	<0.01	<0.01	<0.01	0.04	1.88	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	-8.31	-64.87
0.12	0.02	38.22	<0.01	0.34	<0.01	0.03	<0.01	0.38	<0.01	416.65	0.40	31.70	0.04	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.98	1.33	<0.01	<0.01	0.04	0.03	<0.01	<0.01	0.02	33.80	<0.01	<0						

ANEXOS

LL61	679352	2794778	29.7	183.3	6.82	829	187.2	342	0.62	49.52	2.19	71.24	20.67	10.62	137.34	1.94	2.55	50.87	0.05	102.85	5.39	< 0.01	0.09	< 0.01	0.03	0.03	< 0.01	< 0.01	0.02	0.12	23.13	0.60	121.61	154.98	646.61	0.02	0.09	
LL62	678927	2809004	29.8	174.0	6.73	1621	191.4	693	1.67	106.13	4.47	114.95	38.15	14.99	347.67	5.99	8.46	81.75	0.08	216.19	6.95	< 0.01	0.56	3.22	< 0.01	0.36	< 0.01	11.94	< 0.01	0.19	61.07	0.85	260.03	806.70	3357.60	0.02	0.19	
LL63	683675	2808695	36.4	161.1	6.69	1850	149.8	683	1.78	53.41	4.00	155.90	41.06	19.30	346.85	5.77	3.98	60.17	0.08	310.02	5.69	< 0.01	1.46	11.53	< 0.01	0.26	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.16	47.68	0.60	145.78	879.33	4737.65	0.02	0.16	
LL64	666265	2853100	26.6	170.7	6.70	1508	187.2	671	0.41	103.38	1.68	144.96	11.70	29.10	124.33	7.27	6.14	127.77	0.09	284.74	11.87	< 0.01	52.02	15.03	0.06	0.04	< 0.01	0.04	< 0.01	0.36	34.67	3.09	346.77	178.56	749.76	0.03	0.15	
LL65	659471	2860076	27.8	164.2	7.07	2111	145.6	1536	0.32	292.22	5.21	313.16	20.02	21.23	644.86	16.15	28.49	285.99	0.18	946.25	13.91	0.98	138.99	36.75	0.08	1.27	< 0.01	1.47	< 0.01	0.44	21.99	11.30	766.81	404.93	1701.80	0.06	0.15	
LL66	664834	2859324	32.8	135.9	7.28	1768	70.7	693	0.53	172.07	2.95	179.03	2.50	21.26	222.29	4.24	1.90	169.14	0.07	258.24	19.30	< 0.01	44.55	5.38	< 0.01	0.08	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.62	40.68	4.60	557.10	124.89	516.65	0.02	0.14
LL67	671783	2850886	25.9	178.2	6.76	811	208.0	411	0.23	73.52	2.19	94.68	4.56	28.15	164.39	5.05	9.98	109.78	0.05	162.83	9.68	< 0.01	65.58	< 0.01	0.02	0.21	< 0.01	24.41	< 0.01	0.53	12.90	2.49	188.54	99.17	418.85	0.03	0.11	
LL68	675265	2850003	35.0	166.2	7.58	1166	79.0	434	0.02	101.89	1.61	75.45	2.70	18.03	122.42	5.06	5.71	95.58	0.05	115.56	26.25	< 0.01	4.82	6.89	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.04	0.71	86.63	0.15	51.09	208.61	860.12	< 0.01	0.14
LL69	679804	2854556	32.9	112.8	7.54	1135	74.9	442	1.09	107.40	1.75	87.74	0.57	20.00	116.08	20.13	11.83	97.79	0.05	128.51	22.84	< 0.01	17.93	6.85	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.05	0.92	91.73	0.36	85.24	77.20	321.85	0.02	0.16	
LL70	670192	2834556	25.3	164.5	6.62	1527	170.6	667	0.36	81.97	3.84	166.63	13.24	24.65	272.10	2.89	12.32	84.61	0.07	331.43	5.50	3.22	5.96	24.67	0.05	0.04	< 0.01	2.36	< 0.01	0.32	14.73	2.64	537.19	236.73	989.60	0.02	0.10	
LL71	623141	2833220	24.7	130.4	7.11	1882	262.1	766	1.68	234.70	3.50	74.89	22.33	31.04	793.97	6.64	33.33	171.98	0.08	109.60	64.54	< 0.01	1.90	< 0.01	0.02	< 0.01	< 0.01	33.56	< 0.01	0.31	86.78	0.67	195.38	549.62	2290.43	0.01	0.17	
LL72	624780	2833269	25.1	174.1	6.98	2906	153.9	1547	3.74	270.77	28.15	265.31	89.22	29.46	856.73	20.35	13.07	3324.46	0.15	657.13	7.07	< 0.01	25.71	85.69	0.14	0.64	< 0.01	1.96	0.01	7.43	9798.48	11.42	1482.93	1750.44	9088.62	0.05	0.41	
LL73	635133	2818406	20.9	186.3	6.55	641	237.1	315	2.46	38.40	3.24	75.65	12.90	20.48	101.84	1.93	58.31	39.34	0.03	121.40	4.95	< 0.01	1.75	< 0.01	0.02	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.01	0.12	88.76	0.33	75.85	104.79	426.63	0.02	0.11	
LL74	635005	2818409	23.1	189.2	6.73	531	162.2	211	1.99	27.06	2.61	58.43	7.42	12.66	55.87	89.74	34.55	25.64	0.04	89.16	5.14	< 0.01	2.32	27.68	0.06	0.36	< 0.01	< 0.01	0.04	0.07	44.99	0.27	60.41	65.78	320.94	0.10	0.19	
LL74	719715	2802120	29.5	163.3	6.85	5148	174.7	2146	3.57	486.23	19.98	248.58	87.63	17.63	474.08	7.62	9.66	356.96	0.10	566.97	4.14	< 0.01	2.83	56.07	0.08	0.89	< 0.01	6.87	< 0.01	0.23	68.02	0.53	665.61	1098.33	5862.51	0.03	0.22	
LL75	705226	2803475	29.0	171.9	6.84	2085	178.9	876	3.41	195.14	7.58	123.53	39.94	16.50	239.36	5.19	7.90	116.81	0.06	195.86	8.03	< 0.01	0.68	2.04	< 0.01	0.05	< 0.01	10.22	< 0.01	0.17	63.23	0.42	379.10	574.83	2390.40	0.01	0.17	
LL76	694331	2819319	29.6	167.1	7.16	1417	137.3	587	6.73	169.31	2.88	63.81	5.98	24.44	670.62	7.37	7.85	171.96	0.06	98.27	56.77	< 0.01	28.34	1.40	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.30	217.15	0.17	183.05	176.70	734.34	0.01	0.20	
LL77	691260	2815569	28.5	177.1	7.03	1887	183.0	807	4.11	213.81	5.11	81.76	23.87	18.13	715.67	6.84	10.96	232.79	0.05	137.02	55.35	< 0.01	62.50	8.49	0.04	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.01	0.16	129.82	0.85	521.15	406.81	1692.42	0.02	0.14
LL78	690042	2821689	33.2	183.3	7.78	506	145.6	256	7.55	102.59	1.08	21.78	0.65	21.20	365.69	6.83	7.44	93.90	0.03	173.20	12.76	< 0.01	63.57	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.03	0.58	272.45	< 0.01	45.77	25.01	132.09	< 0.01	0.13
LL79	690552	2825390	30.1	170.4	7.75	927	104.0	379	4.82	115.62	1.31	27.28	1.56	21.95	292.22	4.32	12.53	105.78	0.05	44.33	27.71	< 0.01	30.77	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.01	0.45	140.11	0.13	122.29	42.79	232.79	0.01	0.16
LL80	692208	2826626	31.9	154.3	7.41	1319	91.5	569	4.65	115.38	2.04	98.98	2.81	21.25	271.09	3.38	70.88	90.04	0.04	182.73	6.74	< 0.01	28.08	2.96	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.44	184.23	0.00	73.99	212.92	881.66	0.01	0.15
LL81	692650	2823567	27.0	172.0	7.02	4951	141.4	2176	4.56	627.45	7.35	217.28	35.97	26.38	1808.17	10.65	14.93	290.32	0.09	500.11	68.70	< 0.01	235.70	21.65	0.10	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.30	100.28	3.34	1666.28	644.11	2686.99	0.05	0.25	
LL82	634987	2821573	22.7	220.1	6.70	3020	424.3	1444	5.56	357.11	10.25	146.96	47.97	24.43	1146.14	5.07	47.69	267.11	0.10	320.46	15.77	< 0.01	33.31	< 0.01	0.06	0.03	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.11	52.20	1.09	510.20	467.90	1924.12	0.05	0.25	
LL83	625966	2817811	25.9	217.9	6.86	1868	199.7	835	1.39	79.26	4.16	187.15	65.45	19.37	192.05	15.53	19.19	70.20	0.07	379.43	10.24	< 0.01	0.88	4.04	0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.10	67.28	1.23	548.54	430.43	1793.81	0.03	0.14
LL84	625200	2817677	28.7	166.1	6.91	742	212.2	316	1.15	36.63	2.96	81.95	17.48	13.84	151.16	3.77	3.27	21.19	0.03	119.21	4.95	< 0.01	0.32	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.70	< 0.01	0.10	44.48	0.31	68.36	145.83	595.54	< 0.01	0.11
LL85	649575	2792067	30.3	209.4	6.97	1605	233.0	614	3.08	151.24	7.57	79.89	27.57	14.45	417.00	5.67	2.46	141.12	0.03	111.83	10.40	< 0.01	0.67	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	9.45	< 0.01	0.22	48.25	0.73	378.39	320.91	1322.38	0.01	0.14	
LL86	651632	2792798	27.6	207.0	6.71	3027	262.1	1407	3.89	289.96	12.83	161.05	65.42	14.88	1100.90	9.94	23.10	324.45	0.08	356.49	8.78	< 0.01	7.99	5.58	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	4.32	< 0.01	0.29	31.56	1.75	1506.39	727.95	2999.27	0.03	0.22
LL87	654413	2792241	28.5	234.1	6.83	1834	237.1	762	4.76	180.63	9.14	123.53	32.57	18.08	488.56	4.16	7.70	194.85	0.05	185.04	9.52	< 0.01	0.46	< 0.01	< 0.01	0.09	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.31	34.63	0.94	605.16	370.82	1512.05	0.01	0.16	
LL88	651226	2793997	27.9	229.4	6.59	3547	299.5	1539	3.49	309.75	13.24	183.66	71.23	13.49	1051.26	15.29	11.63	335.49	0.05	387.81	7.90	< 0.01	0.75	7.68	0.08	0.13	< 0.01	16.18	< 0.01	0.26	27.54	1.79	1553.86	765.66	3186.90	0.02	0.23	
LL89	661836	2861529	29.5	167.2	7.40	1406	105.6	590	0.44	122.29	3.30	125.19	5.78	22.87	175.40	6.05	14.12	122.28	0.04	196.80	20.05	< 0.01	40.83	< 0.01	0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.41	33.26	4.59	379.04	126.42	524.37	0.02	0.14	
LL90	662874	2843477	23.7	196.5	6.73	1102	369.7	523	0.28	67.32	4.64	149.47	12.84	25.32	216.84	3.01	16.30	80.16	0.07	241.20	5.50	0.40	0.40	< 0.01	0.02	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.24	11.03	2.57	183.91	177.93	737.92	0.03	0.10	
LL91	664239	2842090	27.3	196.3	7.05	726	222.5	315	0.49	32.80	1.81	86.09	7.74	31.27	97.70	5.18	9.98	52.59	0.09	141.17	6.83	0.80	0.65	< 0														

ANEXOS

[illegible]

UASLP- 2. METODOLOGÍA DE CARACTERIZACIÓN DE MATRICES AMBIENTALES

Extracciones secuenciales

As rocaS

Muestra	E1F	E2F	E3F	E4F	E5F	E6F	E7F	Suma	Residual	Total
LR03 Endoskarn	2.42931E-05	1.06421793	0.06145617	1.42012073	0.18899876	6.77545503	0.00099798	9.51127088	-0.00127088	9.51
LR14 Inimbrita Fm. Nazas	0.720237992	1.84005434	0.12539737	5.44684431	0.97819709	6.67122193	0.00032994	15.782283	15.217717	31
LR18 Granodiorita	0.220526464	1.16713117	0.02588186	2.03045618	0.37957616	1.33271211	5.0239E-05	5.15633418	3.84366582	9
LR20 Riolita Vallecillos	0.904316853	5.53327944	0.11110009	2.93713836	2.19035316	6.20869564	0.00242052	17.8873041	81.1126959	99
LR21 Toba riolítica Vallecillos	3.25672674	6.93532298	0.17617324	2.34523285	3.9431952	43.7399892	0.00414893	60.4007892	5.59921084	66
LR22	2.431866143	130.033857	0.87406626	11.9660663	39.479828	122.177942	0.1187108	307.082336	2608.91766	2916
LR23 Mineralización oxidada	12.64434315	410.989173	3.05882078	42.2183375	29.9217734	172.322442	0.28685503	671.441745	3458.55826	4130
LR20-BI	0.843991978	4.76286316	0.12035508	2.74020592	2.08505101	4.29874233	0.00097286	14.8521823	84.1478177	99
LR21-BI	3.376664204	6.30040668	0.18261425	2.37445293	3.82132334	48.5294152	0.00622173	64.5910983	1.40890169	66

F⁻ rocas

Muestra	E1F	E2F	E3F	E4F	E5F	E6F	E7F	Suma	Residual	Total
LR03 Endoskarn	31.5960505	50.9936258	19.5225597	5.19935008	233.970754	0.67791526	15.3406593	357.300914	1342.69909	1700
LR14 Ignimbrita Fm. Nazas	4.15894534	3.979852	0.91039114	0.48753187	8.53180772	0.12715627	458.624128	476.819812	0	477
LR18 Granodiorita	5.73176059	2.69612432	0.75890907	13.8301192	42.4389939		539.68254	605.138447	594.861553	1200
LR20 Riolita Vallecillos	10.8342686	2.89312882	0.71081182	0.76568151	16.4858461		410.767697	442.457434	57.5425662	500
LR21 Toba riolítica Vallecillos	5.22986713	2.36791217	1.26504897	0.58885909	4.24178155		417.080437	430.773906	0	431
LR22	4.39862543	2.49921899	0.79475164	0.59981256	4.59856295		313.470993	326.361965		
LR23 Mineralización oxidada	4.51323015	3.74438342	1.18322516	0.63654518	2.77084373			12.8482277	67.1517723	80
LR20-BI	10.499002	2.59481038	0.6511976	0.77345309	11.2275449		9.54274354	35.2887515	464.711248	500
LR21-BI	5.55861035	3.04923769	1.2571857	0.53736566	4.62384404		335.714286	350.740529	0	351

ANEXOS

U rocas

Muestra	E1F	E2F	E3F	E4F	E5F	E6F	E7F	Suma	Residual	Total
LR03 Endoskarn	0.01295933	0.0103502	0.04799948	0.30798943	0.04678216	0.51922791	0.00033441	0.94564292	3.95435708	4.9
LR14 Inimbrita Fm. Nazas	0.010139	-0.00012767	0.00468214	0.02064348	0.01133552	0.03516923	9.1023E-06	0.0818508	1.8181492	1.9
LR18 Granodiorita	0.01261228	0.00372224	0.00892063	0.22439804	0.03474437	2.4112434	2.5314E-05	2.69566628	6.50433372	9.2
LR20 Riolita Vallecillos	0.02382763	-0.00022738	0.00235566	0.03462023	0.01031487	0.19666265	1.4152E-05	0.26756781	6.83243219	7.1
LR21 Toba riolítica Vallecillos	0.03339503	-0.00010909	0.00323946	0.02430558	0.02286153	0.45997659	8.6378E-06	0.54367773	4.65632227	5.2
LR22	0.00624232	-0.00039482	0.00445865	0.01901119	0.00734756	0.01399444	2.4021E-06	0.05066174		
LR23 Mineralización oxidada	0.00868292	-7.9511E-05	0.01308418	0.03039685	0.0179792	0.02823125	1.6721E-05	0.09831161	0.40168839	0.5
LR20-BI	0.0226615	-0.00031138	0.00337434	0.03003999	0.00943563	0.12874503	9.9646E-06	0.19395508	6.90604492	7.1
LR21-BI	0.03321072	-0.00035395	0.00312841	0.02431694	0.02155559	0.41228198	1.7905E-05	0.49415759	4.70584241	5.2

As sedimentos

ANEXOS

Muestra	E1F	E2F	E3F	E4F	E5F	E6F	E7F	Suma	Residual	Total
LS01 Intrusivo El Sarnoso	0.52649326	15.6406795	0.22864936	4.66765279	5.36217839	0.35547973	0.00018194	26.781315	73.305052	100
LS07 arroyo Jaboncillo-La Rosita	1.01994577	1.68786563	0.03861564	3.50672561	0.91895805	0.1737525	0.00020056	7.34606376	10.5139362	18
LS08 arroyo poblado La Mina	619.998758	1.46894622	0.05838204	2.45044031	0.69065859	0.0729781	3.0262E-05	624.740194	-0.74019388	624
LS13 márgen Río Nazas	0.35860965	5.18511824	0.14701024	4.17144796	1.0439508	0.35917699	1.0077E-05	11.265324	15.071676	26
LS14 márgen río Nazas	1.54418298	2.72784809	0.07359704	4.06149807	0.80765386	0.19016719	6.1126E-05	9.40500834	22.5949917	32
LS15 márgen río Nazas	0.55033511	2.16339562	0.07125245	3.65033636	0.53439165	0.16147516	6.0009E-06	7.13119235	341.868808	349
LS16 ccanal del flujo	0.29072256	4.68260042	0.10783099	4.45445877	1.86092472	0.14096061	4.0628E-05	11.5375387	212.462461	224
LS01-BI	0.4722347	15.3262418	0.16869002	4.75170386	6.43382354	0.26096212	5.0436E-05	27.4137064	72.6662936	100
LS14-BI	1.54632507	2.60338196	0.07010034	3.87825697	0.88985596	0.18180579	1.0155E-05	9.16973624	22.8302638	32

F⁻ sedimentos

Muestra	E1F	E2F	E3F	E4F	E5F	E6F	E7F	Suma	Residual	Total
LS01 Intrusivo El Sarnoso	4.63536464	5.89410589	2.01548452	1.96553447	46.953047	0.11888112	19.4477318	81.0301493	58.9698507	140
LS07 arroyo Jaboncillo-La Rosita	6.67958253	2.10986813	0.93994125	1.5424036	7.39953753		13.7574553	32.4287883	117.571212	150
LS08 arroyo poblado La Mina	8.50140318	3.69192392	1.24727159	0.99781727	105.269722	0.31930153	12.8458498	132.87329	147.12671	280
LS13 márgen Río Nazas	22.3986001	5.97462659	0.85994625	0.30998063	24.9734392		9.41641939	63.9330121	86.0669879	150
LS14 márgen río Nazas	8.87944503	2.28235735	1.54490344	1.93487907	14.0991188		9.8630137	38.6037174	211.396283	250
LS15 márgen río Nazas	22.9813277	3.07250359	0.42965091	0.15787173	16.6115032		8.7250996	51.9779567	18.0220433	70
LS16 ccanal del flujo	51.3935758	10.8736408	1.14485689	0.50993626	244.219473	0.15318085	11.1481845	319.442848	340.557152	660
LS01-BI	4.9378397	5.94739801	1.57930905	1.63928281	38.7330543	0.9056038	10.7114625	64.4539501	75.5460499	140
LS14-BI	8.61730709	2.31177757	1.58200562	2.01936895	15.795064		17.6643768	47.9899001	202.0101	250

ANEXOS

U sedimentos

Muestra	E1F	E2F	E3F	E4F	E5F	E6F	E7F	Suma	Residual	Total
LS01 Intrusivo El Sarnoso	0.00275383	0.00079023	0.27836198	0.10864548	0.01519929	0.06179766	0.01114561	0.47869409	1.67830591	2.16
LS07 arroyo Jaboncillo-La Rosita	0.01963397	-2.0416E-05	0.12707573	0.03743216	0.00865195	0.01216919	0.00508335	0.21002593	2.79297407	3.00
LS08 arroyo poblado La Mina	0.03713478	0.00087303	0.14574042	0.05271252	0.03196649	0.10245294	0.00584237	0.37672254	3.38427746	3.76
LS13 márgen Río Nazas	0.03973027	0.00028357	0.24582947	0.08002496	0.0234254	0.01969324	0.00983379	0.41882071	3.61217929	4.03
LS14 márgen río Nazas	0.03086708	0.0040439	0.40572703	0.03917314	0.0127877	0.00665608	0.0162301	0.51548502	4.58451498	5.10
LS15 márgen río Nazas	0.05436458	9.0813E-06	0.17961616	0.09646209	0.01737505	0.01462632	0.00719048	0.36964376	4.33035624	4.70
LS16 ccanal del flujo	0	0.00020418	0.36045189	0.11712146	0.0583571	0.08436488	0.01441988	0.63491939	4.76508061	5.40
LS01-BI	0.00207405	0.00135724	0.23362516	0.09019792	0.01758842	0.04663715	0.00934909	0.40082903	1.75617097	2.16
LS14-BI	0	0.00375654	0.3844925	0.03481428	0.01313404	0.00602719	0.01538451	0.45760906	4.64239094	5.10

Difracción de Rayos X

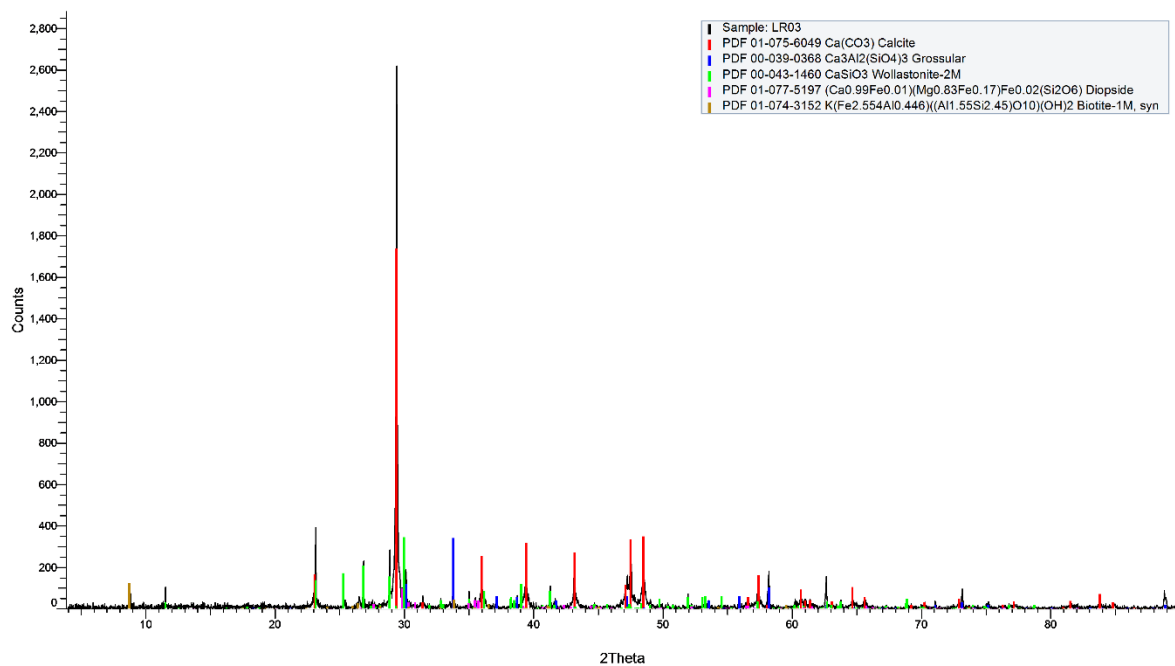


Ilustración 42. Espectro de la roca LR03.

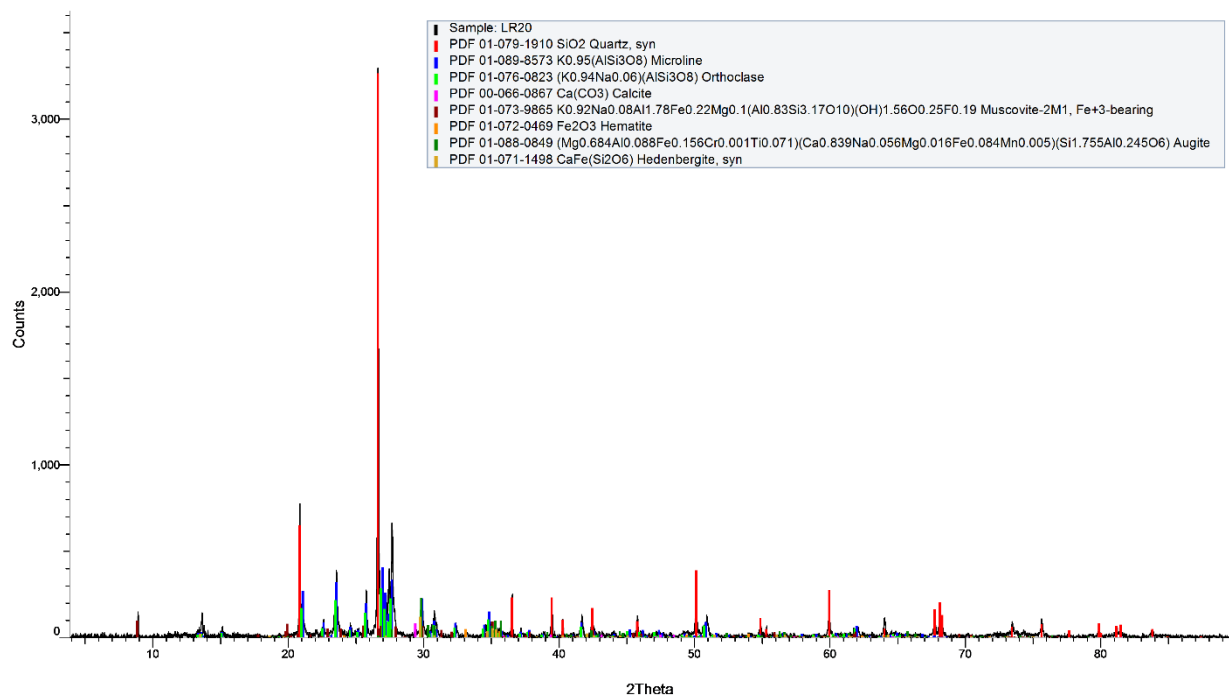


Ilustración 43. Espectro perteneciente a la riolita Vallecillos LR20.

ANEXOS

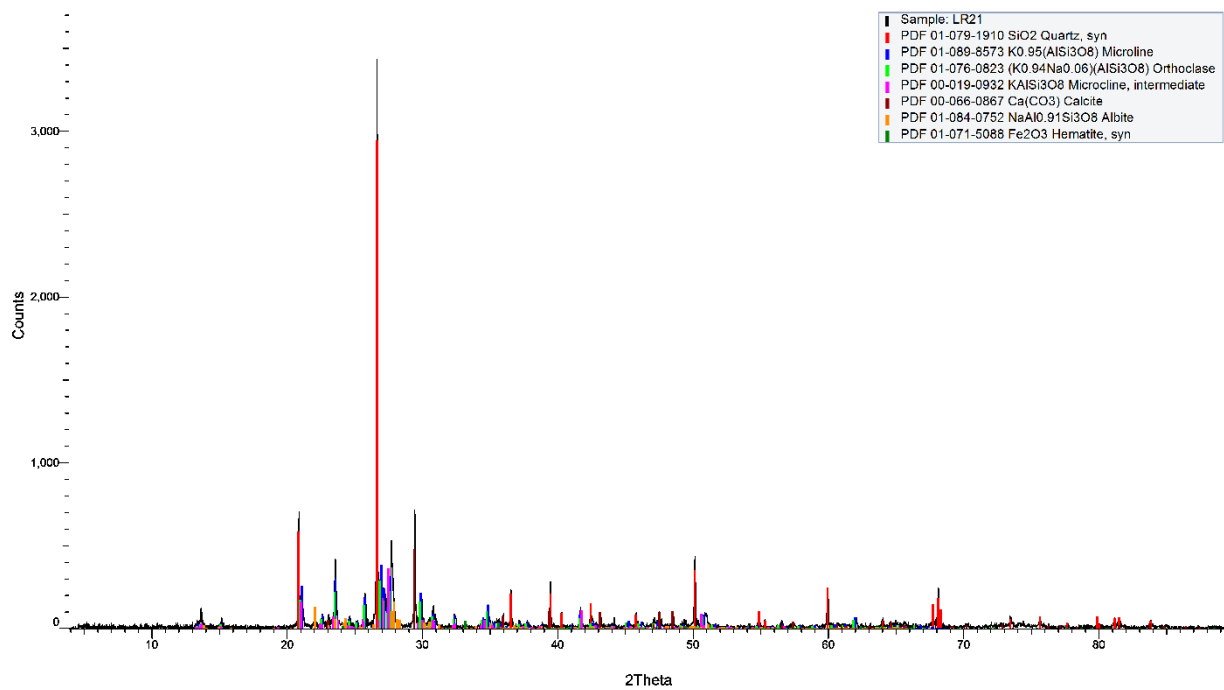


Ilustración 44. DRX de la toba riolítica LR21.

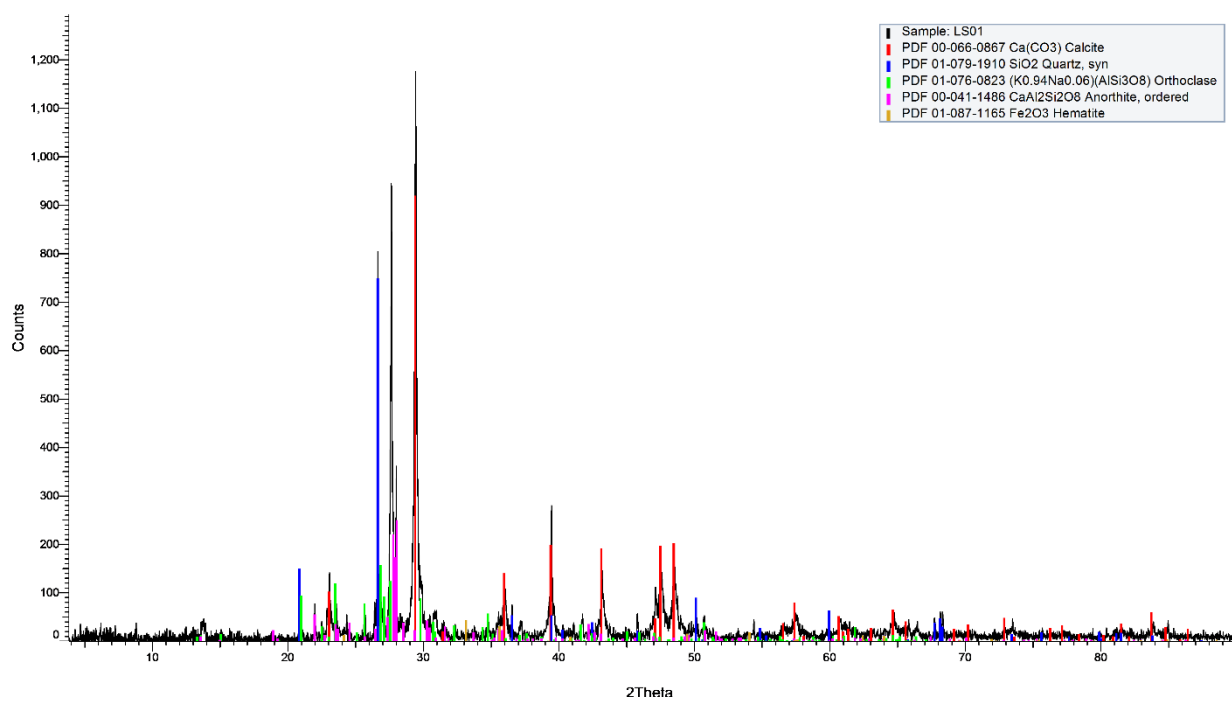


Ilustración 45. Espectro del sedimento LS01, junto al intrusivo El Sarnoso.

ANEXOS

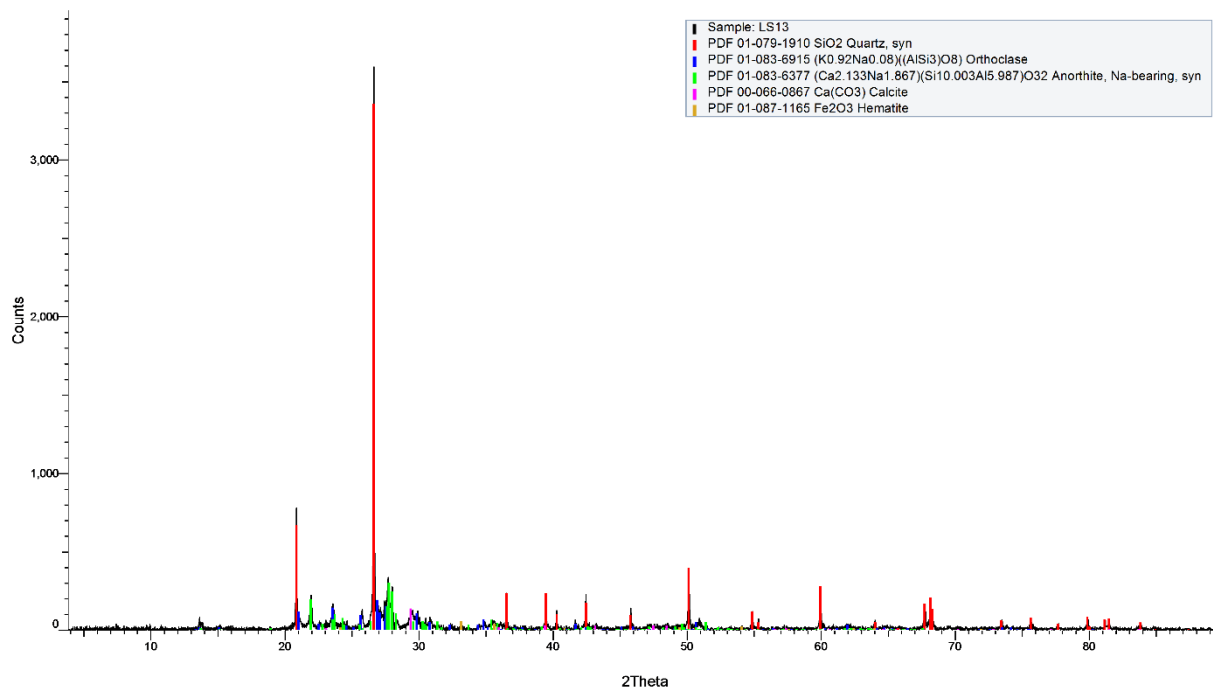


Ilustración 46. Espectro del sedimento LS13, el nacimiento del Río Nazas cerca del Cañón de Fernández.

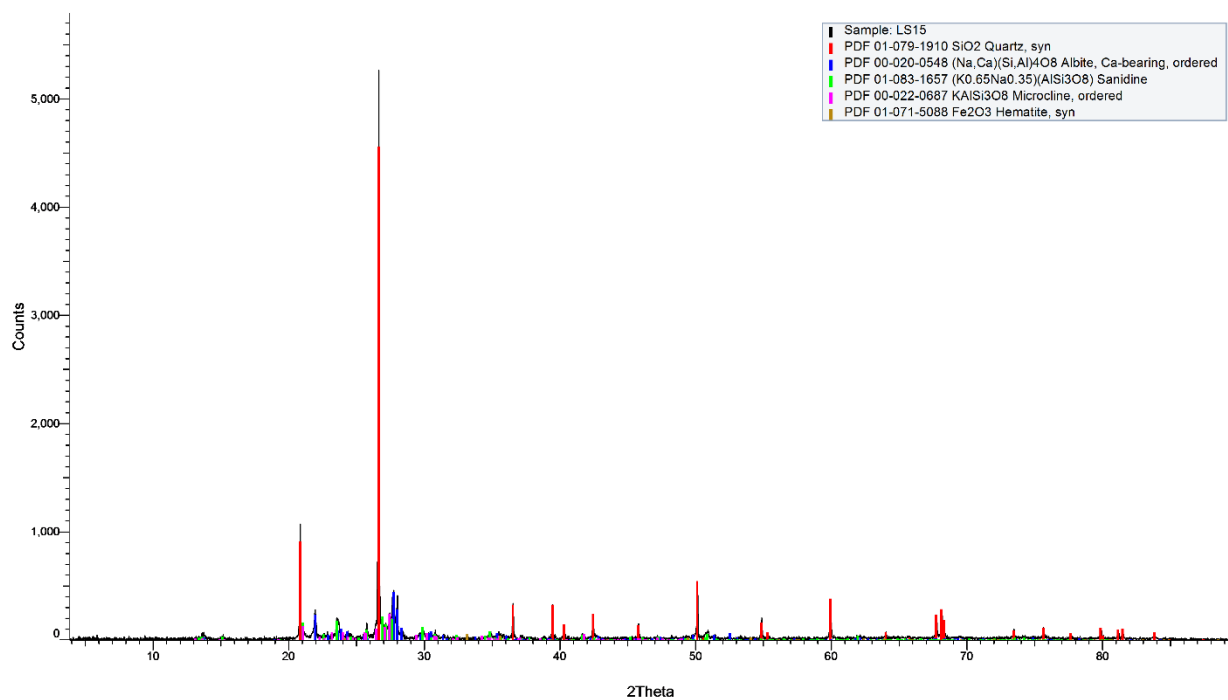


Ilustración 47. DRX del sedimento LS15, el Río Nazas después de atravesar la zona metropolitana de la Comarca Lagunera.

Microscopía Electrónica de Barrido

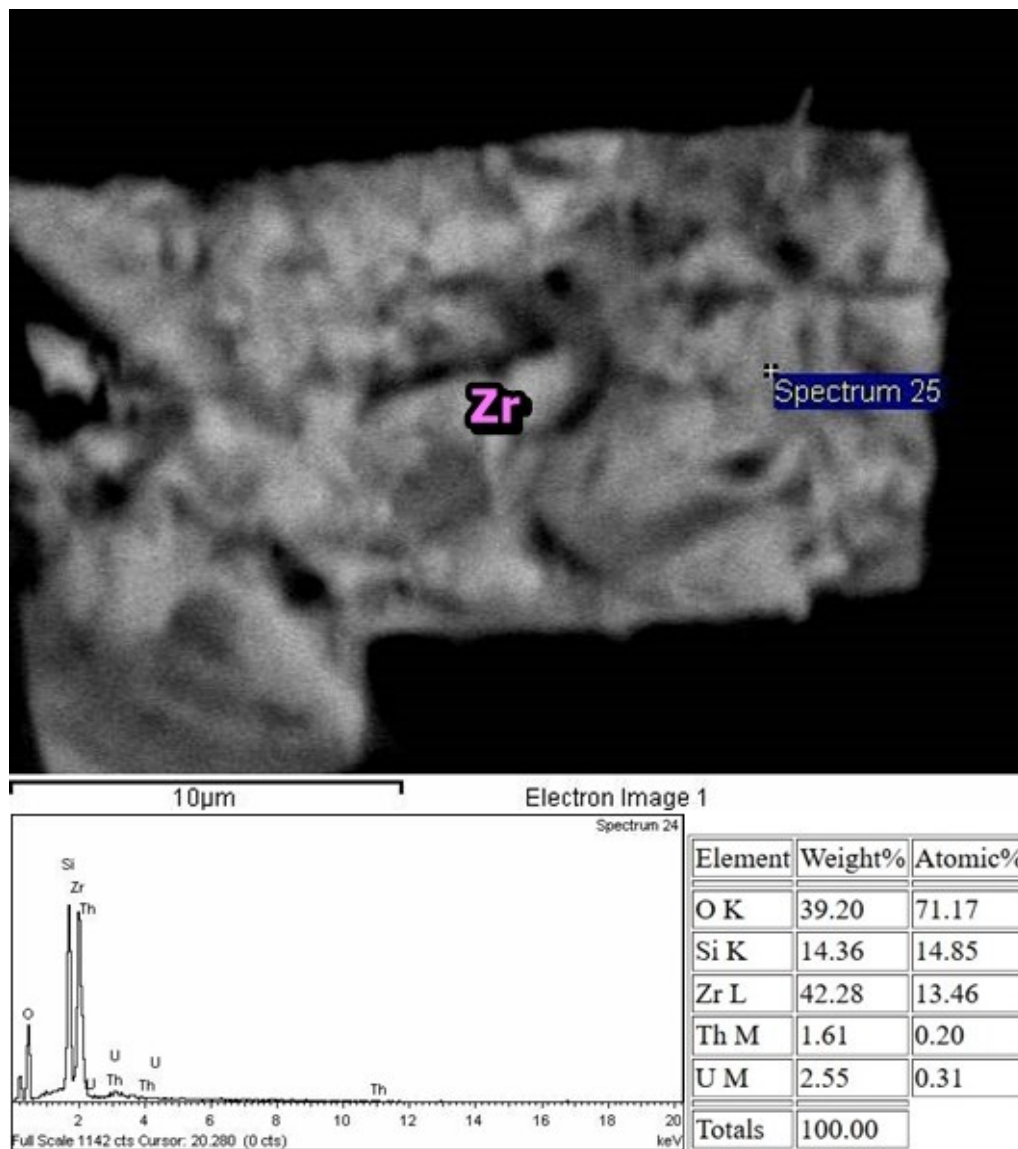


Ilustración 48. Circón con U en su estructura presente en la muestra LR18.

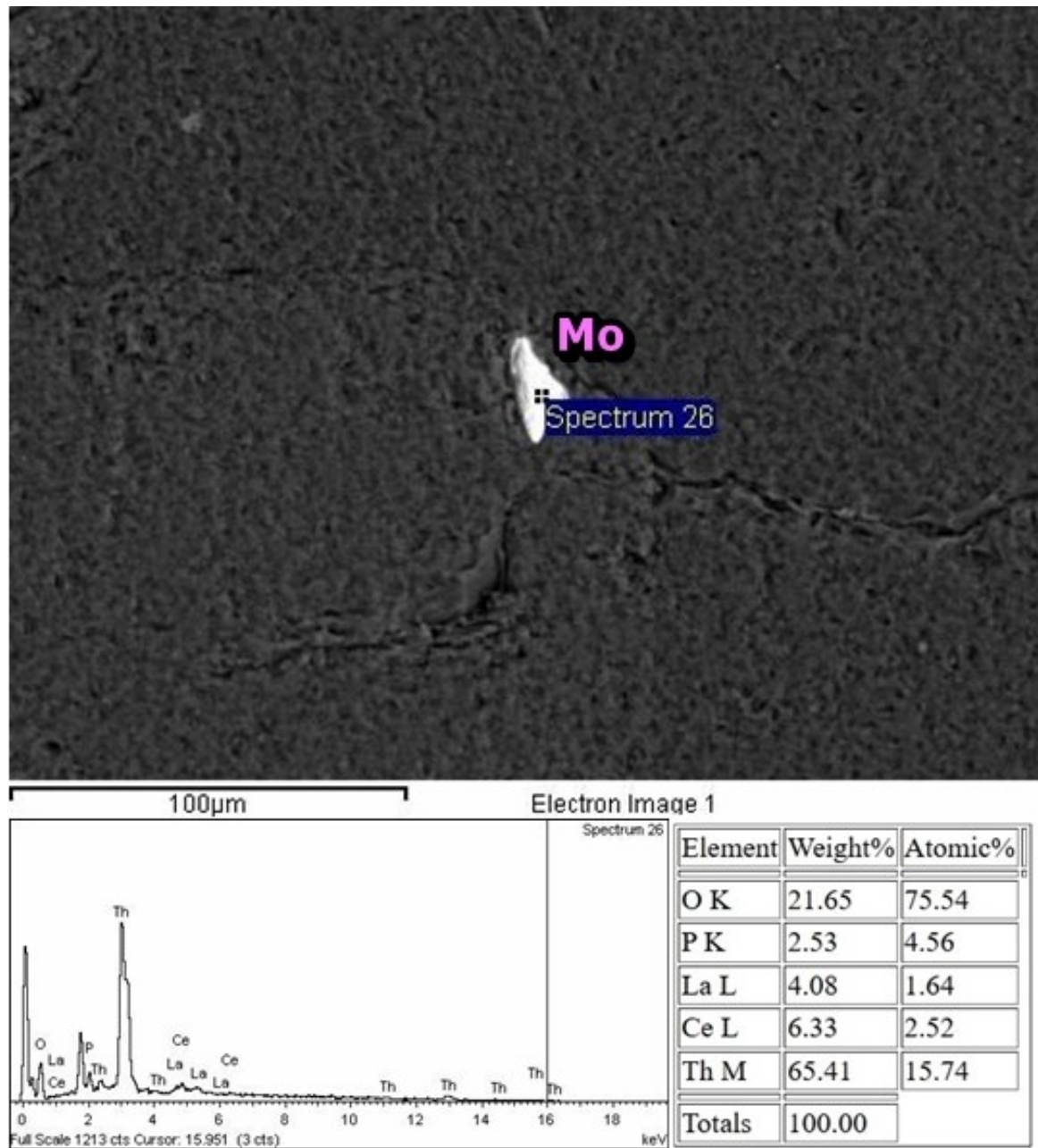


Ilustración 49. Cristal de monacita en riolita LR20.

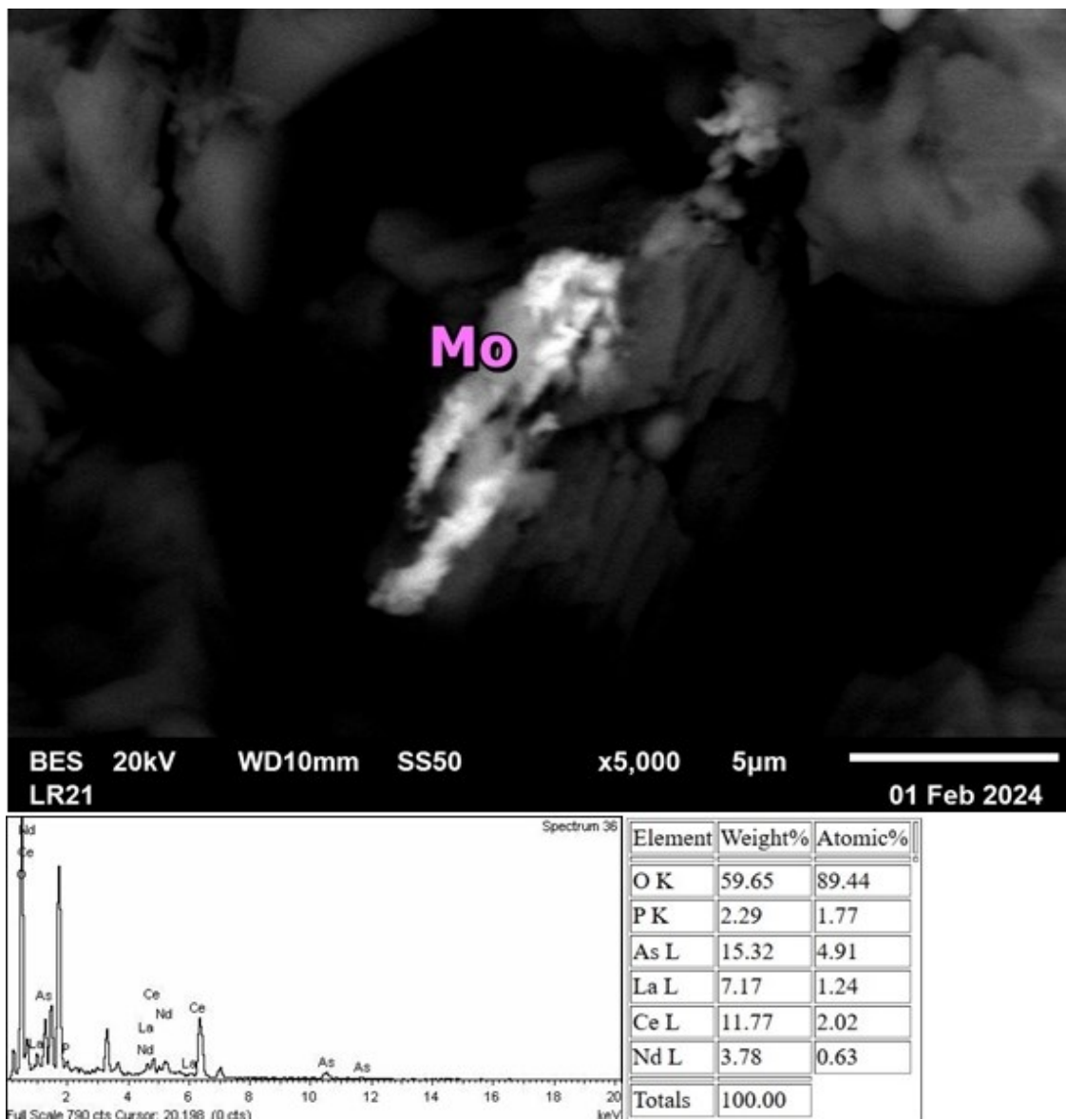


Ilustración 50. Monacita con As en su estructura cristalina en riolita LR21.

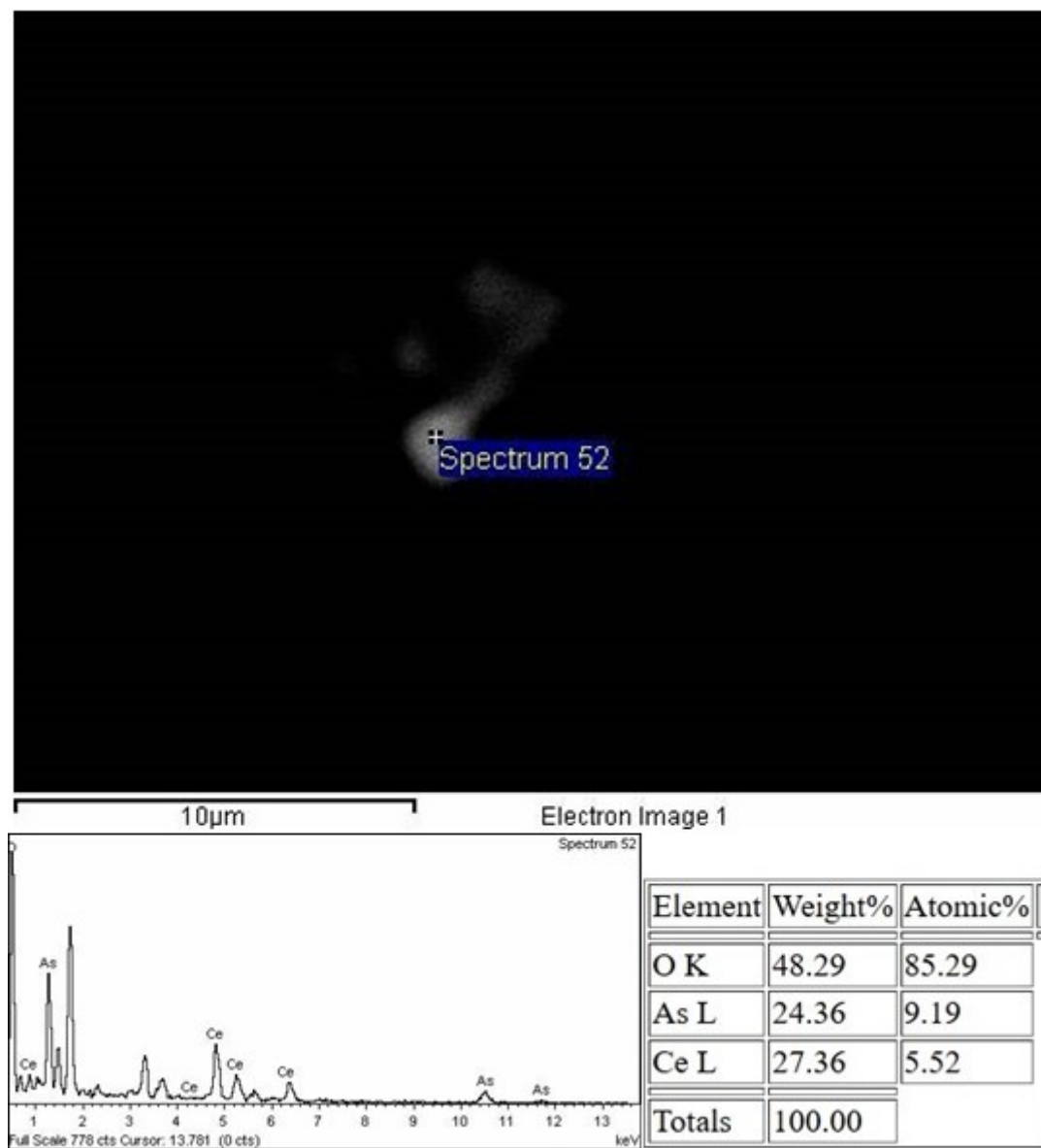


Ilustración 51. Óxido de Cerio que incluye As en su estructura en muestra LR21, riolita.

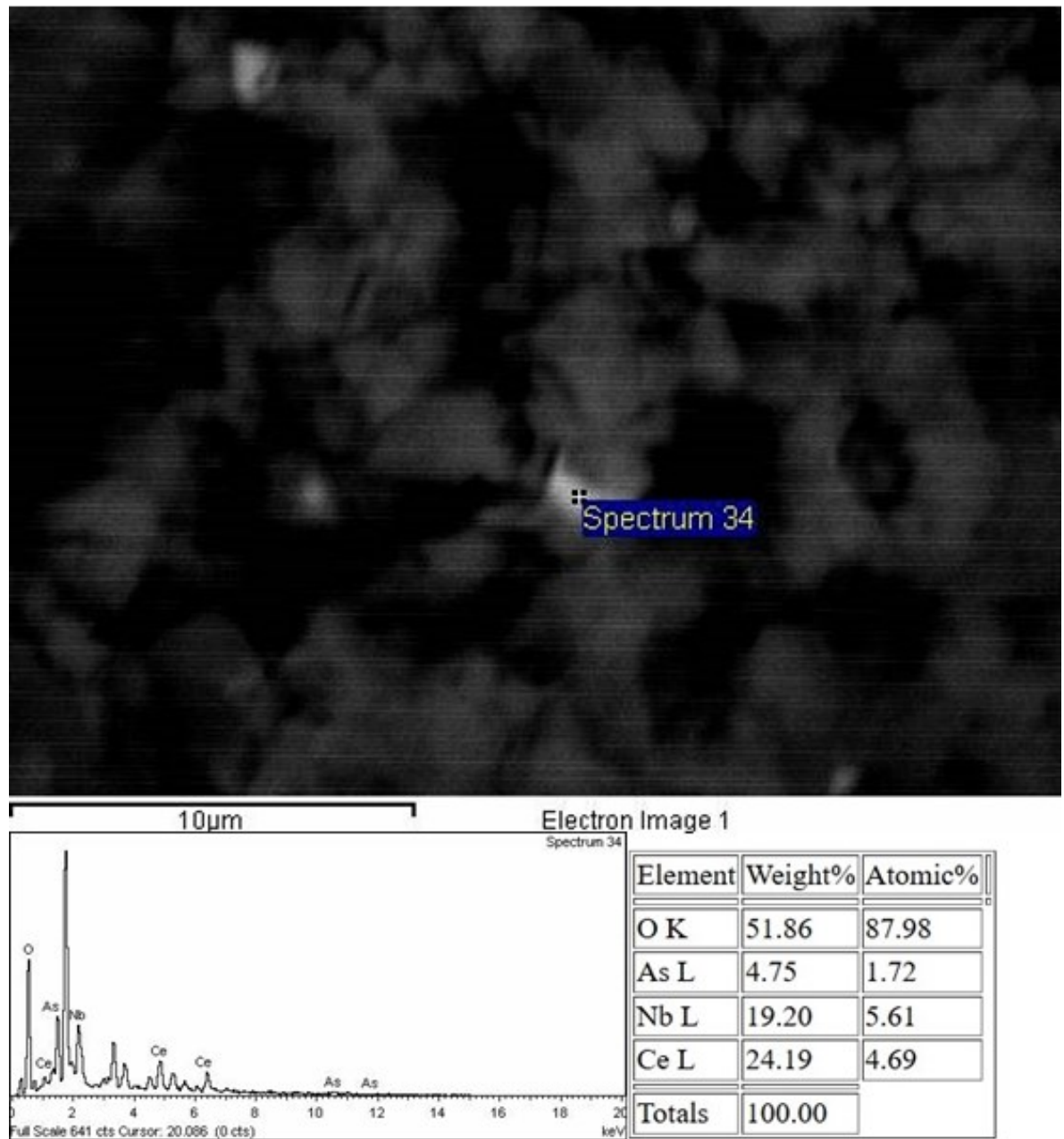


Ilustración 52. Presencia de As y tierras raras en la muestra LR21, riolita.

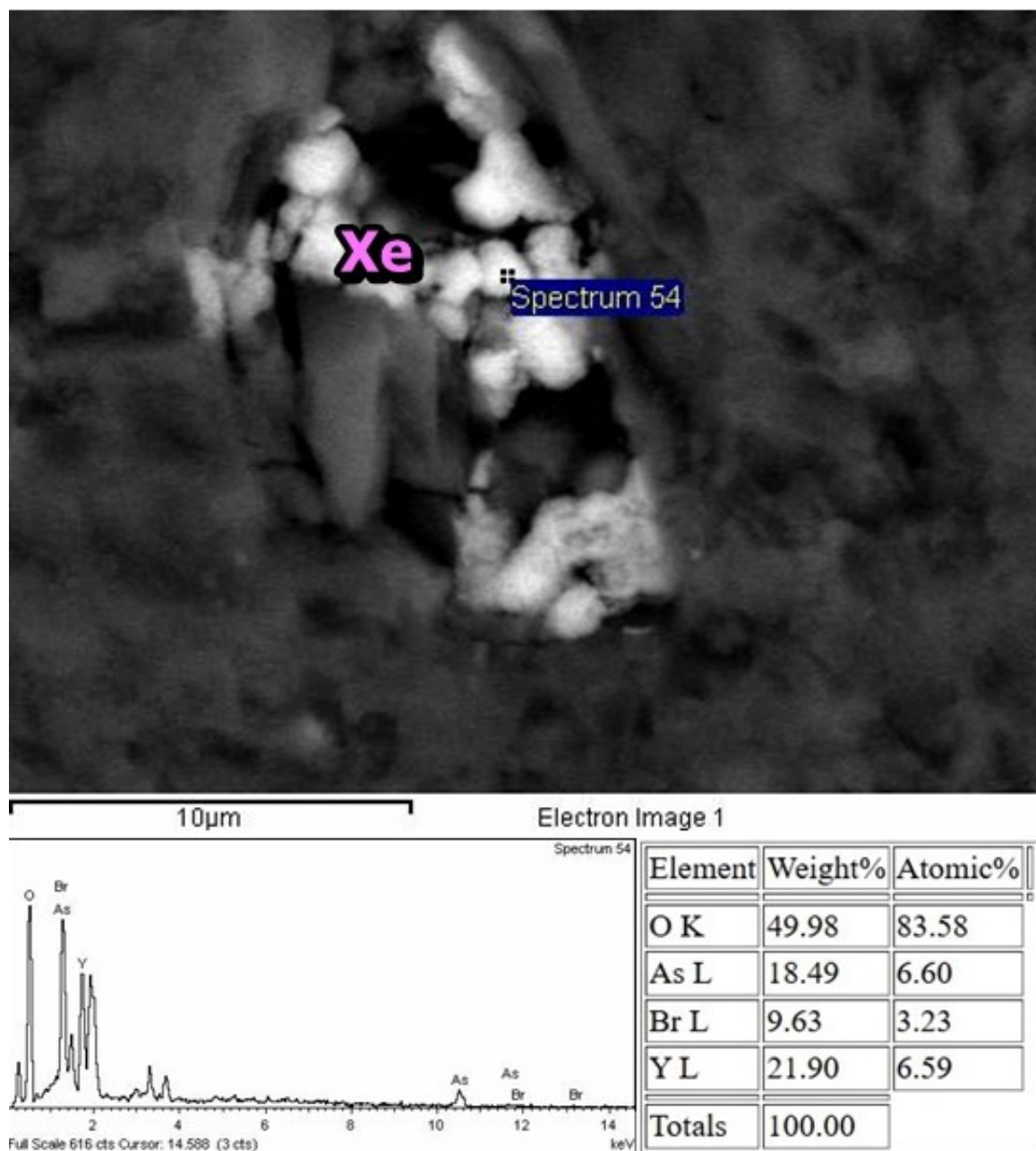


Ilustración 53. Parte superior de Xenotima en muestra LR20, presenta cantidades de Asx|