



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

**INFLUENCIA DE LA MATRIZ ACUOSA EN LA
REMOCIÓN DE ARSÉNICO Y FLUORURO**

T E S I N A

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**LICENCIADO EN CIENCIAS DE LA
TIERRA
ORIENTACIÓN EN CIENCIAS
ACUÁTICAS**

P R E S E N T A:

DIEGO ERNESTO SOLÓRZANO RAMOS



**TUTORA:
DRA. MARÍA AURORA ARMIENTA
HERNÁNDEZ
CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX. 2023**



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Agradecimientos

A la Dra. María Aurora Armienta Hernández, por aceptarme como su estudiante, y quien, como tutora, es un ejemplo de desarrollo profesional y humano, ya que siempre conté con su apoyo y comprensión en esta etapa culminante de mis estudios profesionales.

Al personal del Laboratorio de Química Analítica, la M. en I. Alejandra Aguayo Ríos, la Q.F.B. Olivia Cruz Ronquillo y el Q.F.B. Omar Neri Hernández por todas sus enseñanzas, consejos, apoyo y amistad que me brindaron.

A mis sinodales, la Dra. Ofelia Morton Bermea, al Dr. Francisco Martín Romero, la Dra. Teresa Pi Puig y al Dr. René Loredó Portales, por aceptar ser parte de mi jurado y por sus recomendaciones que me ayudaron en el desarrollo del presente trabajo.

Al M. en C. Antonio Salvador Sosa Islas, quien, de principio a fin, siempre me aportó su tiempo y conocimientos que permitieron el desarrollo de este trabajo, y a quien agradezco más allá de lo académico, ya que vivimos momentos que sólo la amistad puede otorgar.

A la Dra. María de Jesús González Guadarrama quien, además de brindarme su amistad, contribuyó tanto en el desarrollo experimental, como en la revisión del presente documento.

A mi madre Martha Gloria Ramos, y mi padre Luis Alberto Solórzano, los cuales, me guiaron y me dieron la libertad de aprender tanto de mis aciertos como de mis errores; y a mi hermano Carlos Alberto, quien siempre me tiende su mano cuando lo requiero.

A la Profesora Teresa González Díaz, quien se convirtió en una tutora de vida para mí, al igual que su sobrino Marcovitch y a su familia, por el enorme e incondicional apoyo que siempre recibí de cada uno de ellos.

Al M. en C. Arturo Andrade Salas, por la convivencia y apoyo mutuo que hubo, lo cual me permitió aprender más allá de lo académico.

A cada uno de mis compañeros del Laboratorio de Química Analítica, con quienes compartí conocimientos, convivencia y momentos de alegría que enriquecieron cada instante de esta etapa profesional.

Al programa de apoyo a proyectos de investigación e innovación tecnológica PAPIIT IN106121 "Mecanismos de remoción y estabilidad de arsénico en rocas calizas"

Índice

INTRODUCCIÓN	1
Antecedentes	3
Justificación.....	4
Objetivos	5
Etapa uno.	5
Etapa dos.....	6
Etapa tres.	6
METODOLOGÍA	7
Etapa uno.....	7
Descarga de la información geológica.	7
Homologado de las coordenadas reportadas.....	8
Georreferenciación.	8
Etapa dos.....	9
Muestreo.....	9
Trabajo de laboratorio.....	10
Etapa tres.....	15
Muestreo.....	15
Trabajo de laboratorio.....	15
Determinación y procesamiento de los parámetros fisicoquímicos y composición química del agua.	17
Parámetros fisicoquímicos.....	17
Composición química.....	17
Fluoruro.	17
Arsénico.....	18
Procesamiento de datos (Índices de saturación de minerales y diagramas de Pourbaix)	18
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	19
Etapa uno.....	19
Guanajuato	19
Hidalgo	21
Discusión de la etapa uno.....	26
Etapa dos.....	26
Axocopan.....	27
Atlimeyaya.	28

Discusión de la etapa dos	29
Etapa tres	31
Guanajuato	31
Hidalgo	36
Discusión de la etapa tres	39
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	41
Etapa uno	41
Recomendación	41
Etapa dos	41
Recomendaciones	42
Etapa tres	42
Recomendaciones	43
BIBLIOGRAFÍA	44
ANEXOS	47
Anexo I. Cálculos para contaminar las muestras de Axocopan y Atlimeyaya.....	48
Anexo II. Reactivos para la medición de cloruros y fluoruros	51
Anexo III. Tablas de los resultados de la segunda etapa	52
Anexo IV. Georreferenciación.....	54
Anexo V. Diagramas de Pourbaix.....	58
Anexo VI. Índices de saturación	62

INTRODUCCIÓN

En el 2018, en nuestro país, la principal fuente de abastecimiento público de agua, tanto para uso doméstico como industrial, fue de acuíferos, siendo el 56.7% del volumen total, mientras que el restante proviene de fuentes de aguas superficiales (CONAGUA, 2018). Por lo tanto, se debe poner especial atención en la contaminación que ésta pueda tener debido, por ejemplo, a la disolución de minerales presentes en las rocas de los acuíferos, ya que la mala calidad de agua para uso y consumo humano es un problema creciente y que genera un riesgo para la salud de millones de personas en México y alrededor del mundo. Además, de acuerdo a la Comisión Nacional de los Derechos Humanos (CNDH, 2014), se considera como derecho humano el acceso al agua de calidad para una vida digna.

El agua que llega a los hogares, no siempre se encuentra libre de contaminación, la cual puede ser causada por la actividad humana (industrial, vertientes de drenajes, etcétera), hasta la contaminación natural debido a procesos fisicoquímicos ocurridos por el tránsito natural del agua, como lo es el constante contacto a través de los poros, fracturas y fisuras del suelo y las rocas que forman los acuíferos, por lo que puede encontrarse con minerales que sean capaces de disolverse en su matriz acuosa y enriquecerla con elementos y compuestos tóxicos (Ortiz, 2021). Ambos procesos de contaminación son importantes, ya que el hecho de ser contaminación natural, no le resta importancia a los elementos que pueda contener el agua y que a su vez pueden ser nocivos para la salud (Ortiz, 2021). Por lo tanto, para garantizar que el agua que llega a los hogares sea de calidad, debe ser considerada potable, lo que significa que debe cumplir con características físicas, químicas y microbianas que, en nuestro país se encuentran reglamentadas por la norma NOM-127-SSA1-2021.

De acuerdo con Ortiz (2021), existe una mala interpretación del significado de “agua potable”, ya que el principal tratamiento para el agua entubada, y en muchos casos único, es la desinfección por cloración. Sin embargo, de acuerdo a la definición que otorga la NOM-127-SSA1-2021, la potabilización es el conjunto de operaciones y procesos, físicos, químicos y biológicos que se aplican al agua en los sistemas de abastecimiento de agua, a fin de hacerla apta para uso y consumo humano; definición a la cual, también le sumamos que de acuerdo al Programa Conjunto de Monitoreo

para el Abastecimiento de Agua y Saneamiento (WASH por sus siglas en inglés) de la OMS y la UNICEF, este proceso debe ser al menor costo posible; tomando en cuenta esto, podemos considerar que el agua que llega a los hogares no necesariamente es potable.

La Organización Mundial de la Salud (OMS, 2022), considera al arsénico y el fluoruro como parte de los 10 químicos de mayor interés en salud pública, los cuales, se encuentran principalmente disueltos en el agua para consumo humano. En el caso del arsénico, la ingesta prolongada es capaz de causar desde lesiones en la piel, hasta cáncer; mientras que, para el fluoruro, tanto la deficiencia como el exceso, es capaz de causar efectos nocivos a la salud ósea. Debido a las propiedades organolépticas de ambos compuestos, éstos son imperceptibles en el agua, lo que provoca que la gente los consuma sin darse cuenta, razón por la cual, muchas veces son detectados hasta que afectan la salud de la población.

Partiendo de esa información, se debe tomar en cuenta que para garantizar que el agua que llega a los hogares es apta para uso y consumo humano, ésta debe ser analizada en laboratorios, para comprobar que cumple con los límites de contaminantes permisibles de acuerdo a la norma mexicana NOM-127-SSA1-2021.

Existen diversas zonas del país en las que el “agua potable” supera los límites de arsénico y fluoruro permisibles establecidos en la norma NOM-127-SSA1-2000, (Armienta, & Segovia, 2008), los cuales son los mismos límites para la norma actual y vigente NOM-127-SSA1-2021, sin embargo, ésta última norma establece que los límites de arsénico y fluoruro deben bajar gradualmente en un tiempo de uno a seis años, dependiendo del número de habitantes de la localidad (*Tabla 1*).

Tabla 1. Límites iniciales y finales permisibles de arsénico y fluoruro en un tiempo determinado de acuerdo al número de habitantes de la NOM-127-SSA1-2021.

Número de habitantes de la localidad	Arsénico			Fluoruro		
	Límite inicial	Tiempo para el límite final	Límite final	Límite inicial	Tiempo para el límite final	Límite final
Mayor de 500,000 habitantes	0.025 mg/L	Un año posterior a la entrada en vigor de la Norma*	0.01 mg/L	1.5 mg/L	Un año posterior a la entrada en vigor de la Norma*	1 mg/L
Entre 50,000 y 499,999 habitantes	0.025 mg/L	Tres años posterior a la entrada en vigor de la Norma*	0.01 mg/L	1.5 mg/L	Tres años posterior a la entrada en vigor de la Norma*	1 mg/L
Menor de 50,000 habitantes	0.025 mg/L	Seis años posterior a la entrada en vigor de la Norma*	0.01 mg/L	1.5 mg/L	Seis años posterior a la entrada en vigor de la Norma*	1 mg/L

*Norma NOM-127-SSA1-2021, la cual entra en vigor 360 días naturales contados a partir del día siguiente de su publicación en el Diario Oficial de la Federación (2 de mayo de 2022).

En estados como Baja California, San Luis Potosí, Hidalgo, la región de La Comarca Lagunera y áreas con actividad geotérmica, se han encontrado altas concentraciones de arsénico. Mientras que estados como son Aguascalientes, Chihuahua y San Luis Potosí y la región de La Comarca Lagunera, han presentado problemas con los niveles de fluoruros en sus aguas (Armienta, & Segovia, 2008).

Con el objetivo de reducir esta problemática, se han estudiado procesos para la remoción de estos contaminantes con materiales adsorbentes de fácil acceso, como la roca caliza, la cual, ha demostrado ser eficiente en la retención de estos contaminantes (Micete, 2005).

Antecedentes

Buscando reducir la concentración de arsénico, estudios previos en el municipio de Zimapán, Hidalgo, donde el principal problema es la contaminación por este metaloide con concentraciones que llegan a ser más de 60 veces superiores a la norma (*Tabla 1*) (Armienta, 2011), las investigaciones han demostrado que mediante interacción agua-roca, se puede utilizar la roca caliza de la región, reportada como parte de la Formación Soyatal (Sosa, 2020) (llamada Kss en el presente trabajo) para remover el arsénico, así como el fluoruro (éste último que en la zona supera hasta una y media veces los límites permisibles de agua para uso y consumo humano [*Tabla 1*]) de la matriz acuosa (Labastida, 2014; Manzo, 2020; Micete, 2005; Sosa, 2020). La roca con la que se trabajó también demostró tener fluorita, la cual contiene calcio y fluoruro; sin embargo, no se detectaron minerales que contengan arsénico (Manzo, 2020).

Estudios realizados por Sosa (2020), mediante experimentos en columna para la remoción de arsénico y fluoruros permitieron establecer que existe una relación con los iones sulfatos, carbonatos y bicarbonatos (llamados iones interferentes) en la remoción de arsénico. De acuerdo a sus resultados, los iones interferentes compiten por un lugar en remoción de contaminantes por roca caliza, por lo tanto, el aumento en la concentración de éstos, reduce la eficacia de la remoción. Adicionalmente, Sosa (2020) describe tres fenómenos de remoción: adsorción, precipitación y coprecipitación. La adsorción es el fenómeno en el cual los átomos, moléculas o iones son retenidos por enlaces químicos o físicos en una superficie sólida. La precipitación es la formación de moléculas sólidas por saturación, a partir de los elementos presentes en la matriz acuosa y en la roca. Por último, describe la coprecipitación como el arrastre del contaminante por interacción química o física por un compuesto formado en precipitación.

Durante el desarrollo del trabajo conjunto, se encontró un conflicto de identidad de la formación geológica de la roca caliza recolectada en la misma zona del municipio de Zimapán, entre y Labastida (2014) y Sosa (2020), donde el primero la identifica como roca del Cretácico Inferior Tamaulipas (Kit), y el segundo como roca del Cretácico Superior Soyatal el cual, a la fecha de realizado el presente trabajo, sigue vigente.

Asimismo, en los municipios de Santa Cruz de Juventino Rosas y Villagrán, pertenecientes al estado de Guanajuato, donde el principal contaminante son los fluoruros con cantidades casi cinco veces superiores a la norma, y el arsénico supera casi tres veces lo establecido en la misma (*Tabla 1*); se encontró que el tipo de roca caliza reportada como la Formación Esperanza con la que Juárez (2020) obtuvo los mejores resultados y que contenía mayor cantidad de calcita (llamada Ki en el presente trabajo) fue la más eficiente para remover arsénico y fluoruros de la matriz acuosa.

Justificación

El presente trabajo es una aportación a una investigación conjunta sobre contaminación del agua por arsénico y fluoruro que se desarrolla en el Laboratorio de Química Analítica del Instituto de Geofísica de la UNAM.

Como primera etapa, teniendo como antecedente que existe un conflicto de identidad de la formación geológica de la roca caliza recolectada en la misma zona del municipio de Zimapán, se buscó identificar geográficamente la formación de la roca utilizando datos geológicos del Servicio Geológico Mexicano (SGM) y las coordenadas de recolección reportadas por ambos. Adicionalmente también se agregó el punto de recolección que Labastida (2014) reportó como Kss para corroborar la formación de la roca. Finalmente, se realizó la misma identificación para la roca caliza recolectada por Juárez (2020) en el estado de Guanajuato.

Siguiendo las recomendaciones de Manzo (2019) y dándole continuidad a los estudios realizados por Sosa (2020), en la segunda etapa este estudio buscó conocer la influencia que tienen los iones interferentes, presentes de manera natural, mediante experimentos con muestras de agua provenientes de manantiales en la cercanía del volcán Popocatepetl, las cuales fueron trabajadas por primera vez, con la aplicación de pruebas en lote a nivel laboratorio a un tiempo de una hora, con la finalidad de demostrar si existe interferencia en la adsorción de arsénico y fluoruro.

Por último, en la tercera etapa, usando nuevamente pruebas en lotes a nivel laboratorio, se realizaron aplicaciones subsecuentes de muestras de agua de los pozos de Hidalgo y Guanajuato, utilizando la roca caliza recolectada por Juárez (2020) y Sosa (2020) para ver, por primera vez el comportamiento de la remoción de los contaminantes, reutilizando la misma muestra de roca caliza.

Adicionalmente, basándose en los estudios realizados por Sosa (2020) se analizó cual es el fenómeno de remoción que puede estar presente en las pruebas en lote a nivel laboratorio mediante los índices teóricos de saturación y se observó cual es la especie predominante de arsénico y fluoruro en la matriz acuosa mediante diagramas de Pourbaix.

Objetivos

Etapa uno.

Identificar la Formación Geológica a la cual pertenecen las rocas calizas utilizadas en los experimentos en ambas zonas usando de base las coordenadas de muestreo.

Etapa dos.

Conocer la influencia de la matriz acuosa y de los iones interferentes que se encuentran presentes en manantiales cercanos al volcán Popocatepetl, en la remoción de arsénico y fluoruros por rocas calizas pertenecientes al municipio de Zimapán, Hidalgo.

Etapa tres.

Conocer la capacidad de remoción de arsénico y fluoruros, realizando aplicaciones subsecuentes, utilizando rocas calizas presentes en los municipios de Zimapán, Hidalgo y de Santa Cruz de Juventino Rosas, Guanajuato.

METODOLOGÍA

El trabajo fue dividido en tres etapas. En la primera etapa se recolectó la información del muestreo de las rocas calizas con las que se trabajó en las dos etapas siguientes, y se descargó información geológica de las zonas de recolección, donde se ubicaron geográficamente las formaciones geológicas a las que pertenecen las muestras trabajadas. En la segunda etapa se trabajó con el agua de manantiales cercanos al volcán Popocatepetl proveniente del estado de Puebla y con roca caliza del estado de Hidalgo. En la tercera etapa se trabajó con el agua de dos pozos y la roca caliza proveniente del estado de Hidalgo; y con dos pozos y roca caliza recolectadas en el estado de Guanajuato.

Todos los experimentos fueron realizados en el Laboratorio de Química Analítica del Instituto de Geofísica. Las muestras tanto de agua como de roca empleadas para los experimentos ya habían sido recolectadas y almacenadas en el laboratorio y son procedentes de Puebla, Hidalgo y Guanajuato, por lo que únicamente se recopiló la información de muestreo. A continuación, se detalla la metodología de las etapas trabajadas.

Etapa uno.

Descarga de la información geológica.

Para esta etapa se descargó la carta geológico-minera de los estados de Hidalgo y Guanajuato (éste último acompañado de la información del estado de Querétaro) en pdf y el Continuo Nacional de Geología, el cual contiene información geológica de todo el país, en formato kml, todas provenientes del Servicio Geológico Mexicano, además se usaron los mapas con la información geológica reportada por Labastida (2014) y Sosa (2020) para Zimapán, Hidalgo; adicionalmente se trabajó con el mapa geológico de la zona de recolección reportada por Juárez (2020) para Santa Cruz de Juventino Rosas, Guanajuato; las cuales se usaron para ser comparadas con la información que fue descargada.

Homologado de las coordenadas reportadas.

Para homogeneizar la información de las coordenadas de recolección, se transformaron las coordenadas reportadas de donde se extrajeron las muestras de rocas de los estados de Hidalgo y Guanajuato que fueron usadas para hacer pruebas en lotes a nivel laboratorio las cuales fueron reportadas por Sosa, (2020) y por Juárez, (2020); más las muestras recolectadas reportadas por Labastida (2014), las cuales presentan la inconsistencia del tipo de roca de acuerdo a lo reportado por Sosa (2020). Para realizar la transformación a coordenadas geográficas, las coordenadas reportadas fueron ingresadas en Google Earth, donde se guardaron los puntos en el formato del mismo programa (kml) y únicamente se cambió el sistema de coordenadas a geográficas decimales para obtener su equivalente y poder trabajarlas de manera homologada (Tabla 2).

Tabla 2. Equivalencia de los puntos de muestreo reportados a coordenadas geográficas decimales.

Muestra	Coordenadas reportadas	Coordenadas geográficas decimales
Kss (Sosa, 2020) Reportadas en grados y minutos decimales	N 20°46.355'	20.772583
	W 99°24.995'	-99.416583
	N 20°46.356'	20.772600
	W 99°25.019'	-99.416983
Kss (Labastida, 2014) Reportada en UTM	N 20°46.318'	20.771966
	W 99°25.047'	-99.417450
Kit (Labastida, 2014) Reportada en UTM	14 Q 456954.00m E	20.728731
	2292181.00m N	-99.413442
Ki (Juárez, 2014) Reportada en UTM	14 Q 456649.00m E	20.770965
	2296856.00m N	-99.416487
Ki (Juárez, 2014) Reportada en UTM	14 Q 303134.00m E	20.662868
	2285983.00m N	-100.889768

Georreferenciación.

Mediante el uso de la herramienta de geo-referenciado de Qgis, se georreferenciaron las cartas geológico-mineras. Para cada una de ellas se seleccionaron cuatro puntos con coordenadas conocidas, a las cuales fueron asignadas las mismas coordenadas para que puedan ser proyectadas. Para la proyección de las cartas geológico-mineras se usó el datum ITRF 92 (EPSG:6362, comúnmente usado por INEGI), debido a que la proyección de las cartas es cónica conforme de Lambert en coordenadas

geográficas; para la proyección de las imágenes de Juárez (2020) y Labastida (2014) se usó el Datum WGS84/UTM zone 14N (EPSG:32614) debido a las coordenadas en las que presentan sus imágenes; mientras que para la imagen de Sosa (2020), se usó el Datum WGS84 en coordenadas geográficas (EPSG: 4326), este último también utilizado para la proyección final de todas las imágenes. Una vez geo-referenciada la cartografía, se introdujeron los puntos de recolección de la roca de ambos estados y se identificó la formación geológica a la que corresponde de acuerdo a la reportada por el SGM (Anexo IV).

Por último, se abrió el Continuo Nacional de Geología en Google Earth y nuevamente se ingresaron las coordenadas de recolección para Hidalgo para observar en qué formación coincidía la roca recolectada.

Etapa dos.

Muestreo.

En esta etapa se trabajó con agua proveniente de manantiales ubicados en dos comunidades cercanas al volcán Popocatepetl. Uno de ellos se encuentra en la localidad de La Magdalena Axocopan (Axocopan), perteneciente al municipio de Atlixco y el otro en la localidad de San Baltazar Atlimeyaya (Atlimeyaya), en el municipio de Tianguismanalco, ambos municipios pertenecientes al estado de Puebla.

Las muestras de agua, tienen una diferencia significativa en las concentraciones de sulfatos y bicarbonatos disueltos, iones que son considerados interferentes en la retención de arsénico (Sosa, 2020). Previo al inicio de los experimentos, el personal del Laboratorio de Química Analítica midió los parámetros fisicoquímicos del agua, y determinó la composición química del agua. Las mediciones realizadas mostraron que las cantidades de arsénico y de fluoruro se encuentran dentro de la NOM-127-SSA1-2021 (Tabla 3). El muestreo del agua fue realizado en agosto de 2019 y el análisis y los experimentos de laboratorio en septiembre de 2019.

Tabla 3. Condiciones naturales de arsénico y fluoruro presentes en las muestras de la etapa uno.

Localidad	Arsénico (mg/L)	Fluoruro (mg/L)
Axocopan	<0.002	0.50
Atlimeyaya	<0.002	0.55

Asimismo, debido a resultados favorables para la remoción de arsénico y fluoruros usando roca caliza Kss reportados en trabajos anteriores (Micete, 2005; Labastida, 2014; Manzo, 2019; Sosa, 2020), nuevamente se usó la misma roca, la cual fue muestreada en el municipio de Zimapán, Hidalgo, por Sosa (2020). Para realizar el trabajo, la roca fue previamente molida, tamizada y almacenada a diferentes tamaños de grano (Manzo, 2019). Para esta etapa se usaron 10 gramos de roca por cada muestra (Tabla 5 y Tabla 6) con un tamaño de grano menor a 0.5 mm, ya que según estudios reportados por Micete (2005), es el tamaño que favorece mejor la remoción de arsénico (hasta un 90%).

Trabajo de laboratorio

Preparación de las muestras

Debido a que la cantidad de arsénico presente en la matriz acuosa de las muestras es indetectable, así como muy baja en fluoruros (Tabla 3), y a que se buscó conocer cuál es la eficacia de la remoción de esos contaminantes en presencia de iones interferentes por la roca caliza mediante pruebas en lotes a nivel laboratorio, fue necesario contaminar las muestras usando arseniato de sodio ($\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) grado reactivo y fluoruro de sodio (NaF) grado reactivo.

Para poder determinar la cantidad a adicionar de arsénico y fluoruro, se usaron como referencia las concentraciones promedio de las mediciones hechas en cuatro pozos (Tabla 4), de los cuales, uno se ubica en la localidad de Praderas de la Venta (PV) dentro del municipio de Santa Cruz de Juventino Rosas y el otro en la comunidad de San José Merino (SJM), perteneciente al municipio de Villagrán, ambos ubicados en el estado de Guanajuato; mientras los otros dos se encuentran en el municipio de Zimapán (Muhí y Pb18) en el estado de Hidalgo.

Tabla 4. Contenido de As y F⁻ promedio presentes en los pozos de referencia (En rojo se muestran las concentraciones que superan los límites permisibles y en naranja las concentraciones que se encuentran en los

límites de transición de acuerdo a la NOM-127-SSA1-2021[véase Tabla 1]).

Pozo	Arsénico (mg/L)	Fluoruro (mg/L)
Praderas de la Venta (PV)	0.073	7.29
San José Merino (SJM)	0.024	2.84
Muhí	1.560	2.40
Pb18	0.500	0.68
Norma	0.025	1.5

Como se puede observar en la Tabla 4, las cantidades de arsénico presentes en PV y SJM se encuentran en bajos niveles de concentración, a pesar de que el primero es casi tres veces superior a la norma inicial y el segundo está prácticamente en el límite, por lo que se optó por usar un gradiente de concentración entre el pozo Pb18 y dos veces el valor de Muhí (3.12 mg/L) para todas las muestras, esto porque en una ocasión se llegó a medir en el Laboratorio de Química Analítica un valor no reportado extraordinario máximo de 5 mg/L, ya que como lo indica Rodríguez y colaboradores (2004), se presentan fluctuaciones en las concentraciones de arsénico por las condiciones existentes, como lo son la época del año, sequías, sobreexplotación, actividad minera, etcétera; los cuales llegan a producir niveles muy superiores a la norma. Las pruebas con una mayor concentración nos permitirían observar mejor la capacidad de remoción del contaminante por roca caliza, ya que estudios realizados por Sosa (2020) demostraron que los iones interferentes afectan principalmente la remoción de arsénico.

Para los fluoruros, se decidió mantener como referencia a los cuatro pozos (los cuales dieron la nomenclatura a las muestras de la presente etapa), ya que en el mismo estudio (Sosa, 2020) no encontró la existencia de tal interferencia, lo cual buscó ser corroborado en el presente trabajo.

Para la parte experimental se contó únicamente con 700 mL de muestra de agua por localidad (Atlimeyaya y Axocopan), por lo que, para ser trabajadas, se dividieron y nombraron de acuerdo a lo mostrado en la Tabla 5 y en la Tabla 6.

Tabla 5. Organización de la división del agua de Axocopan.

Axocopan (700 mL)													
Guanajuato (400 mL)						Hidalgo (300 mL)							
Pv (200 mL)				SJM (200 mL)				Muhí (200 mL)				Pb18 (100 mL)	
Original (100 mL)		Duplicado (100 mL)		Original (100 mL)		Duplicado (100 mL)		Original (100 mL)		Duplicado (100 mL)		Original (100 mL)	
Medición previa (50 mL)	Medición posterior (50 mL)	Medición previa (50 mL)	Medición posterior (50 mL)	Medición previa (50 mL)	Medición posterior (50 mL)	Medición previa (50 mL)	Medición posterior (50 mL)	Medición previa (50 mL)	Medición posterior (50 mL)	Medición previa (50 mL)	Medición posterior (50 mL)	Medición previa (50 mL)	Medición posterior (50 mL)
axpv-o		axpv-d		axsj-o		axsj-d		axmu-o		axmu-d		axpb	

Al final se muestra el nombre clave de la muestra

Tabla 6. Organización de la división del agua de Atlimeyaya.

Atlimeyaya (700 mL)													
Guanajuato (400 mL)						Hidalgo (300 mL)							
Pv (200 mL)				SJM (200 mL)				Muhí (200 mL)				Pb18 (100 mL)	
Original (100 mL)		Duplicado (100 mL)		Original (100 mL)		Duplicado (100 mL)		Original (100 mL)		Duplicado (100 mL)		Original (100 mL)	
Medición previa (50 mL)	Medición posterior (50 mL)	Medición previa (50 mL)	Medición posterior (50 mL)	Medición previa (50 mL)	Medición posterior (50 mL)	Medición previa (50 mL)	Medición posterior (50 mL)	Medición previa (50 mL)	Medición posterior (50 mL)	Medición previa (50 mL)	Medición posterior (50 mL)	Medición previa (50 mL)	Medición posterior (50 mL)
atpv-o		atpv-d		atsj-o		atsj-d		atmu-o		atmu-d		atpb	

Al final se muestra el nombre clave de la muestra

Debido a los limitantes de muestra de agua de ambas comunidades, la muestra representativa del pozo Pb18 de Hidalgo quedó sin duplicado, por lo tanto, al final se obtuvieron un total de 14 muestras para realizar pruebas en lote a nivel laboratorio y 14 muestras para analizar concentraciones iniciales de arsénico y fluoruro, lo que nos da un total de 28 muestras para analizar de arsénico y fluoruros.

A partir de que se dividieron las muestras en original y duplicado (únicamente original para Pb18), se realizaron los cálculos para adicionar el arsénico y fluoruro (Anexo I), tomando en cuenta que, para este último, tenemos una concentración inicial.

Tabla 7. Concentración de fluoruro calculada de acuerdo a la cantidad de fluoruro de sodio pesado en 100 mL de muestra (En rojo se muestran las concentraciones que superan los límites permisibles de acuerdo a la NOM-127-SSA1-2021 [véase Tabla 1]).

Muestras	Fluoruro de sodio (mg)	Concentración teórica adicionada (mg/L)	Concentración teórica para Axocopan (mg/L)	Concentración teórica para Atlimeyaya (mg/L)	Concentración de referencia (mg/L)
axpv y atpv	1.5	6.79	7.29	7.34	7.29
axsj t atsj	0.5	2.26	2.76	2.81	2.84
axmu y atmu	0.4	1.81	2.31	2.36	2.40
axpb y atpb	0.1	0.45	0.95	1.00	0.68
Norma		1.5			

Para obtener las concentraciones calculadas (Tabla 7) se tomaron en cuenta las concentraciones iniciales de fluoruro para Axocopan y Atlimeyaya. Nuevamente se hizo el análisis para calcular cuánto se agregó de arsénico de acuerdo a lo pesado de arseniato de sodio (Tabla 8).

Tabla 8. Concentración de arsénico calculada de acuerdo a la cantidad de arseniato de sodio pesado para el gradiente de concentración entre 0.5 mg/L y 3.12 mg/L en 100 mL de muestra (En rojo se muestran las concentraciones que superan los límites permisibles de acuerdo a la NOM-127-SSA1-2021 [véase Tabla 1]).

Arsenito de sodio (mg)	Concentración teórica de arsénico (mg/L)
0.2	0.481
0.4	0.962
0.6	1.442
0.8	1.923
1.0	2.404
1.2	2.885
1.4	3.365
Norma	0.025

Con base en los cálculos realizados de los gramos a adicionar de arseniato de sodio y fluoruro de sodio, se hizo el pesado en una balanza analítica con sensibilidad de 0.1 mg, para posteriormente ser agregados a las muestras de 100 mL de agua. Como los resultados del análisis dimensional no fueron menores a la capacidad de pesaje de la balanza analítica, no fue necesario realizar diluciones, sin embargo, con la finalidad de darle certeza experimental al presente trabajo, las muestras fueron divididas en dos partes de 50 mL (Tabla 5 y Tabla 6), de las cuales, una se usó para que se pudieran medir las concentraciones iniciales de As y F- y con la otra se realizaron las

pruebas en lotes a nivel laboratorio y así poder conocer la concentración final de esos elementos.

Pruebas en lotes a nivel laboratorio

Las pruebas en lotes a nivel laboratorio son experimentos de etapa inicial en laboratorio, para escalar los resultados a nivel de campo, las cuales consisten en la agitación a determinadas revoluciones de una fase sólida (roca triturada) y una fase líquida (muestra de agua de interés) dentro de un recipiente (matraz Erlenmeyer) a un tiempo programado, para que las fases ingresadas tengan la máxima interacción entre sí y permitan la remoción de ciertos elementos, siendo de interés para este trabajo, la retención de As y F⁻ por roca caliza (Figura 1).

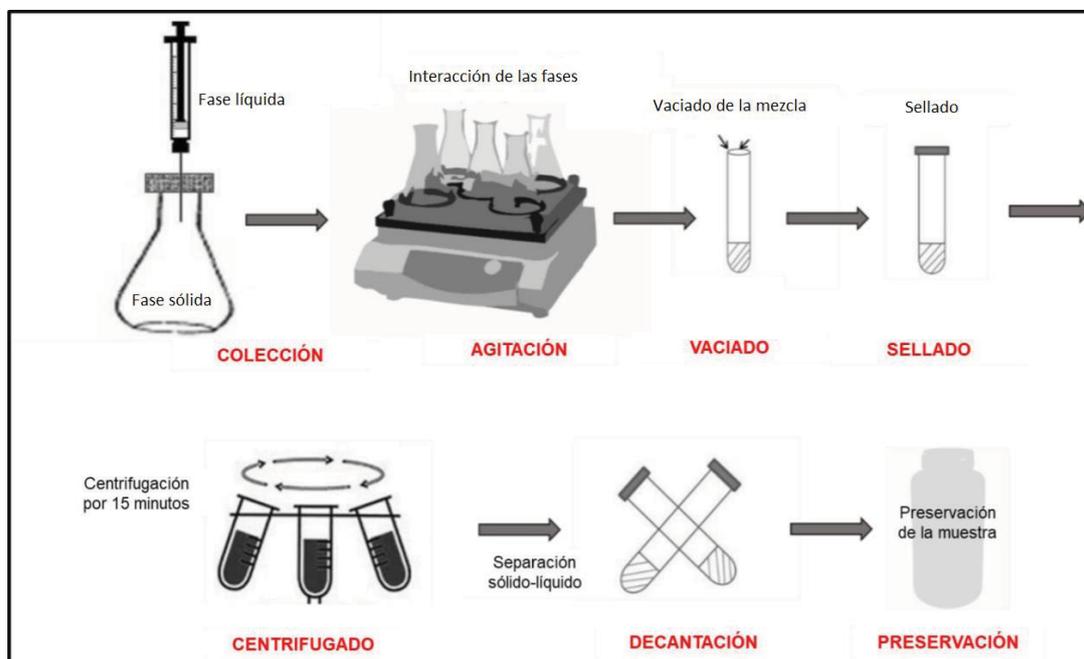


Figura 1. Esquema de las pruebas en lote a nivel laboratorio. (modificado de Manzo, 2020).

Para poder realizar las pruebas en lote a nivel laboratorio, se tomaron en cuenta los resultados obtenidos por Labastida (2014) donde la relación que ofrece la máxima adsorción entre roca/agua fue 1:5. Para esta etapa, fue necesario pesar y agregar 10 g de roca caliza Kss con un diámetro menor a 0.5 mm, la cual fue trabajada por Manzo (2019), para cada muestra de 50 mL de agua, colocados en un matraz Erlenmeyer. Basándonos en la información combinada de Alexandratos et al. (2007) y Hernández (2022), se propuso dejar las pruebas en lote a nivel laboratorio durante una hora a

300 rpm. Posteriormente, mediante el centrifugado y filtrado, se separaron la fase líquida (muestra de agua) de la fase sólida (roca). La fase líquida se almacenó para su posterior análisis.

Etapa tres.

Muestreo.

Para la segunda etapa se trabajó directamente con el agua proveniente de los pozos que se simularon en la primera etapa, es decir, agua de los dos pozos localizados en los municipios de Santa Cruz de Juventino Rosas y de Villagrán, en el estado de Guanajuato, la cual fue recolectada en septiembre de 2019 por Juárez (2020) y de los dos pozos localizados en el municipio de Zimapán en el estado de Hidalgo, así como con la misma roca caliza del municipio de Zimapán trabajada en la primera etapa y recolectada por Sosa (2020). Adicionalmente también se trabajó con la roca caliza Ki recolectada en Guanajuato por Juárez (2020). Esta etapa experimental se trabajó en febrero de 2020.

Trabajo de laboratorio.

Preparación de las muestras.

De acuerdo con el trabajo realizado por Manzo (2019), a mayor tamaño de grano, de la roca caliza Kss, mayor eficiencia para la remoción de fluoruros, mientras que un menor tamaño de grano, es más eficiente para la remoción de arsénico. Por lo anterior, para el presente trabajo se decidió trabajar con ambos tamaños de grano, siendo entre 0.125 mm y 0.5 mm el tamaño que mejor remueve fluoruro (Kss F-) y mientras la roca de grano menor a 0.125 mm es el tamaño que mejor remueve arsénico (Kss As). Al mismo tiempo, para el agua de los pozos de Guanajuato se decidió usar la roca caliza Kss F-, y la roca caliza Ki, trabajada por Juárez (2020), la cual tenía un tamaño de grano menor a 0.5 mm.

Tomando en cuenta que tenemos agua de cuatro pozos, y cada uno de ellos a su vez se dividió en dos muestras para diferente tipo de roca, obtenemos un total de ocho muestras para trabajar, de las cuales, se propuso realizar seis repeticiones conservando la misma roca, pero con una muestra de agua nueva, en total se

consideraron 48 muestras para analizar, más una muestra por cada pozo para conocer las condiciones iniciales de arsénico y fluoruro (Tabla 9).

Tabla 9. Organización de la segunda etapa.

Pozo	Guanajuato				Hidalgo			
	PV		SJMer		Muhí		Pb18	
Roca	Ki	Kss F-	Ki	Kss F-	Kss As	Kss F-	Kss As	Kss F-
1ra rep	100 mL	100 mL	100 mL	100 mL	100 mL	100 mL	100 mL	100 mL
2da rep	100 mL	100 mL	100 mL	100 mL	100 mL	100 mL	100 mL	100 mL
3ra rep	100 mL	100 mL	100 mL	100 mL	100 mL	100 mL	100 mL	100 mL
4ta rep	100 mL	100 mL	100 mL	100 mL	100 mL	100 mL	100 mL	100 mL
5ta rep	100 mL	100 mL	100 mL	100 mL	100 mL	100 mL	100 mL	100 mL
6ta rep	100 mL	100 mL	100 mL	100 mL	100 mL	100 mL	100 mL	100 mL
Total	600 mL	600 mL	600 mL	600 mL	600 mL	600 mL	600 mL	600 mL

rep: repetición usando la misma roca con muestra de agua nueva.

Pruebas en lote a nivel laboratorio.

Para realizar las pruebas en lote a nivel laboratorio se usaron 100 mL de agua por muestra de roca, por lo que de acuerdo a la relación 1:5 reportada por Labastida (2014) le corresponden 20 g de roca molida, por lo tanto, en total se pesaron 20 g de cada una de las cuatro muestras de roca Kss F-, dos muestras de roca Kss As y dos muestras de roca Ki.

Continuando con la misma metodología para tiempo y revoluciones de las pruebas en lote a nivel laboratorio de la etapa anterior, basada en Alexandratos et al. (2007) y Hernández (2022), nuevamente se trabajaron las pruebas a tiempos de una hora a 300 rpm.

Después del centrifugado de las muestras, se usaron filtros con poros de 20-25 μm con la finalidad de separar las fases y poder recuperar la mayor cantidad de la roca para la siguiente prueba en lote, la roca que quedó precipitada en el tubo donde se centrifugó se recuperó usando parte de los 100 mL a usar en la siguiente aplicación, mientras que la roca de los residuos del filtro fue recuperada con espátula. El método de recuperación de la roca fue repetido para realizar las seis repeticiones por muestra de roca.

Determinación y procesamiento de los parámetros fisicoquímicos y composición química del agua.

Parámetros fisicoquímicos.

Para la determinación de los parámetros fisicoquímicos se usaron dos equipos. Para el pH y la conductividad eléctrica se utilizó un equipo OAKTON pH/CON 510 Series y para el Eh un equipo YSI. Professional Series. Professional Plus (calibrado con una solución estándar OPR/Redox ZoBell)

Composición química.

Para determinar la composición química del agua se usaron técnicas de análisis químicos y equipos de detección. La determinación de la dureza del agua (Ca^{2+} y Mg^{2+}) y la alcalinidad (CO_3^{2-} y HCO_3^-) se realizó mediante la técnica volumétrica de titulación; la determinación de sodio y potasio se realizó por emisión atómica, empleando un espectrómetro Perkin Elmer Analyst 100; los sulfatos se determinaron por turbidimetría, mediante un espectrómetro Hewlett Packard 8452A Diode-Array y para el cloruro se usó un potenciómetro Thermo Scientific Orion 5 Star acoplado a un electrodo selectivo y un ajustador de fuerza iónica (Anexo II).

Para las lecturas los iones mayores (SO_4^{2-} , Cl^- , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+}) alcalinidad (CO_3^{2-} y HCO_3^-) se siguieron las instrucciones de Armienta *et al.*, (1987).

Fluoruro.

Para hacer las mediciones de fluoruro, se siguieron las instrucciones de Armienta *et al.*, (1987). Se usó un potenciómetro Thermo Scientific Orion 5 Star acoplado a un electrodo selectivo y como reactivos se usaron un ajustador de fuerza iónica (TISAB) y dos soluciones estándar de fluoruro, una con una concentración de 1 mg/L y la otra con una concentración de 10 mg/L de fluoruro (Anexo II), las cuales nos permiten calibrar el electrodo para una curva de calibración de 1 a 10 mg/L.

Para las mediciones de fluoruro fue necesario disolver a una relación uno a uno de la muestra que se quiere analizar con el TISAB, a las cuales se agitó, se sumergió el electrodo y se anotó el resultado medido de cada muestra. Cabe aclarar que cada diez mediciones se realizaba una prueba con una solución estándar para comprobar que el electrodo conservaba su calibración.

Arsénico.

Para determinar el arsénico se utilizó un espectrómetro de absorción atómica Perkin Elmer. AAnalyst 200 acoplado a un sistema Perkin Elmer. Flow Inyección System. FIAS 100, el cual mide concentraciones de arsina (AsH_3) de 2 a 10 ppb ($\mu\text{g/L}$). Debido a eso, un día antes del análisis de muestras fue necesario hacer tratamiento de pre-reducción de todas las muestras, ya que el arsénico se encuentra como As(V) . Adicionalmente fue necesario hacer los cálculos para diluir las muestras entre 2 a 10 ppb, ya que una concentración fuera de la curva de calibración puede presentar errores en las mediciones. Los reactivos a utilizar fueron yoduro de potasio grado reactivo al 5% como agente reductor y ácido clorhídrico grado reactivo al 10% para una matriz ácida que permita la reducción del arsénico.

Debido a que en todos los casos conocemos aproximadamente cuánto puede contener de concentración inicial de arsénico, se hace la estimación del peor escenario de remoción (0%), esto para realizar las diluciones que nos den los datos aproximados en ppb.

Procesamiento de datos (Índices de saturación de minerales y diagramas de Pourbaix)

Con los resultados obtenidos del análisis fisicoquímico y de la composición química del agua, se realizó el modelado de los índices de saturación de los minerales que podrían precipitar, con el programa Visual MINTEQ para poder estimar el tipo de remoción que puede estar presente (Anexo VI), esto debido a que Sosa (2020) reporta la existencia de tres procesos principales en la remoción de arsénico y fluoruro (adsorción, coprecipitación y precipitación). Adicionalmente, para las muestras de la segunda etapa se calcularon los diagramas de Pourbaix con el programa HSC chemistry 9.0 para conocer cuál es la especie predominante tanto de arsénico como de fluoruro en las condiciones de los parámetros fisicoquímicos medidos (Anexo V).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Etapa uno

A continuación, se muestran los resultados de la georreferenciación de los mapas obtenidos de Juárez (2020), Labastida (2014) y de Sosa (2020), además de los de la cartografía y de los creados a partir de los datos descargados del SGM (puntos de georreferenciación en Anexo IV). Se muestra primero la información del estado de Guanajuato y posteriormente los del estado de Hidalgo.

Guanajuato

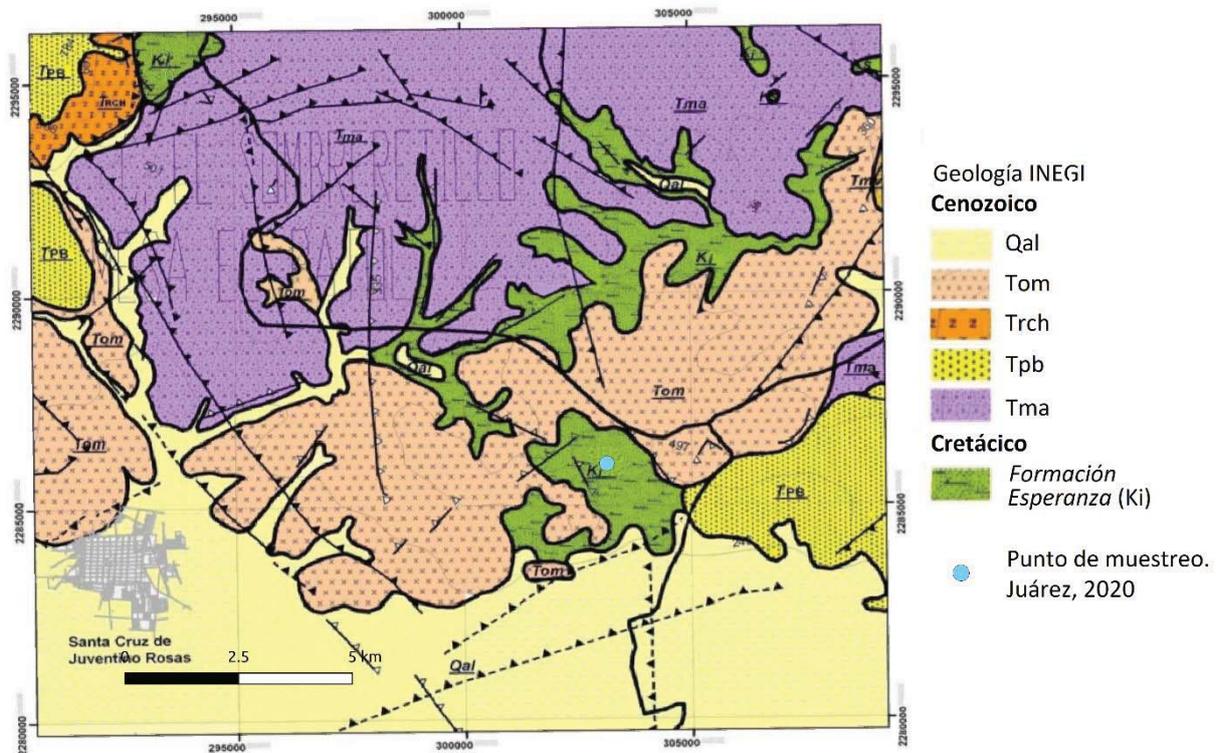
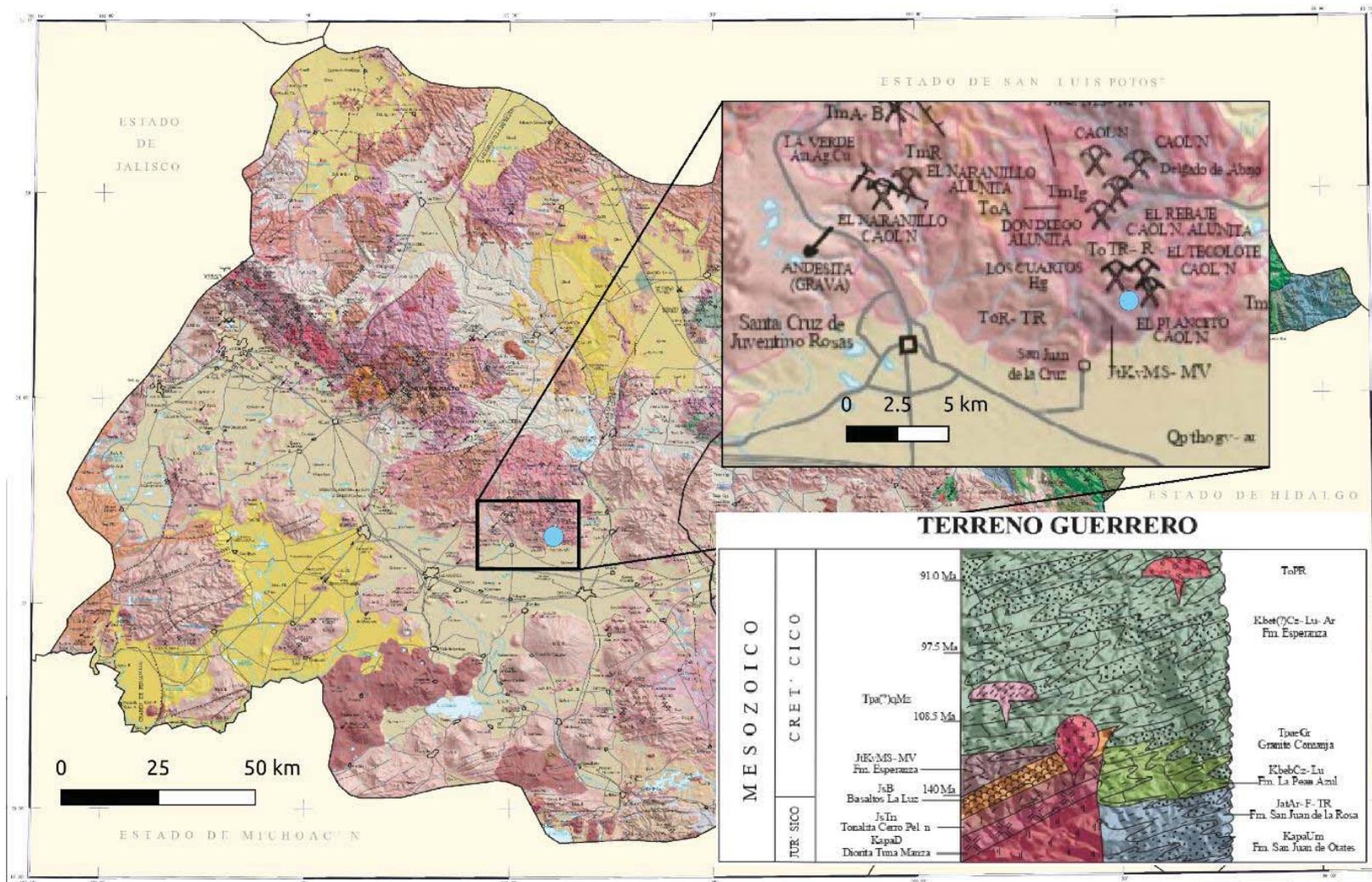


Figura 2. Mapa geológico de Santa Cruz de Juventino Rosas (Elaborado en QGIS 2.8.8 con datos de Juárez, 2020)

La información de la Figura 2, obtenida de Juárez (2020), indica que las coordenadas de muestreo reportadas, coinciden con la formación indicada en el mapa como “Ki”, la cual corresponde a la Formación Esperanza y es descrita como una agrupación de lutitas, areniscas y calizas.



● Punto de muestreo. Juárez, 2020

Figura 3. Mapa geológico de Guanajuato (Elaborado en QGis 2.8.8 con datos del SGM, 2007).

En la Figura 3 se puede observar que el punto de recolección de la muestra corresponde a la zona con clave JtKvMS-MV, el cual, según la columna estratigráfica de la carta del SGM, corresponde a la formación Esperanza del cretácico inferior. Esta información coincide completamente con lo mencionado por Juárez (2020).

Las dos figuras presentan en sus mapas polígonos similares, por lo tanto, para el caso de la roca Ki, geográficamente, el punto de recolección de ambas imágenes coincide con la formación reportada por Juárez, la cual es reportada como Formación Esperanza.

Hidalgo

Para este estado se muestran cinco puntos de recolección de roca, de los cuales, tres pertenecen a Sosa (2020), y son con los que se trabajó en el presente informe; y dos son de Labastida (2014), con quien se presentó el conflicto, por ubicación geográfica, de la formación a la cual pertenece la roca. En los tres puntos de recolección de Sosa (2020), la roca es identificada como Kss y descrita como una formación de lutitas carbonosas, calizas arcillosas y calizas micríticas con variación lateral, mientras que Labastida (2014), en un punto de recolección identifica la roca como Kss, mientras que en el segundo punto de recolección la reporta como Kit, la cual es reportada como una formación compuesta principalmente de rocas calizas, siendo éste el sitio donde se presenta el conflicto.

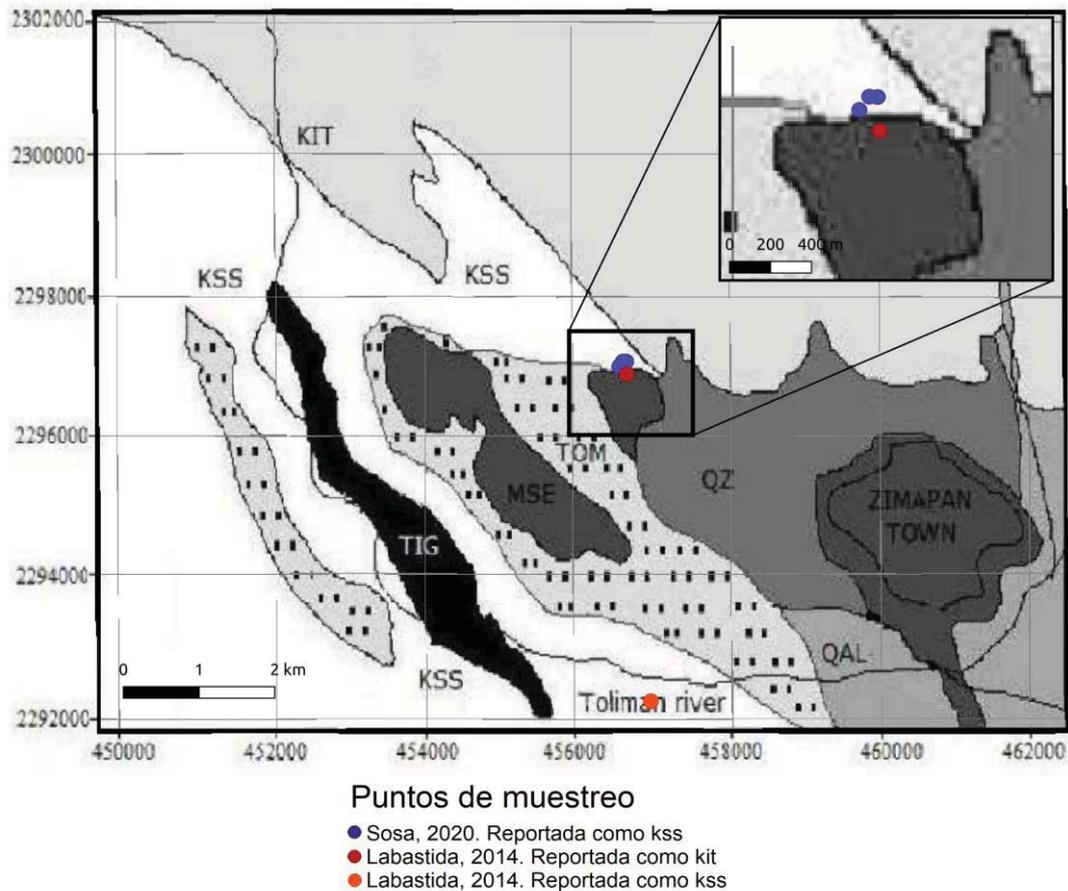
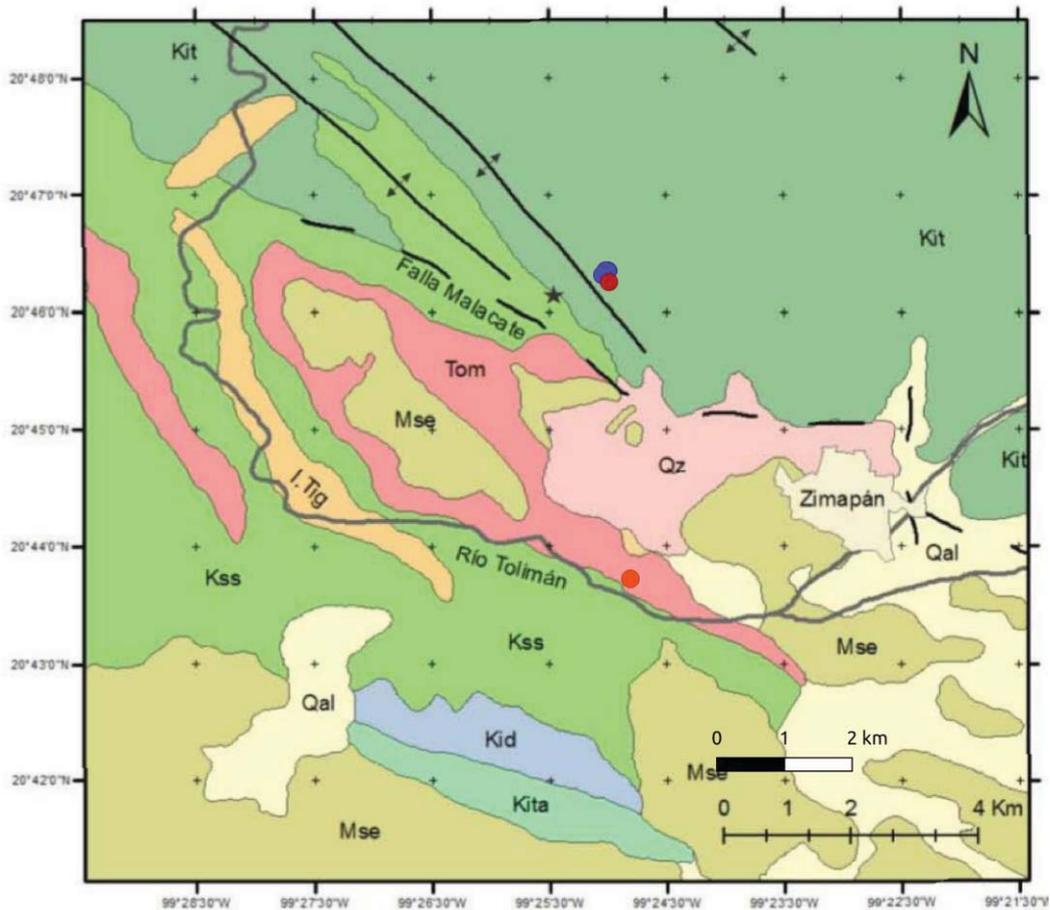


Figura 4. Mapa geológico de Zimapán. (Elaborado con Qgis 3.22.4 con datos de Labastida, 2014).

La Figura 4 muestra que el punto de recolección que Labastida (2014) reporta como Kss, coincide correctamente con la formación Kss del mapa, mientras que su punto de recolección reportado como Kit, coincide con la formación Mse, que de acuerdo a Labastida (2014), sería la formación Las Espinas, perteneciente al Terciario Mioceno. Finalmente, los tres puntos de Sosa coinciden en la formación Kss. Como se puede observar en el acercamiento, estos últimos puntos de recolección se encuentran en el límite del polígono entre Kss y Mse.

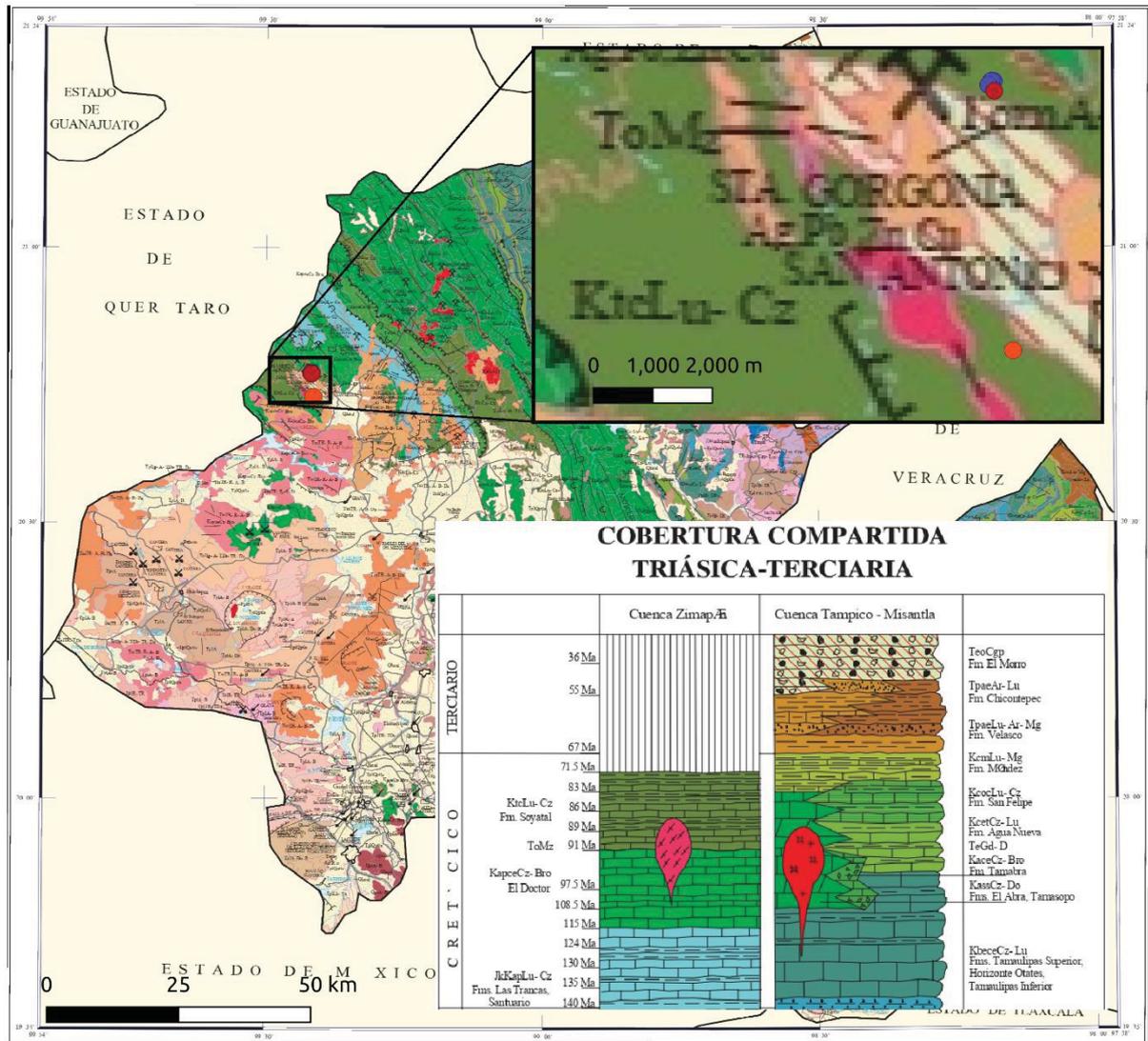


Puntos de muestreo

- Sosa, 2020. Reportada como kss
- Labastida, 2014. Reportada como kit
- Labastida, 2014. Reportada como kss

Figura 5. Mapa geológico de Zimapán. (Elaborado con Qgis 2.8.8 con datos de Sosa, 2020).

Para la Figura 5, se puede observar que todos los puntos de recolección caen en formaciones diferentes a las de la Figura 4, donde siendo el punto de recolección de Labastida (2014) reportado como Kit, el único que coincide a lo reportado para esta figura, mientras que el punto que reportó como Kss se encuentra en la formación Tom, la cual Labastida (2014) reporta como formación El Morro, perteneciente al Terciario Oligoceno. Finalmente, los tres puntos de recolección de Sosa (2020) caen en la formación Kit.



Puntos de muestreo

- Sosa, 2020. Reportada como kss
- Labastida, 2014. Reportada como kit
- Labastida, 2014. Reportada como kss

Figura 6. Mapa geológico de Hidalgo (Elaborado en QGis 2.8.8 con datos del SGM, 2007).

Continuando con la Figura 6, se puede observar que los cinco puntos de recolección caen en la formación con clave KtLu-Cz, la cual, según la columna estratigráfica del SGM, corresponde a la Formación Soyatal (Kss).

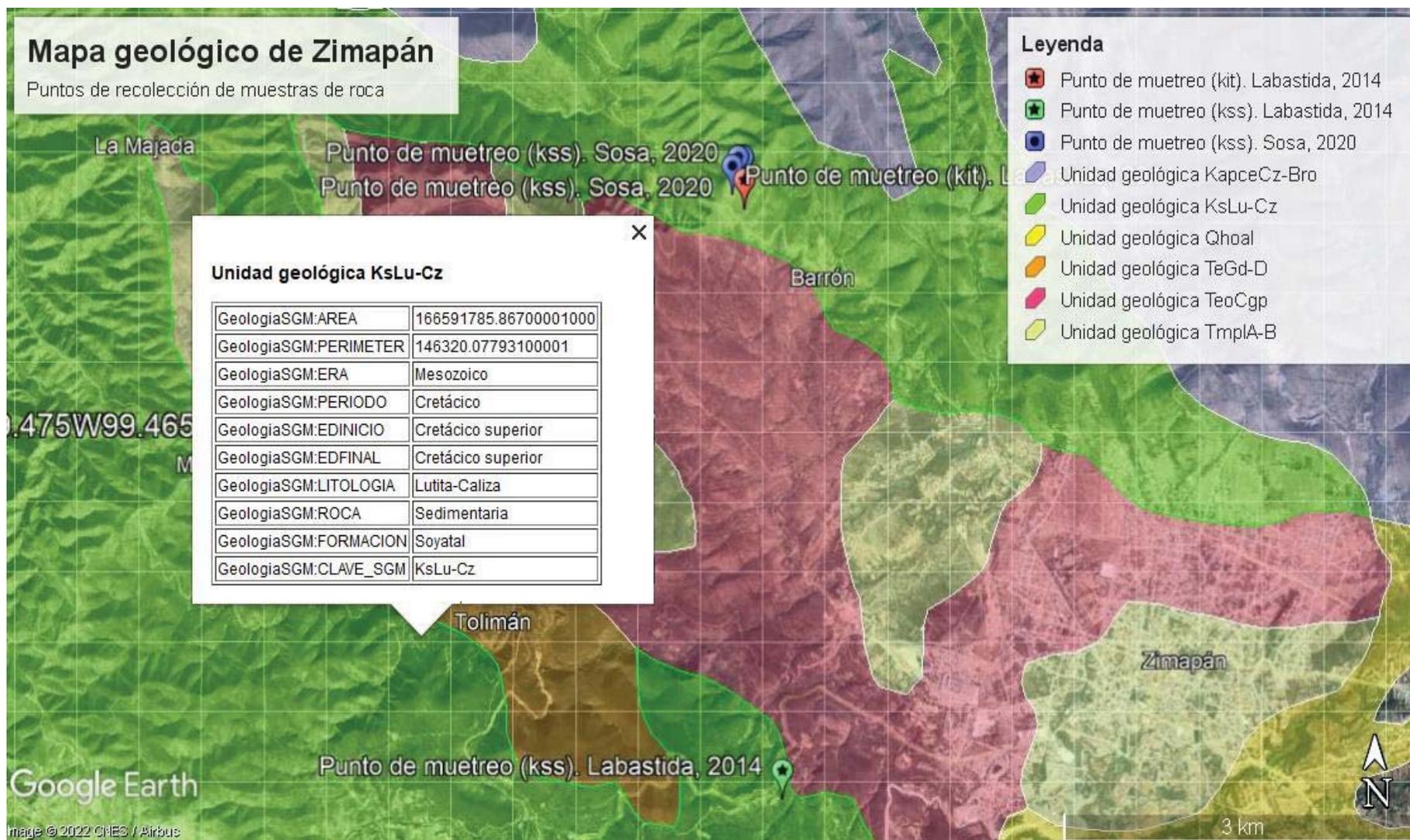


Figura 7. Mapa geológico de Zimapán (Elaborado en Google Earth Pro 7.3.4 con datos del SGM, 2017).

Finalmente, en la Figura 7, al igual que en la Figura 6, los cinco puntos de recolección coinciden con la clave de la unidad geológica KsLu-Cz, siendo nuevamente la formación Soyatal (Kss).

Discusión de la etapa uno.

Para la Figura 4 y la Figura 5 se puede observar que los puntos de recolección de Labastida (2014) y Sosa (2020) generan conflicto tanto entre ellos, como a sí mismos, ya que las mismas imágenes que ellos publican, contradicen lo que reportan. Mientras que para la Figura 6 y la Figura 7 únicamente el punto de muestreo que Labastida (2014) reporta como Kit, se encuentra en la formación Kss, sin embargo, el otro punto de Labastida (2014) que reporta como Kss se encuentra muy cerca del límite poligonal de la Formación El Morro de ambas figuras y como se había mencionado anteriormente, esto puede provocar conflicto al momento de identificar la formación.

Al igual que con lo mencionado con las imágenes de Guanajuato, los polígonos de las formaciones geológicas son similares, pero no son exactamente iguales, lo que en gran parte genera conflicto de identidad de la formación geológica.

Etapa dos.

A continuación, se muestran los parámetros fisicoquímicos y la composición química antes de contaminar las muestras de agua de Axocopan y Atlimeyaya.

Tabla 10. Parámetros fisicoquímicos de las muestras de agua. (En rojo se muestran las concentraciones que superan los límites permisibles de acuerdo a la NOM-127-SSA1-2021)

Pozo	pH	Conductividad (µs/cm)
Axocopan	5.57	661
Atlimeyaya	6.09	184
Norma	6.5-8.5	

Tabla 11. Composición química de las muestras de agua.

Pozo	CO ₃ ²⁻ (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	SiO ₂ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	As (mg/L)	F ⁻ (mg/L)	Balance iónico
Axocopan	n.d.	409	39	95.33	18.35	52.55	5.33	33	44	<0.002	0.50	2.32
Atlimeyaya	n.d.	98	7	64.23	3.23	15.29	2.23	10	10	<0.002	0.55	5.42
Norma	500*	500*	400		250	200		500*	500*	0.025	1.5	

n.d. = No detectable.

Los valores límites permitidos pertenecen a la norma NOM-127-SSA1-2021.

*Valores para dureza total de acuerdo a la NOM-127-SSA1-2021 (mg/L de CaCO₃).

La Tabla 10 nos indica que el único parámetro fuera de la NOM-127-SSA1-2021 es el pH, el cual, es ligeramente ácido, mientras, en la Tabla 11, se observa la clara diferencia que presentan las cantidades de bicarbonatos y sulfatos entre ambas muestras.

Los resultados de las mediciones tanto previas como posteriores, a las pruebas en lote a nivel laboratorio con la roca Kss, así como el porcentaje de retención de arsénico y fluoruro para las muestras de agua de Axocopan y Atlimeyaya se reportan a continuación.

Axocopan.

Tabla 12. Resultados de fluoruro y arsénico de las pruebas en lote a nivel laboratorio de Axocopan. (En rojo se muestran las concentraciones que superan los límites permisibles y en naranja las concentraciones que se encuentran en los límites de transición de acuerdo a la NOM-127-SSA1-2021 [véase Tabla 1]).

Axocopan						
ID	Arsénico			Fluoruros		
	Concentración inicial (mg/L)	Concentración final (mg/L)	% de remoción	Concentración inicial (mg/L)	Concentración final (mg/L)	% de remoción
axpv-o	1.788	0.422	76.40	6.03	3.44	42.95
axpv-d	2.317	0.569	75.45	6.87	3.64	47.02
axsj-o	1.558	0.397	74.54	2.21	2.07	6.33
axsj-d	1.509	0.366	75.74	1.80	1.96	-8.89
axmu-o	2.590	0.695	73.16	1.40	1.77	-26.43
axmu-d	3.410	0.929	72.76	1.37	1.79	-30.66
Axpb	1.430	0.356	75.07	0.74	1.64	-121.62
Norma	0.025	0.025		1.5	1.5	

De acuerdo a la Tabla 12, se puede deducir que para el arsénico, se observa que el porcentaje de retención en todas las muestras es aproximadamente el mismo (con un promedio de retención del 74.73%), esto independientemente que la concentración inicial varíe entre 1.43 mg/L a 3.41 mg/L, sin embargo, también se observa que la concentración inicial más grande es la que tiene la menor remoción y la concentración menor se encuentra arriba del promedio de remoción, por lo que basándose en los resultados de Hernández (2020), también se puede deducir que a menor concentración inicial, hay una mayor remoción. Sin embargo, pese a la alta capacidad de remoción de la roca Kss, ningún resultado permitió reducir los límites permisibles de acuerdo a la NOM-127-SSA1-2021.

Para fluoruros se observa que, a diferencia del arsénico, hay una mayor efectividad en la remoción del contaminante cuando la concentración es mayor, sin embargo, también se observa que hay una concentración crítica cuando la concentración inicial se encuentra alrededor de los 2 mg/L, ya que cuando es inferior, la roca caliza cede fluoruros al medio acuoso, además, en estudios anteriores, se demostró que la roca Kss contiene fluorita (Manzo, 2019), la cual se podría estar solubilizando.

El punto de equilibrio de 2 mg/L coincide con lo reportado por Fan y colaboradores (2003), quienes indican que la mayoría de los materiales de retención (hidroxiapatita, calcita, cuarzo y cuarzo activado por iones férricos) muestran una capacidad muy baja de eliminación de fluoruro por debajo de los 2 mg/L. De la misma manera que con el arsénico, para los fluoruros, los resultados con la roca Kss no permitieron reducir los límites permisibles de acuerdo a la NOM-127-SSA1-2021.

Atlimeyaya.

Tabla 13. Resultados de fluoruro y arsénico de las pruebas en lote a nivel laboratorio de Atlimeyaya. (En rojo se muestran las concentraciones que superan los límites permisibles y en naranja la concentración que se encuentra en los límites de transición de acuerdo a la NOM-127-SSA1-2021 [véase Tabla 1]).

Atlimeyaya						
ID	Arsénico			Fluoruro		
	Concentración inicial (mg/L)	Concentración final (mg/L)	% de remoción	Concentración inicial (mg/L)	Concentración final (mg/L)	% de remoción
atpv-o	2.771	0.421	84.82	8.31	4.26	48.74
atpv-d	2.545	0.362	85.80	8.50	4.47	47.41
atsj-o	0.582	0.085	85.48	3.21	2.43	24.30
atsj-d	0.520	0.078	84.99	2.64	2.24	15.15
atmu-o	1.399	0.241	82.80	2.46	2.19	10.98
atmu-d	0.966	0.133	86.24	2.71	2.30	15.13
atpb	1.165	0.185	84.11	1.45	1.92	-32.41
Norma	0.025			1.5		

Para el caso del arsénico, la Tabla 13 nos muestra que, a diferencia de la tabla anterior (Tabla 12), donde se puede observar que a menor concentración inicial mayor remoción, los resultados presentados no nos permiten llegar a la misma deducción. Sin embargo, a pesar de que los datos de lecturas iniciales no son iguales para su equivalente entre los datos de Axocopan y Atlimeyaya, sí se puede observar que hay mayor efectividad en la remoción de arsénico para Atlimeyaya comparado con

Axocopan, además hay datos que sí contienen concentraciones muy similares (para **atmu-o** con **axpb**, donde la diferencia de porcentaje es de 7.07, y para **atpv-d** con **axmu-o**, donde la diferencia es de 12.64), y la diferencia varía alrededor de 10 unidades de porcentaje. Por lo tanto, sabiendo que la remoción promedio por roca caliza para Atlimeyaya se encuentra en 84.89%, y el promedio de Axocopan en 74.73%, se observa que hay una diferencia de 10.16 unidades más de porcentaje de efectividad de la remoción.

Para los fluoruros nuevamente se corrobora que existe un punto de equilibrio alrededor de los 2 mg/L de F^- , que es el límite para la remoción de este elemento (Fan et al., 2003). De la misma manera que en la Tabla 12, es evidente que, a menor concentración de fluoruros en el medio acuoso, existe un menor porcentaje de remoción por parte del material geológico (Kss) y que éste aporta fluoruros cuando la concentración inicial se encuentra aproximadamente debajo de los 2 mg/L.

Discusión de la etapa dos

Por último, se pueden ver las gráficas de concentración inicial contra porcentaje y remoción por roca caliza, este último dato es resultado de la concentración inicial menos la concentración final.

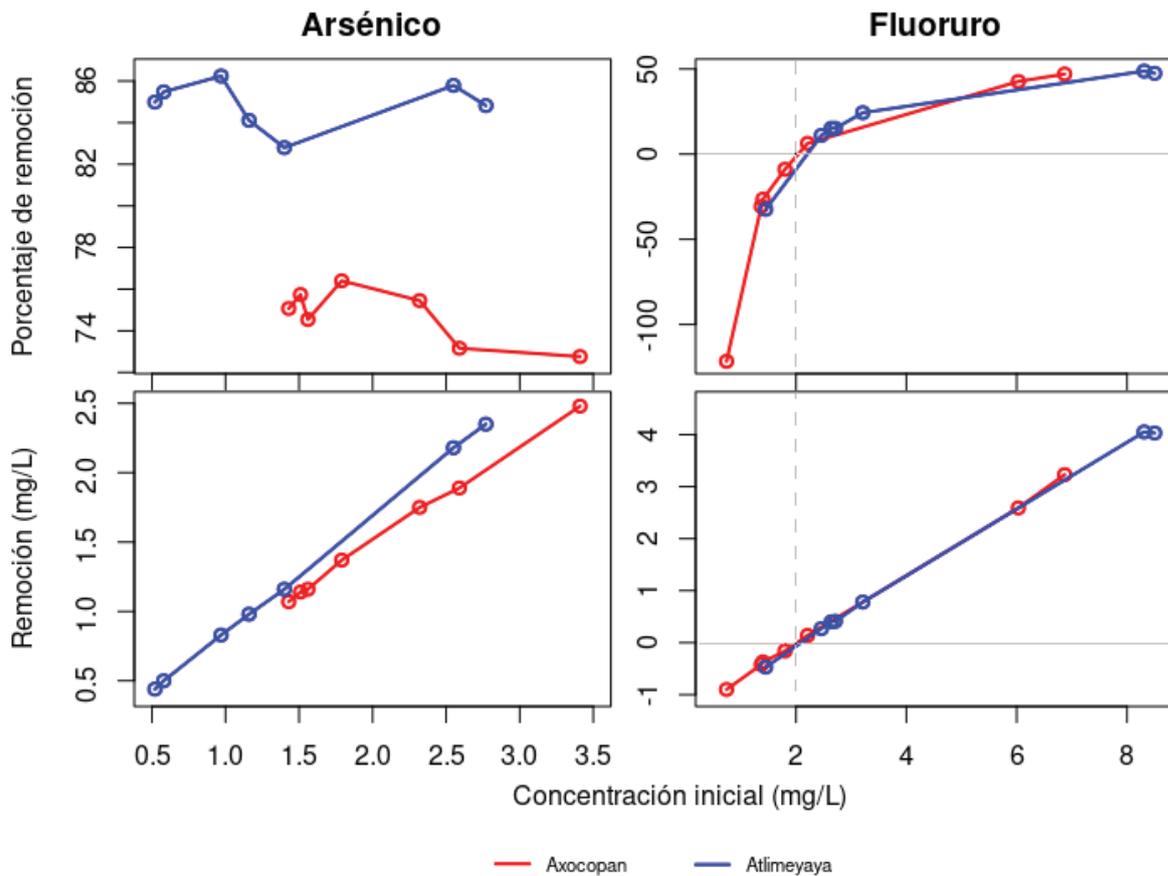


Figura 8. Gráficas comparativas del porcentaje de remoción y remoción de la roca caliza para arsénico y fluoruro de las muestras de agua.

En la Figura 8 se encuentran las gráficas de las concentraciones iniciales de arsénico y fluoruro contra el porcentaje de remoción y contra la concentración que removió la roca caliza (Concentración inicial menos concentración final).

En arsénico, aunque no es evidente, en la gráfica de porcentaje de remoción, se deduce que existe una tendencia a tener menor remoción, cuando la concentración inicial va en aumento (Hernández, 2022), siendo más evidente en los resultados de Axocopan que en los de Atlimeyaya. Sin embargo, claramente se ve que hay una mayor capacidad de remoción de arsénico por roca caliza para la muestra de Atlimeyaya. En cuanto a la forma de la gráfica de porcentaje, no es posible deducir algún tipo de comportamiento con los datos obtenidos. Al comparar los datos en la gráfica de remoción, se observa que los datos tienen comportamiento lineal y que la pendiente de remoción, para el caso de Atlimeyaya es ligeramente mayor que la de Axocopan, lo que se ve reflejado en la gráfica de porcentajes.

Para los fluoruros no se observa una diferencia significativa en cuanto a la remoción de ambas muestras y queda evidente en ambas gráficas que el punto de equilibrio se encuentra alrededor de los 2 mg/L. En los datos de porcentaje, se observa que la forma de la gráfica es similar a una racional (del tipo $-1/x$), donde aparentemente en una de las asíntotas, para estos datos, se encuentra alrededor del 50% de remoción. En el caso de la gráfica de remoción, al igual que con el arsénico, se observa que con los datos obtenidos hay un comportamiento lineal, siendo para este caso, una pendiente aproximada a $\frac{1}{2}$, lo que se refleja en el porcentaje de remoción.

El modelado con el programa Visual MINTEQ da como resultado teórico que hay saturación para fluorita en las muestras **axpv-o** y **axpv-d**, lo que indicaría que, además de la adsorción, existe precipitación (Anexo VI). Para el resto de las muestras, incluidas las de Atlimeyaya, los índices de saturación se encuentran debajo de 0, por lo que, teóricamente, el principal método de remoción para arsénico y fluoruro es la adsorción (Anexo VI).

Etapa tres

A continuación, se presentan los resultados de las determinaciones de los parámetros fisicoquímicos y composición química, así como los de los resultados de las pruebas en lotes a nivel laboratorio de las aplicaciones subsecuentes para las muestras de los pozos de Guanajuato y de Hidalgo (Anexo III).

Guanajuato

Tabla 14. Parámetros fisicoquímicos del agua de los pozos de Guanajuato.

Pozo	pH	Conductividad ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	Eh (mV)
SJM	8.00	459	108
PV	8.35	592	110
Norma	6.5-8.5		

Los valores límites permitidos pertenecen a la norma NOM-127-SSA1-2021.

Tabla 15. Composición química del agua de los pozos de Guanajuato. (En rojo se muestran las concentraciones que superan los límites permisibles de acuerdo a la NOM-127-SSA1-2021 [véase Tabla 1])

Pozo	CO ₃ ²⁻ (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	SiO ₂ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	As (mg/L)	F ⁻ (mg/L)	Balance iónico
SJM	18	158	20	74.15	10.60	94.50	9.92	11	5	0.028	2.79	4.1
PV	16	196	27	136.32	30.90	129.80	9.99	5	1	0.064	5.16	2.4
Norma	500*	500*	400		250	200		500*	500*	0.025	1.5	

n.d. = No detectable.

Los valores límites permitidos pertenecen a la norma NOM-127-SSA1-2021.

*Valores para dureza total de acuerdo a la NOM-127-SSA1-2021 (mg/L de CaCO₃).

Como se puede observar en la Tabla 15, el contenido de iones interferentes se encuentra entre los de Axocopan y Atlimeyaya (Tabla 11), y el contenido de arsénico, a pesar de estar sobre la norma, se encuentra debajo a los experimentados en la etapa dos, por lo que se espera que el arsénico removido sea con una eficiencia superior la de la muestra de Axocopan. La tabla también nos muestra que hay un problema mayor con fluoruros que con arsénico, sin embargo, ambos contaminantes se encuentran fuera de los límites iniciales permisibles por la NOM-127-SSA1-2021.

Las siguientes gráficas muestran los resultados de arsénico y fluoruro de las aplicaciones subsecuentes para las muestras de los pozos de Guanajuato, donde también se indican las concentraciones iniciales y el límite inicial permitido para la NOM-127-SSA1-2021.

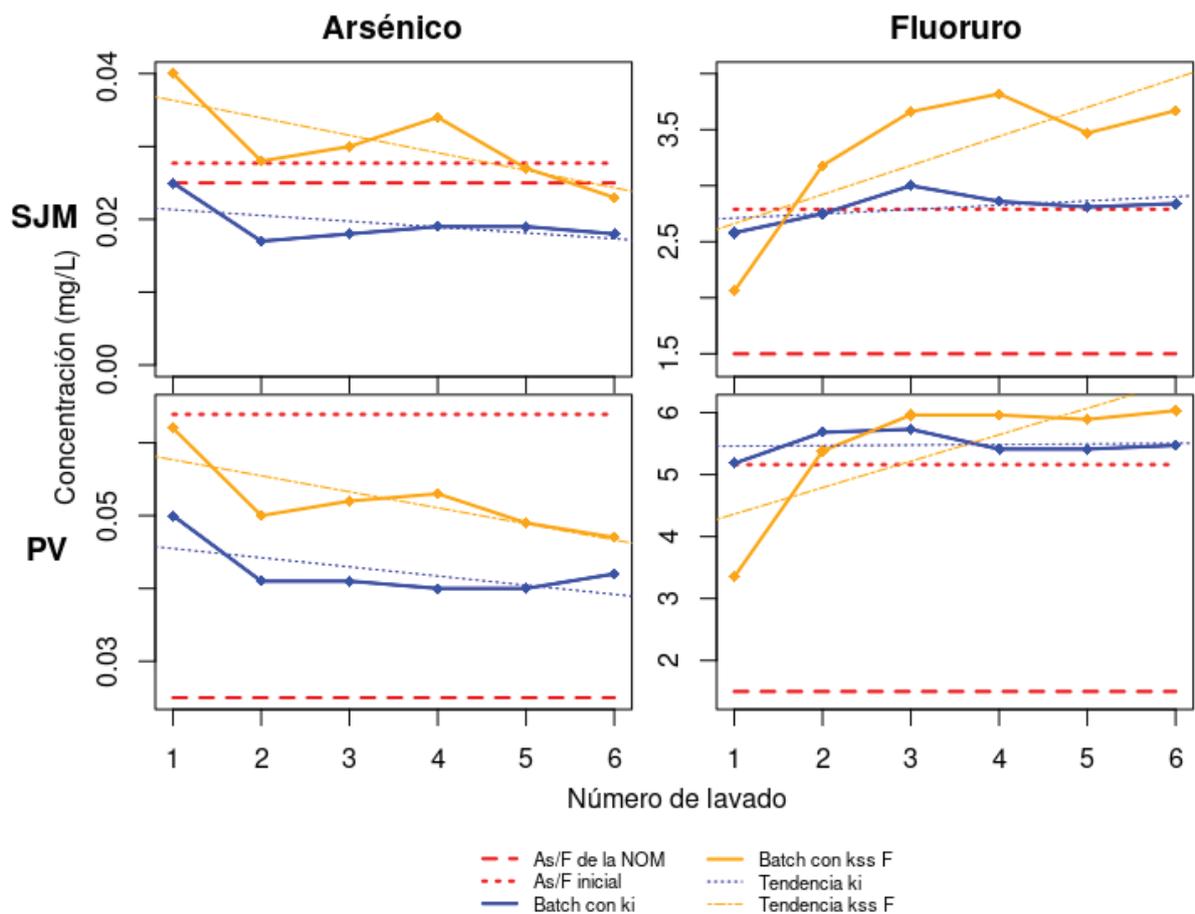


Figura 9. Gráficas de los resultados de las pruebas en lote a nivel laboratorio de As y F⁻ del agua de los pozos de Guanajuato.

En la Figura 9 se muestran las gráficas de las tablas del Anexo III para el estado de Guanajuato, donde se indica el número de lavado contra la concentración final para cada roca. Adicionalmente se presentan las concentraciones iniciales de las muestras y la concentración inicial de la NOM-127-SSA1-2021. También es posible observar que la remoción de arsénico se encuentra muy por debajo de las expectativas, de acuerdo a lo mostrado en la etapa dos.

Arsénico

En el caso de remoción de arsénico podemos observar que para las dos gráficas existe un comportamiento similar en las aplicaciones, siendo más efectiva la roca caliza de Guanajuato (Ki) que la de Hidalgo (Kss) y que el primer lavado fue el menos eficiente que los subsecuentes, por lo tanto puede haber dos situaciones que están pasando: primero, como se demostró en la etapa dos, de acuerdo a la tendencia observada, se esperaba que la remoción de arsénico fuera mayor, sin embargo, no

fue así esto puede deberse a que posiblemente existe un punto crítico, en el que al tener menos arsénico en la fase acuosa, la roca reduce su capacidad de remoción; segundo, durante el primer lavado, como lo demostró Sosa (2020) y Hernández (2022), al no estar en equilibrio, la roca libera carbonatos, bicarbonatos y sulfatos, los cuales son interferentes en la remoción de arsénico, por lo tanto, si tomamos en cuenta que el primer lavado sólo sirve para lixiviar la roca, entonces a partir del segundo lavado y hasta el último, podemos observar que existe una aparente remoción constante de arsénico, lo que indica la disponibilidad de sitios de sorción por parte de la roca. En los lavados con la roca “Kss F”, a pesar de aparentar una remoción constante, el comportamiento también puede ser ligeramente senoidal, sin embargo, los datos del presente trabajo no permiten determinarlo.

Un caso particular sucede para las muestras SJM, ya que se puede observar que la roca “Kss F”, para los primeros cuatro lavados lixivia arsénico en lugar de removerlo; para este caso debemos tomar en cuenta que la concentración inicial es la más baja de las cuatro muestras, incluso siendo muy cercana al de la norma inicial, por lo que es probable que, para éstas muestras, el punto de equilibrio del arsénico se encuentre cercano a esta concentración, ya que incluso la eficiencia de remoción de la roca para las otras muestras de Guanajuato (Anexo III) se encuentra aproximadamente entre el 20% y 40%, (esto sin tomar en cuenta el primer lavado, donde la eficiencia disminuye aproximadamente 20 unidades porcentuales con respecto a los subsecuentes).

Resultados arrojados por difracción de rayos x en ambas rocas realizados por Manzo (2019) para “Kss F” y por Juárez (2020) para “Ki”, estiman que los contenidos de calcita se encuentran alrededor del 89% y entre 66 y 79% respectivamente, por lo que, para los resultados del presente trabajo, la roca con menos calcita fue más eficiente para la remoción de arsénico que la que contiene más, por lo que el contenido de calcita no necesariamente es un referente de la efectividad de remoción de la roca.

También se puede agregar que todos los lavados la roca “Ki”, más el sexto lavado con “Kss F” para SJM, fueron los únicos que lograron reducir las condiciones iniciales de arsénico, sin embargo, no lograron llegar a los 0.01 mg/L de cumplimiento gradual requeridos a los a los 6 años de entrada en vigor de la NOM-127-SSA1-2021, basado

en el número de habitantes para el municipio de Zimapán, de acuerdo a la NOM-127-SSA1-2021

Fluoruro

El procedimiento para la remoción de fluoruros fue efectivo al realizar sólo un lavado, con excepción de la muestra PV cuando interactuó con la roca de Guanajuato, la cual no mostró cambio aparente. Para el resto de las muestras se observó que en lavados posteriores la roca lixivia a los fluoruros, observando un equilibrio a partir del cuarto lavado, siempre mostrando una concentración superior a la inicial.

Tomando en cuenta el punto de equilibrio encontrado en la etapa anterior, podemos deducir que el primer lavado resultó más efectivo precisamente por ese equilibrio, sin embargo, en aplicaciones subsecuentes se puede observar que los lavados siguientes cambian ese punto de equilibrio, el cual podría ser encontrado mediante isotermas de adsorción, siendo útil para aplicaciones subsecuentes.

En la muestra de PV, al ser más evidente que la concentración inicial se encuentra aproximadamente dos y media veces por arriba del punto de equilibrio, (5.16 mg/L) supondría que se lleve a cabo una remoción del elemento; sin embargo, esto no ocurre así (a excepción del primer lavado con "Kss F"). Lo que podría estar relacionado con interferencias generadas por la presencia de otros iones como lo mencionan Yang y colaboradores (1999), al indicar que es importante determinar el efecto de iones coexistentes en el proceso de remoción de fluoruro mediante calcita; al estar presentes otros aniones en la matriz acuosa, éstos interferirían en su remoción.

A pesar de que los primeros lavados fueron los únicos capaces de realizar remoción del ion fluoruro, de manera general, con ninguna de las aplicaciones se logró una concentración debajo del límite permisible de acuerdo con la NOM-127-SSA1-2021, por lo que la remoción de fluoruro por roca caliza resulta un método complicado, sobre todo cuando la concentración inicial se encuentra cerca del equilibrio de remoción (2 mg/L).

Hidalgo

Tabla 16. Parámetros fisicoquímicos del agua de los pozos de Hidalgo

Pozo	pH	Conductividad (μs/cm)	Eh (mV)
Muhí	7.88	485	142
Pb18	7.59	474	135
Norma	6.5-8.5		

Los valores límites permitidos pertenecen a la norma NOM-127-SSA1-2021.

Tabla 17. Composición química del agua de los pozos de Hidalgo. (En rojo se muestran las concentraciones que superan los límites permisibles de acuerdo a la NOM-127-SSA1-2021) [véase Tabla 1]

Pozo	pH	CO ₃ ²⁻ (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	SiO ₂ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	As (mg/L)	F ⁻ (mg/L)	Balance iónico
Muhí	7.88	12	154	66	15.80	6.44	49.25	4.37	55	19	1.267	2.29	2.07
Pb18	7.59	10	155	62	14.70	8.96	10.55	1.60	84	16	0.611	0.68	0.95
Norma	6.5-8.5	500*	500*	400	---	250	200	---	500*	500*	0.025	1.5	

n.d. = No detectable.

Los valores límites permitidos pertenecen a la norma NOM-127-SSA1-2021.

*Valores para dureza total de acuerdo a la NOM-127-SSA1-2021 (mg/L de CaCO₃).

A diferencia de los resultados de las muestras de Guanajuato (Tabla 15), en la Tabla 17 podemos notar que el problema mayor es con arsénico donde incluso, para el pozo Pb18, la concentración se encuentra dentro de la norma final para fluoruros, sin embargo, para el pozo Muhí, la situación es diferente, donde ambos contaminantes presentan un problema. En cuanto al contenido de iones interferentes, se puede observar que es muy similar al de las muestras de agua de Guanajuato, por lo que también se espera que la remoción de arsénico sea superior al de la muestra de Axocopan de la etapa dos.

Las siguientes gráficas muestran los resultados de arsénico y fluoruro de las aplicaciones subsecuentes para las muestras de los pozos de Hidalgo, donde también se muestran las concentraciones iniciales y el límite inicial permitido para la NOM-127-SSA1-2021.

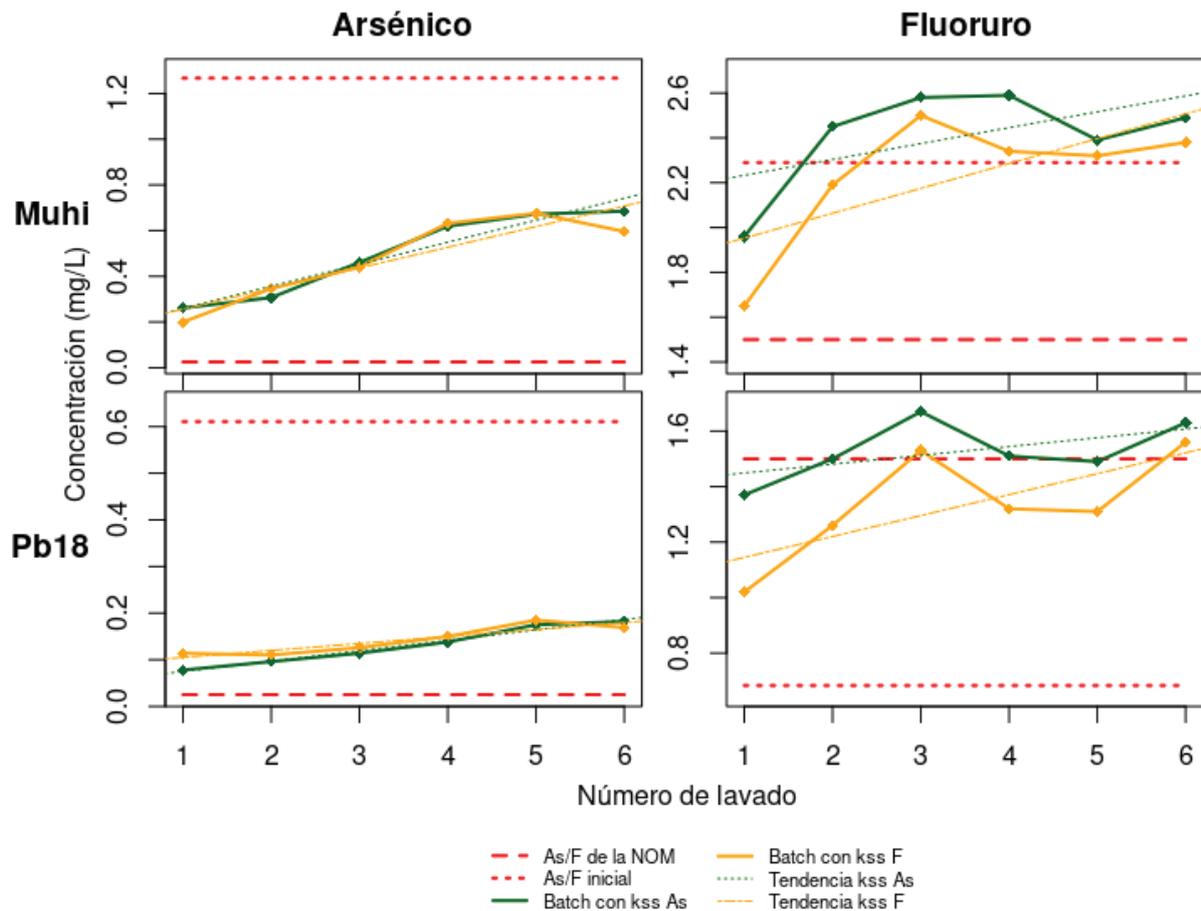


Figura 10. Gráficas de los resultados de las pruebas en lote a nivel laboratorio de As y F⁻ del agua de los pozos de Hidalgo.

En la Figura 10 nuevamente se muestran las gráficas de las tablas del Anexo III, para el estado de Hidalgo, donde se indica el número de lavado contra la concentración final para cada roca. Adicionalmente se presentan las concentraciones iniciales de las muestras y la concentración inicial de la NOM-127-SSA1-2021.

Arsénico.

A diferencia de las muestras de Guanajuato, se puede observar que la remoción de arsénico para las muestras de Hidalgo con la roca caliza Kss es lineal para ambos pozos con una tendencia a disminuir la remoción conforme aumentan los lavados, teniendo únicamente como diferencia el tamaño de grano de la roca usado en cada lavado. Comparando los resultados de las rocas calizas usadas en los lavados, se corrobora lo concluido por Manzo (2019), que, a menor tamaño de grano, mayor

remoción para arsénico, ya que, de los doce lavados, ocho presentaron mejor remoción con la roca de grano pequeño (Kss As).

En cuanto a los iones interferentes, a diferencia de los resultados de las muestras de Guanajuato, se observa que hay una remoción cercana a lo esperado, lo que significa que, a pesar de ser posible que, de la misma manera que en el caso de Guanajuato, la roca esté liberando carbonatos, bicarbonatos y sulfatos, éstos no cambian de manera significativa la remoción a estas concentraciones iniciales. Por lo tanto, se deduce que es altamente probable que cuando la concentración inicial de arsénico es cercana a un punto crítico, la roca ya no es tan efectiva en la remoción como se vio para las muestras de Guanajuato.

En las muestras de ambos pozos se observa una tendencia a remover menos arsénico conforme se hacen más lavados, lo que indica que los sitios de sorción de la roca van disminuyendo. Al comparar los resultados entre las muestras de Muhí con las de Pb18, se observa que, para el primero, la eficiencia de la remoción se va haciendo menor comparada con la del segundo; básicamente esto se debe a la concentración inicial, ya que como es de esperarse, cuando ésta es mayor, durante la remoción, va ocupando más sitios de sorción de la roca. También, con los datos iniciales de bicarbonatos y sulfatos, se puede observar que el primer lavado, la capacidad de remoción de arsénico no se ve tan afectada, ya que, comparados con la cantidad de iones interferentes de la primera etapa, específicamente con los de Axocopan, estos iones no están en niveles tan altos, sin embargo, cada lavado, podría estar aportándolos, razón por la cual, también podría verse afectada la remoción de arsénico.

A partir del quinto lavado se observa que existe un aparente equilibrio para la remoción de arsénico, sin embargo, es necesario realizar más aplicaciones para poder verificarlo.

Fluoruro.

Nuevamente se corroboran los resultados de Manzo (2019), los cuales indican que, al contrario del arsénico, a mayor tamaño de grano, mayor remoción de fluoruro, pero con mayor evidencia, ya que, en todos los lavados, la roca "Kss F" fue más eficiente para Muhí para remover el contaminante que la roca "Kss As" y en Pb18 fue el que

menos aportó a la matriz acuosa cuando la concentración inicial se encuentra debajo de los 2 mg/L.

Para las muestras de Muhí, el comportamiento de la remoción es muy similar a los resultados de las muestras de Guanajuato (aunque gráficamente todas son parecidas), donde nuevamente el primer lavado es el más eficiente para la remoción de fluoruro, sin embargo, a partir de los siguientes termina aportando a la matriz acuosa. Para Pb18, al tener una concentración inicial debajo del equilibrio, la roca lixivió el contaminante, lo que termina por complicar la reducción de su concentración en el agua.

Discusión de la etapa tres.

Para arsénico, si bien, en ninguno de los lixiviados obtenidos para ambas rocas, las concentraciones de arsénico son menores al límite permisible de acuerdo con la NOM-127-SSA1-2021, en todos los casos donde la concentración inicial se encontraba arriba de 0.064 mg/L (Anexo III) se obtiene remoción del contaminante.

Para fluoruros, de manera general, únicamente el primer lavado resultó efectivo para remover el contaminante. Posteriormente la roca caliza empieza a lixiviarlo.

Analizando los diagramas de Pourbaix (Eh-pH) para las muestras de SJM, PV, Muhí y Pb18 (Anexo V), para arsénico se obtiene que la especie dominante, para todas las muestras, se encuentra en forma de hidrógeno-arseniato: HAsO_4^{2-} , el cual está en forma de As(V), mientras que, para el fluoruro, la especie dominante para todas las muestras se encuentra como F^- .

Los resultados de las modelaciones de los índices de saturación para las muestras de Guanajuato (SJM y PV), mediante el programa Visual MINTEQ (Anexo VI) muestran que no existe saturación de ningún mineral, lo que indica que el principal proceso de remoción es por adsorción. Para las muestras Hidalgo (Muhí y Pb18), mediante el programa Visual MINTEQ nos muestra que hay sobresaturación de aragonita, calcita y dolomita (ordenada), minerales que en su estructura molecular contienen carbonato de calcio para los primeros dos, y carbonato de calcio y magnesio para la dolomita, esto es debido, principalmente, al alto contenido de calcio,

lo que indica que, en el proceso de remoción, además de la adsorción, también se puede estar llevando a cabo coprecipitación.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Etapa uno

Los polígonos con información geológica no son exactamente iguales en ningún mapa, esto debido a que no existen límites exactos donde cambie de una Formación a otra y a que se realizan a partir de una interpretación de muestreos discretos por lo tanto no son concluyentes para determinar una formación geológica, sin embargo, nos da una idea general de la formación a la que pueda pertenecer una roca.

Para el caso de Guanajuato, donde las coordenadas de recolección coinciden con las formaciones geológicas reportadas en los mapas, la identificación no genera conflicto a nivel geográfico, sin embargo, para los mapas de Hidalgo presentados por Labastida (2014) y Sosa (2020), donde la recolección de la roca es cercana a los límites geográficos de otra formación, se complica la identificación geográfica, incluso al no coincidir con la formación reportada por ellos mismos, esto es debido a un posible error en cuanto a las coordenadas de sus figuras, dimensiones, escala o incluso la forma del polígono, por lo tanto es necesario, además de revisar bien los mapas, realizar la identificación litológica que permita conocer la formación de la roca.

Recomendación.

- Usar más de una fuente de información geológica, ya que el uso de una sola figura no es suficiente para poder determinar la geología de una zona.
- Determinar siempre las características litológicas de las muestras de roca y correlacionarlas con las esperadas para la formación que indiquen los mapas geológicos.
- Realizar recolección de la roca Kss en puntos geográficos diferentes que pertenezcan a la misma formación a nivel geográfico, analizar su litología y compararla con la ya trabajada para conocer su variabilidad.

Etapa dos

Al comparar las matrices acuosas y los resultados entre Axocopan y Atlimeyaya, se concluye que se obtienen porcentajes de remoción de arsénico menores cuando el

medio acuoso presenta una mayor cantidad de iones interferentes, a saber, bicarbonatos y sulfatos.

A pesar de haber obtenido una alta eficiencia en la remoción de arsénico, en ningún caso, el tratamiento usado con la roca caliza permitió cumplir con la concentración límite inicial de la NOM-127-SSA1-2021.

A diferencia del arsénico, para los fluoruros no se demostró la existencia de interferencia por parte de bicarbonatos y sulfatos.

Se corrobora que existe un equilibrio en la remoción de fluoruros alrededor de los 2 mg/L, lo que complica la reducción para este contaminante mediante el uso de roca caliza.

En fluoruros, existe una aparente tendencia a tener una remoción máxima del 50% cuando la concentración inicial es aproximadamente igual o mayor de los 8 mg/L.

Recomendaciones.

- Realizar aplicaciones subsecuentes con matrices acuosas con contenido alto y bajo en iones interferentes para comparar resultados.
- Medir los parámetros fisicoquímicos del agua después de las pruebas en lote a nivel laboratorio.
- Realizar sus respectivos diagramas de Pourbaix para que nos permita conocer si hay cambios en la especie de arsénico o fluoruro presentes en la matriz acuosa.
- Repetir los experimentos usando roca caliza de la Formación Cretácico Inferior Tamaulipas.

Etapa tres

Para las muestras de arsénico de Guanajuato, las aplicaciones subsecuentes mostraron capacidad de retención hasta el sexto lavado, sin mostrar aparente disminución en su capacidad de remoción.

La concentración inicial afecta completamente la capacidad de remoción, tanto de fluoruros como de arsénico, de la roca caliza.

Existe una aparente tendencia al equilibrio en bajas concentraciones (cercanas a la NOM-127-SSA1-2021) en la remoción de arsénico por roca caliza.

Para las muestras de arsénico de Hidalgo, se observa que la roca va presentando una menor capacidad de remoción conforme se hacen más lavados.

Las rocas calizas usadas en el presente trabajo son efectivas para remover fluoruros sólo para el primer lavado y cuando las concentraciones iniciales se encuentran arriba de los 2 mg/L.

Recomendaciones.

- Realizar isotermas de adsorción para arsénico para concentraciones con gradientes de 0.01 mg/L a 1 mg/L.
- Realizar isotermas de adsorción para la roca caliza de Guanajuato.
- Efectuar un prelavado de la roca con agua desionizada para que lixivie los iones que puedan interferir en la remoción de arsénico.
- Realizar aplicaciones subsecuentes con agua desionizada y determinar tanto parámetros fisicoquímicos como la composición química del agua para ver si existe una tendencia a limpiar la roca.
- Hacer más aplicaciones subsecuentes, de ser posible, hasta la saturación de la roca.
- Determinar los parámetros fisicoquímicos y composición química del agua después de cada aplicación.
- Hacer lavados subsecuentes usando roca caliza de la Formación Cretácico Inferior Tamaulipas

BIBLIOGRAFÍA

Alexandratos, V., Elzinga, E., Reeder, R. (2007). *Arsenate uptake by calcite: Macroscopic and spectroscopic characterization of adsorption and incorporation mechanisms*. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. Vol 71. 4172-4187.

Armienta, M. A., Rodríguez, R., Villaseñor, G., Ceniceros, N., Cruz, O., Aguayo, A. (2011). *Contaminación del agua subterránea por arsénico en Zimapán, Hidalgo. Necesidad de una solución integral*. *Retos de la investigación del agua en México*. Vol. 28. 329-334.

Armienta, M. A., Segovia, N. (2008). *Arsenic and fluoride in the groundwater of Mexico*. *Environ Geochem Health*. Vol 30. pp 345-3531

Armienta, M. A., Zamora, V., Juárez, F. (1987). *Manual para el análisis químico de aguas naturales, en el campo y en el laboratorio*. Comunicaciones Técnicas. Instituto de Geofísica, Serie docencia y divulgación no. 4.

Comisión Nacional de los Derechos Humanos. (2014). *El derecho humano al agua potable y saneamiento*. México: CNDH. ISBN: 978-607-729-084-1

CONAGUA. (2018). *Usos del agua*. Recuperado de: <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/usos-del-agua> (consultado el 3 de septiembre de 2022).

Fan, X., Parker, D.J., Smith, M.D. (2003). *Adsorption Kinetics of fluoride on low cost materials*. *Water Research*. 37, 4929–4937.

Hernández, Z.Y., (2022). *Isotermas de adsorción de arsénico y fluoruro sobre rocas calizas*. Reporte de investigación de licenciatura en Ciencias de la Tierra, Ciencias Acuáticas. Universidad Nacional Autónoma de México. [En revisión]

Juárez, F. (2020). *Evaluación de rocas calizas del bajío guanajuatense en la remoción de arsénico y fluoruro en el agua subterránea*. Tesis de maestría en Ciencias de la Tierra. Universidad Nacional Autónoma de México.

Labastida, I. (2014). *Evaluación de un sistema basado en rocas calizas, para tratar el drenaje ácido de mina en el distrito minero de Zimapán, Hidalgo*. Tesis de doctorado en Ciencias de la Tierra. Universidad Nacional Autónoma de México.

Manzo, M. (2019). *Remoción de arsénico y fluoruro de aguas subterráneas naturalmente contaminadas en Zimapán, Hidalgo mediante rocas calizas*. Tesis de licenciatura en ingeniería geológica. Universidad Nacional Autónoma de México.

Micete, F. S. (2005). *Diseño de una planta piloto basada en la adsorción en rocas calizas para el tratamiento del agua contaminada con arsénico del pozo Zimapán, en el municipio de Zimapán, Hidalgo*. Tesis de Maestría en Ciencias e Ingeniería Ambientales. Universidad Autónoma Metropolitana.

NOM-127-SSA1-2021 (2022). *Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua*. Recuperado de: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5650705&fecha=02/05/2022#gsc.tab=0 (consultado el 21 de agosto de 2022)

Ortiz P.M. (2021) Introducción. En Del Razo, L. M., Ledón, J. M., Velasco, M. N. (2021). *Arsénico y fluoruro en agua: riesgos y perspectivas desde la sociedad civil y la academia en México. Hacia el cumplimiento del Derecho Humano al Agua*. México. (pp. 19:22) UNAM-Instituto de Geofísica. ISBN: 978-607-30-4773-9

Rodríguez, R., Ramos, J.A., Armienta, A. (2004). *Groundwater arsenic variations: the role of local geology and rainfall*. Applied Geochemistry. Vol 19. 245-250

Servicio Geológico Mexicano. (2008). *Carta geológico-minera estados de Guanajuato y Querétaro*. Recuperado de https://mapserver.sgm.gob.mx/Cartas_Online/geologia/qto_queretaro.pdf (Consultado el 13 de agosto de 2022)

Servicio Geológico Mexicano. (2008). *Carta geológico-minera estado de Hidalgo*. Recuperado de https://mapserver.sgm.gob.mx/Cartas_Online/geologia/hidalgo.pdf (Consultado el 13 de agosto de 2022)

Servicio Geológico Mexicano. (2017). *Continúo Nacional de Geología de la República Mexicana escala 1:250,000*. Recuperado de: <https://datos.gob.mx/busca/dataset/cartografia-geologica-de-la-republica-mexicana-escala-1-250000/resource/081b571e-0edf-4560-b9af-80fe27065ea2> (consultado el 15 de agosto de 2022)

Sosa, A. (2020). *Aplicación de rocas calizas para la remediación de acuíferos contaminados*. Tesis de maestría en Ciencias de la Tierra. Universidad Nacional Autónoma de México.

Sosa, A., Armienta, M. A., Aguayo, A., Cruz, O. (2020). *Evaluation of the influence of main groundwater ions on arsenic removal by limestones through column experiments*. Science of the Total Environment. Vol 727. 138459. pp 1-11

United Nations Children's Fund (UNICEF) and the World Health Organization. (2020). *State of the World's Sanitation: An urgent call to transform sanitation for better health, environments, economies and societies*. New York. ISBN: 978-92-4-001447-3

World Health Organization. (2022). *10 chemicals of public health concern*. Recuperado de: <https://www.who.int/news-room/photo-story/photo-story-detail/10-chemicals-of-public-health-concern> (Consultado el 3 de septiembre de 2022)

Yang, M., Hashimoto, T., Hoshi, N., Myoga, H. (1999). *Fluoride removal in a fixed bed packed with granular calcite*. Water Research. 33, 3395–3402.

ANEXOS

Anexo I. Cálculos para contaminar las muestras de Axocopan y Atlimeyaya.

Arsénico

Arseniato de sodio ($\text{Na}_2\text{HAsO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$)

Pureza: 98%

Peso molecular: 312.012

Peso molecular del Arsénico: 74.92

Condición inicial: 0 mg/L Axocopan

0 mg/L Atlimeyaya

Tabla 18. Análisis dimensional de los cálculos para agregar As a las muestras de agua.

Valor	Peso
Mínimo	$0.5\text{mg/L}(0.1\text{L}) \frac{312\text{mg}}{75\text{mg}} = 0.208\text{mg}$ $=0.0002\text{g}$
Máximo	$3.12\text{mg/L}(0.1\text{L}) \frac{312\text{mg}}{75\text{mg}} = 1.297\text{mg}$ 0.0013g

A pesar de haber tenido un resultado de 0.0013g para el valor máximo, se decidió pasarlo a 0.0014 mg/L para tener un gradiente de 7 valores con diferencia de 0.0002 mg/L.

Tabla 19 Análisis de la adición de arsénico en mg/L, a partir de lo agregado de arseniato de sodio en gramos.

Valor (g)	Concentración final
0.0002	$\frac{0.2\text{mg} * 75\text{mg}}{312\text{mg} * 0.1\text{L}} = 0.48\text{mg/L}$
0.0004	$\frac{0.4\text{mg} * 75\text{mg}}{312\text{mg} * 0.1\text{L}} = 0.96\text{mg/L}$
0.0006	$\frac{0.6\text{mg} * 75\text{mg}}{312\text{mg} * 0.1\text{L}} = 1.44\text{mg/L}$
0.0008	$\frac{0.8\text{mg} * 75\text{mg}}{312\text{mg} * 0.1\text{L}} = 1.92\text{mg/L}$
0.0010	$\frac{1\text{mg} * 75\text{mg}}{312\text{mg} * 0.1\text{L}} = 2.34\text{mg/L}$
0.0012	$\frac{1.2\text{mg} * 75\text{mg}}{312\text{mg} * 0.1\text{L}} = 2.88\text{mg/L}$
0.0014	$\frac{1.4\text{mg} * 75\text{mg}}{312\text{mg} * 0.1\text{L}} = 3.36\text{mg/L}$

Fluoruro.

Para este cálculo fue necesario restar el contenido de fluoruros del pozo que se busca simular, menos el contenido inicial de fluoruros del pozo que se trabajó para conocer la cantidad de fluoruros a adicionar.

Fluoruro de sodio (NaF)

Pureza: 99.2%

Peso molecular: 41.991

Peso molecular del Flúor: 18.99

Condición inicial: 0.5 mg/L Axocopan

0.55 mg/L Atlimeyaya

Cálculos de adición de fluoruro en mg/L.

Tabla 20. Análisis dimensional de los cálculos para agregar F⁻ a las muestras de agua. La concentración inicial de F⁻ se muestra arriba entre paréntesis.

	Axocopan (0.50mg/L F ⁻)	Atlimeyaya (0.55mg/L F ⁻)
SJM (2.84mg F ⁻)	$2.34mg/L(0.1L) \frac{42mg}{19mg} = 0.51mg$ 0.00051g	$2.29mg/L(0.1L) \frac{42mg}{19mg} = 0.506mg$ 0.000506g
PV (7.29mg F ⁻)	$6.79mg/L(0.1L) \frac{42mg}{19mg} = 1.5mg$ 0.0015g	$6.74mg/L(0.1L) \frac{42mg}{19mg} = 1.48mg$ 0.00148g
Muhí (2.40mg F ⁻)	$1.9mg/L(0.1L) \frac{42mg}{19mg} = 0.42mg$ 0.00042g	$1.85mg/L(0.1L) \frac{42mg}{19mg} = 0.408mg$ 0.000408g
Pb18 (0.68mg F ⁻)	$0.18mg/L(0.1L) \frac{42mg}{19mg} = 0.039mg$ 0.000039g	$0.13mg/L(0.1L) \frac{42mg}{19mg} = 0.028mg$ 0.000028g

Tabla 21. Análisis dimensional de la adición de fluoruro en mg/L, a partir de lo agregado de fluoruro de sodio en gramos.

Origen	Axocopan	Atlimeyaya
SJM	$\frac{0.5mg * 19mg}{42mg * 0.1L} = 2.26mg/L$	$\frac{0.5mg * 19mg}{42mg * 0.1L} = 2.26mg/L$
PV	$\frac{1.5mg * 19mg}{42mg * 0.1L} = 6.78mg/L$	$\frac{1.5mg * 19mg}{42mg * 0.1L} = 6.78mg/L$
Muhí	$\frac{0.4mg * 19mg}{42mg * 0.1L} = 1.8mg/L$	$\frac{0.4mg * 19mg}{42mg * 0.1L} = 1.8mg/L$
Pb18	$\frac{0.1mg * 19mg}{42mg * 0.1L} = 0.45mg/L$	$\frac{0.1mg * 19mg}{42mg * 0.1L} = 0.45mg/L$

Sodio

Tabla 22. Sodio agregado a partir de las sales de arseniato de sodio y fluoruro de sodio adicionadas para las simulaciones con el programa Visual MINTEQ (En rojo se muestran las concentraciones que superan los límites permisibles y en naranja la concentración que se encuentra en los límites de transición de acuerdo a la NOM-127-SSA1-2021 [véase Tabla 1]).

Muestra	As medido (mg/L)	F- medido (mg/L)	Arseniato de sodio agregado (mg)	Fluoruro de sodio agregado (mg)	Concentración de sodio por arseniato de sodio (mg/L)	Concentración de sodio por fluoruro de sodio (mg/L)	Sodio inicial (mg/L)	Sodio total (mg/L)
Axocopan								
axpv-o	1.788	6.03	0.74	1.33	0.55	7.3	52.55	60.4
axpv-d	2.317	6.87	0.96	1.52	0.71	8.32	52.55	61.58
axsj-o	1.558	2.21	0.65	0.49	0.48	2.68	52.55	55.7
axsj-d	1.509	1.80	0.63	0.4	0.46	2.18	52.55	55.19
axmu-o	2.59	1.40	1.08	0.31	0.79	1.69	52.55	55.04
axmu-d	3.41	1.37	1.42	0.3	1.05	1.66	52.55	55.25
axpb	1.43	0.74	0.59	0.16	0.44	0.9	52.55	53.88
Atlimeyaya								
atpv-o	2.771	8.31	1.15	1.84	0.85	10.06	15.29	26.2
atpv-d	2.545	8.50	1.06	1.88	0.78	10.29	15.29	26.36
atsj-o	0.582	3.21	0.24	0.71	0.18	3.89	15.29	19.35
atsj-d	0.520	2.64	0.22	0.58	0.16	3.2	15.29	18.65
atmu-o	1.399	2.46	0.58	0.54	0.43	2.98	15.29	18.7
atmu-d	0.966	2.71	0.4	0.6	0.3	3.28	15.29	18.87
atpb	1.165	1.45	0.48	0.32	0.36	1.76	15.29	17.4
Norma	0.025	1.5						

Anexo II. Reactivos para la medición de cloruros y fluoruros.

Para la preparación de los ajustadores de fuerza iónica y los estándares, se siguieron las instrucciones de Armienta *et al.*, (1987).

Preparación del ajustador de fuerza iónica para determinar cloruro. Se pesaron 42.5 g de NaNO_3 , los cuales se disolvieron en 100 mL de agua desionizada.

Preparación del TISAB. A 500mL de agua desionizada se le deben agregar 57 mL de ácido acético glacial, 58g. de NaCl y 0.3 g de citrato de sodio, posteriormente se debe ajustar el pH de 5 a 5.5 agregando NaOH 5M. Al finalizar se debe dejar enfriar y llevar la solución a 1 litro.

Preparación para los estándares para fluoruros. Se disolvieron 221g de NaF , previamente secado en estufa, en agua desionizada, la cual se aforó a un litro, teniendo como resultado una concentración de 100mg/L de F^- . Posteriormente se tomaron 100 mL de este preparado para ser diluidos con agua desionizada al llevarlos a 1 litro, dándonos una concentración de 10mg/L de F^- ; por último, se tomaron 10mL de esta última solución para ser aforada a 100mL con agua desionizada, teniendo como resultado una concentración de 1mg/L de F^- .

Anexo III. Tablas de los resultados de la segunda etapa.

Guanajuato

Tabla 23. Resultados para arsénico y fluoruros de las pruebas en lote a nivel laboratorio para el pozo SJM. (En rojo se muestran las concentraciones que superan los límites permisibles y en naranja las concentraciones que se encuentran en los límites de transición de acuerdo a la NOM-127-SSA1-2021[véase Tabla 1]).

SJM										
Numero de aplicación	Arsénico					Fluoruros				
	As inicial (mg/L)	As final con la roca "Ki" (mg/L)	% de remoción	As final con la roca "Kss F" (mg/L)	% de remoción	F- inicial (mg/L)	F- final con la roca "Ki" (mg/L)	% de remoción	F- final con la roca "Kss F" (mg/L)	% de remoción
1	0.028	0.025	11.56	0.040	-44.45	2.79	2.58	7.53	2.06	26.16
2	0.028	0.017	38.68	0.028	-1.00	2.79	2.75	1.43	3.18	-13.98
3	0.028	0.018	35.07	0.030	-8.21	2.79	3.00	-7.53	3.66	-31.18
4	0.028	0.019	31.47	0.034	-22.64	2.79	2.86	-2.51	3.82	-36.92
5	0.028	0.019	31.47	0.027	2.61	2.79	2.81	-0.72	3.47	-24.37
6	0.028	0.018	35.07	0.023	17.04	2.79	2.84	-1.79	3.67	-31.54
Norma	0.025	0.025		0.025		1.5	1.5		1.5	

Tabla 24. Resultados para arsénico y fluoruros de las pruebas en lote a nivel laboratorio para el pozo PV. (En rojo se muestran las concentraciones que superan los límites permisibles de acuerdo a la NOM-127-SSA1-2021 [véase Tabla 1]).

PV										
Numero de aplicación	Arsénico					Fluoruros				
	As inicial (mg/L)	As final con la roca "Ki" (mg/L)	% de remoción	As final con la roca "Kss F" (mg/L)	% de remoción	F- inicial (mg/L)	F- final con la roca "Ki" (mg/L)	% de remoción	F- final con la roca "Kss F" (mg/L)	% de remoción
1	0.064	0.050	22.41	0.062	3.06	5.16	5.18	-0.39	3.35	35.08
2	0.064	0.041	35.85	0.050	21.77	5.16	5.68	-10.08	5.38	-4.26
3	0.064	0.041	35.85	0.052	18.64	5.16	5.73	-11.05	5.96	-15.50
4	0.064	0.040	37.41	0.053	17.07	5.16	5.41	-4.84	5.96	-15.50
5	0.064	0.040	37.41	0.049	23.33	5.16	5.41	-4.84	5.89	-14.15
6	0.064	0.042	34.28	0.047	26.46	5.16	5.47	-6.01	6.03	-16.86
Norma	0.025	0.025		0.025		1.5	1.5		1.5	

Hidalgo

Tabla 25. Resultados para arsénico y fluoruros de las pruebas en lote a nivel laboratorio para el pozo Muhí. (En rojo se muestran las concentraciones que superan los límites permisibles de acuerdo a la NOM-127-SSA1-2021 [véase Tabla 1]).

Muhí										
Numero de aplicación	Arsénico					Fluoruros				
	As inicial (mg/L)	As final con la roca "Kss As" (mg/L)	% de remoción	As final con la roca "Kss F" (mg/L)	% de remoción	F inicial (mg/L)	F- final con la roca "Kss As" (mg/L)	% de remoción	F final con la roca "Kss F" (mg/L)	% de remoción
1	1.267	0.261	79.43	0.200	84.21	2.29	1.96	14.41	1.65	27.95
2	1.267	0.307	75.77	0.346	72.69	2.29	2.45	-6.99	2.19	4.37
3	1.267	0.461	63.61	0.441	65.19	2.29	2.58	-12.66	2.50	-9.17
4	1.267	0.619	51.14	0.632	50.12	2.29	2.59	-13.10	2.34	-2.18
5	1.267	0.672	46.96	0.676	46.65	2.29	2.39	-4.37	2.32	-1.31
6	1.267	0.685	45.94	0.596	52.96	2.29	2.49	-8.73	2.38	-3.93
Norma	0.025	0.025		0.025		1.5	1.5		1.5	

Tabla 26. Resultados para arsénico y fluoruros de las pruebas en lote a nivel laboratorio para el pozo Muhí. (En rojo se muestran las concentraciones que superan los límites permisibles y en naranja las concentraciones que se encuentran en los límites de transición de acuerdo a la NOM-127-SSA1-2021 [véase Tabla 1]).

Pb18										
Numero de aplicación	Arsénico					Fluoruros				
	As inicial (mg/L)	As final con la roca "Kss As" (mg/L)	% de remoción	As final con la roca "Kss F" (mg/L)	% de remoción	F inicial (mg/L)	F- final con la roca "Kss As" (mg/L)	% de remoción	F final con la roca "Kss F" (mg/L)	% de remoción
1	0.611	0.078	87.21	0.114	81.39	0.68	1.37	-100.59	1.02	-49.34
2	0.611	0.096	84.28	0.110	81.99	0.68	1.50	-119.62	1.26	-84.48
3	0.611	0.114	81.34	0.126	79.37	0.68	1.67	-144.51	1.53	-124.01
4	0.611	0.138	77.41	0.150	75.44	0.68	1.51	-121.08	1.32	-93.27
5	0.611	0.175	71.35	0.185	69.71	0.68	1.49	-118.16	1.31	-91.80
6	0.611	0.182	70.20	0.169	72.33	0.68	1.63	-138.65	1.56	-128.40
Norma	0.025	0.025		0.025		1.5	1.5		1.5	

Anexo IV. Georreferenciación

Guanajuato

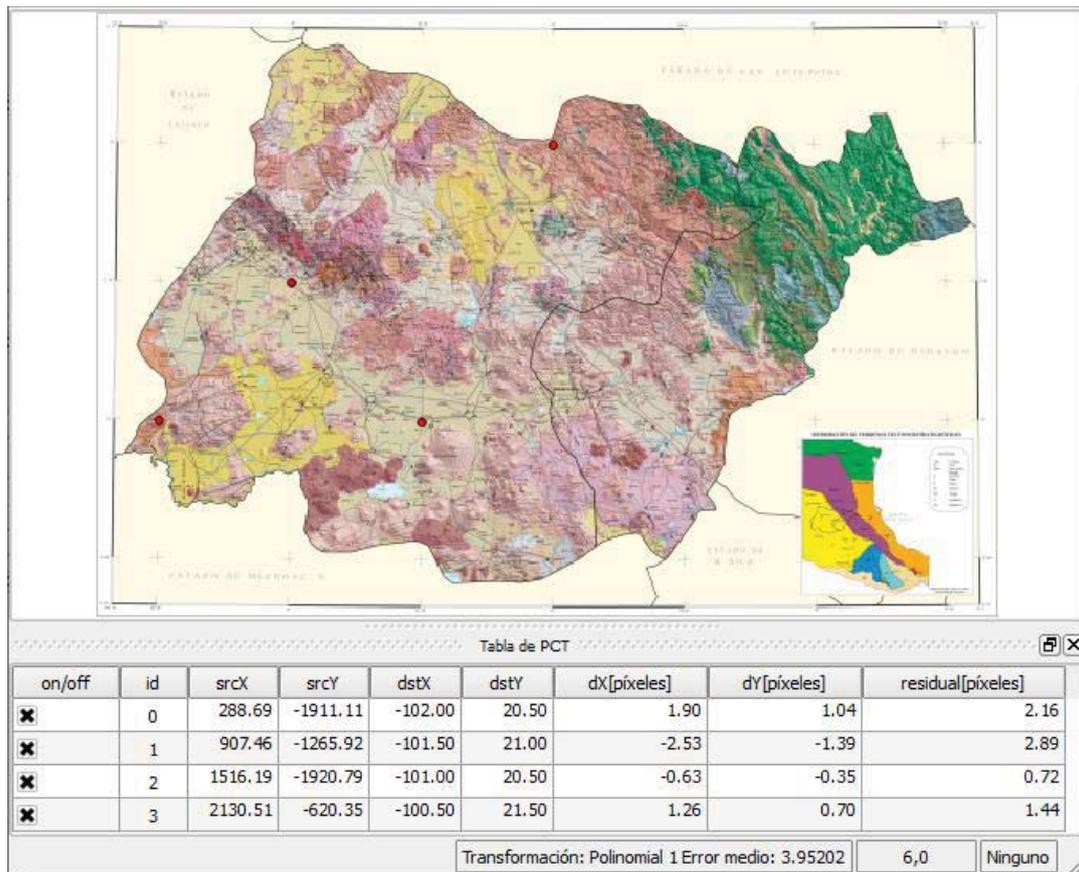


Figura 11. Puntos para georreferenciación con el error medio mediante el programa Qgis 2.8.8 para el estado de Guanajuato.

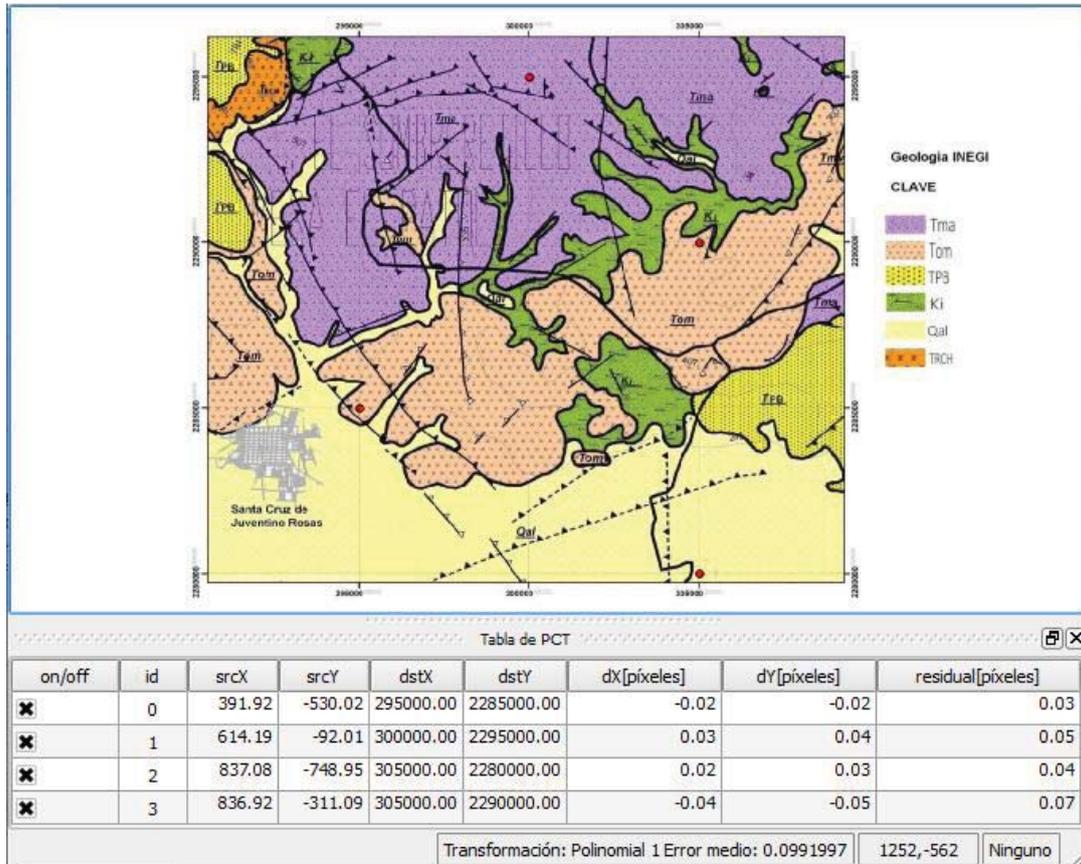


Figura 12. Puntos para georreferenciación con el error medio mediante el programa Qgis 2.8.8 para la figura de la geología de Santa Cruz de Juventino Rosas (Juárez, 2020).

Hidalgo

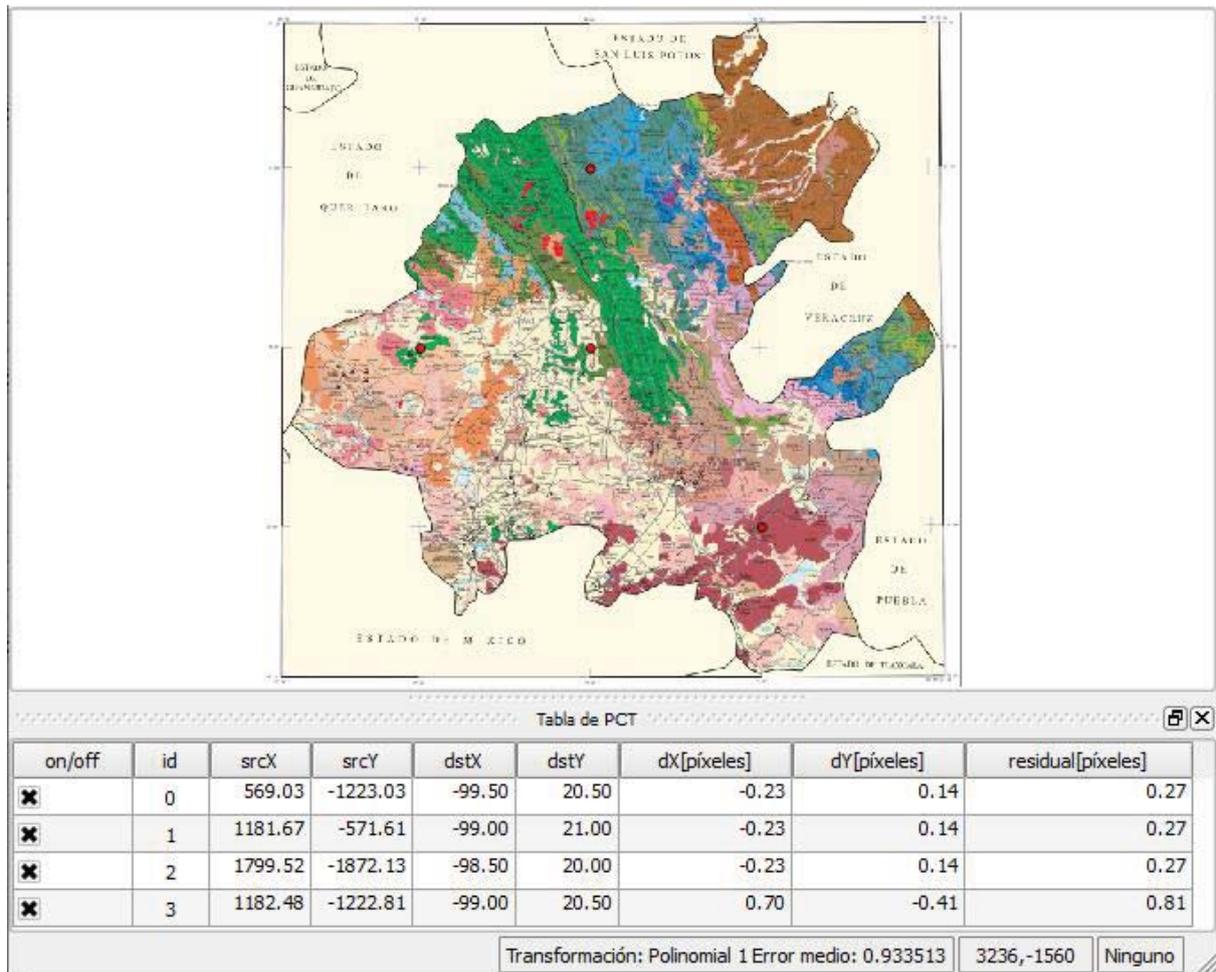


Figura 13. Puntos para georreferenciación con el error medio mediante el programa Qgis 2.8.8 para el estado de Hidalgo.

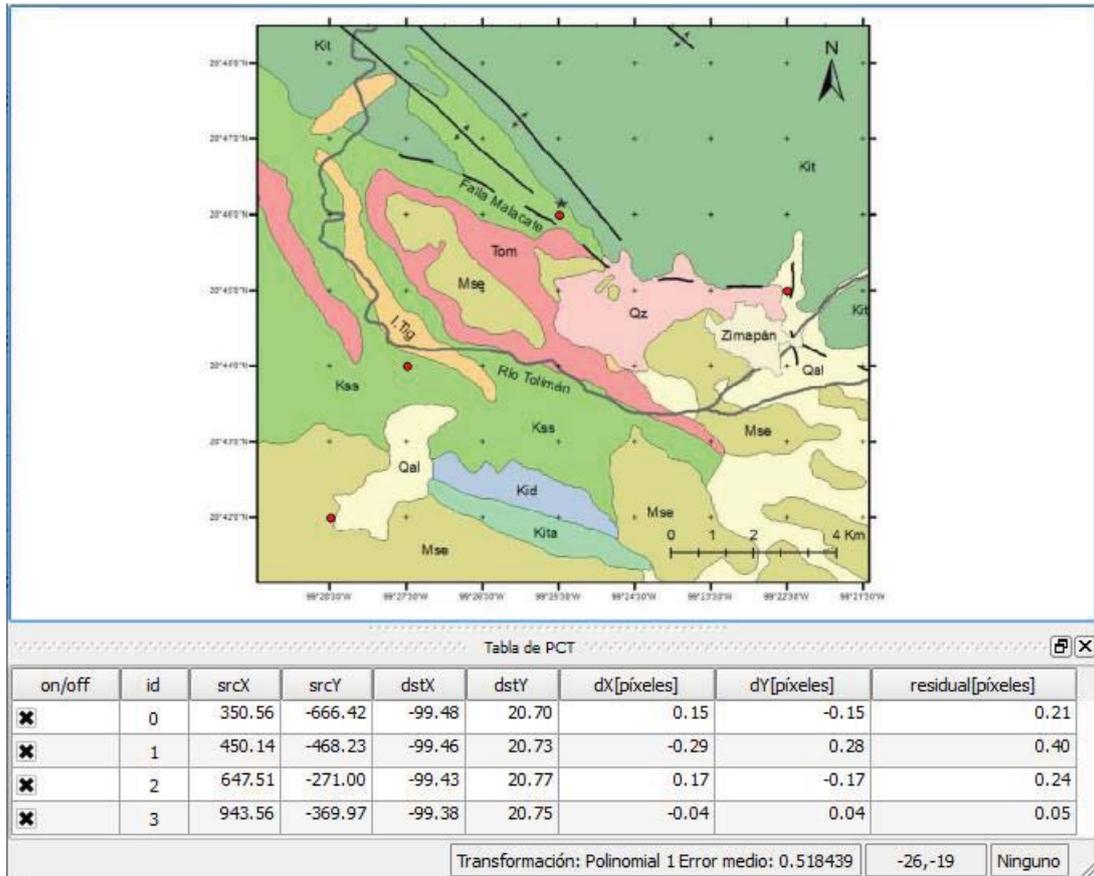


Figura 14. Puntos para georreferenciación con el error medio mediante el programa Qgis 2.8.8 para la figura de la geología de Zimapán (Sosa, 2020).

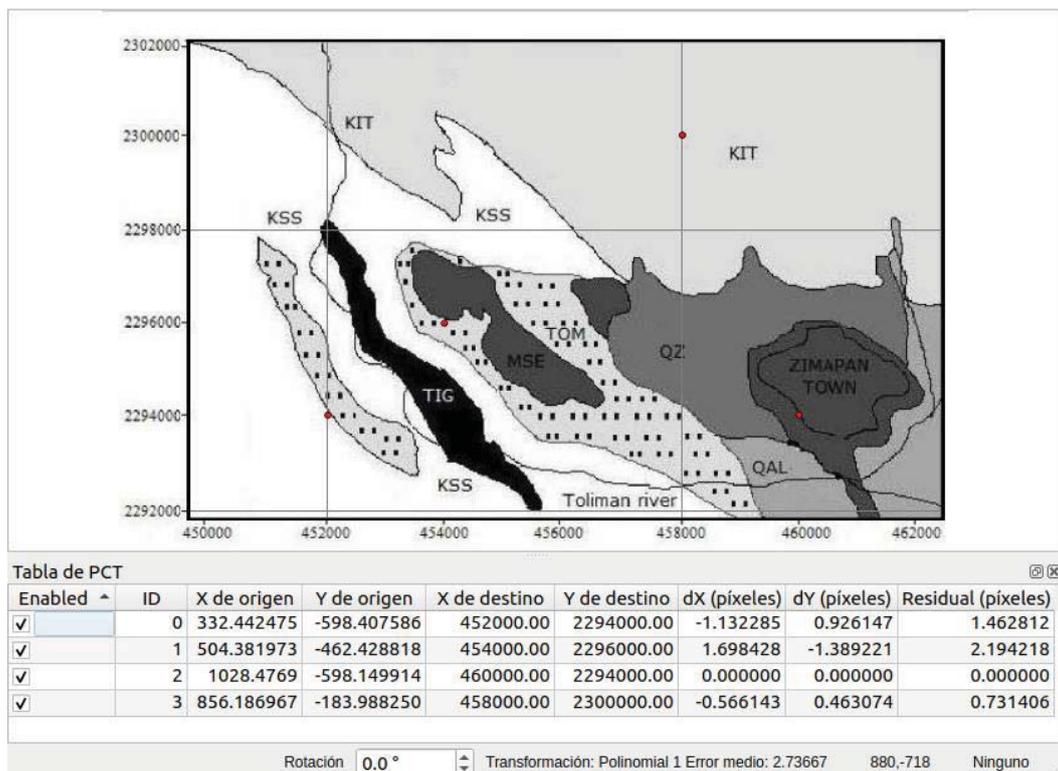


Figura 15. Puntos para georreferenciación con el error medio mediante el programa Qgis 3.22.4 para la figura de la geología de Zimapán (Labastida, 2014).

Anexo V. Diagramas de Pourbaix

SJM

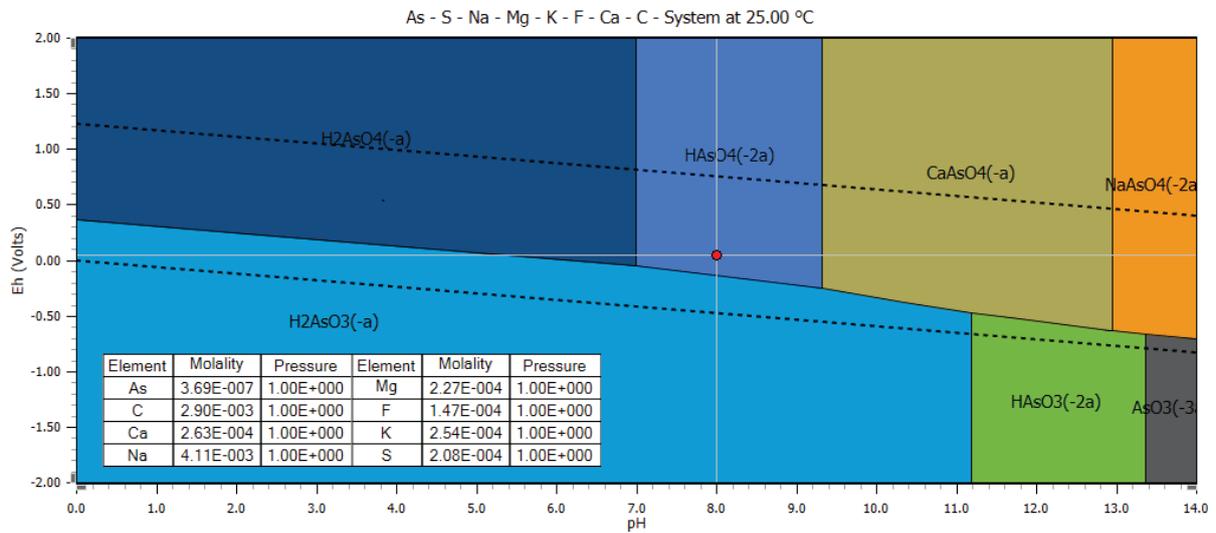


Figura 16. Diagrama de Pourbaix para arsénico del pozo SJM. (Realizado con el programa HSC chemistry 9.0).

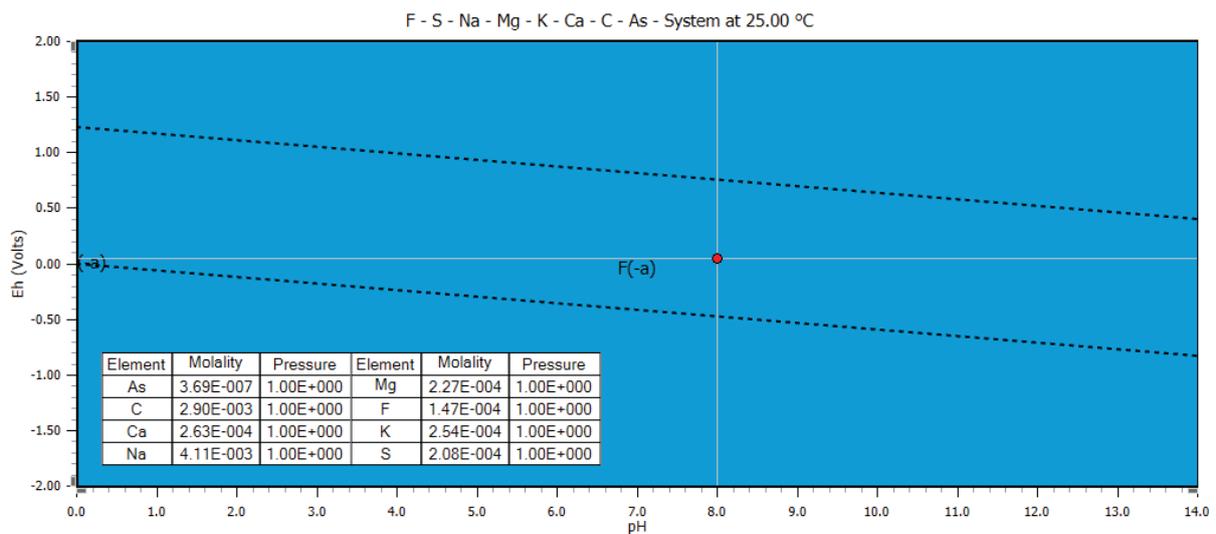


Figura 17. Diagrama de Pourbaix para fluoruro del pozo SJM. (Realizado con el programa HSC chemistry 9.0).

PV

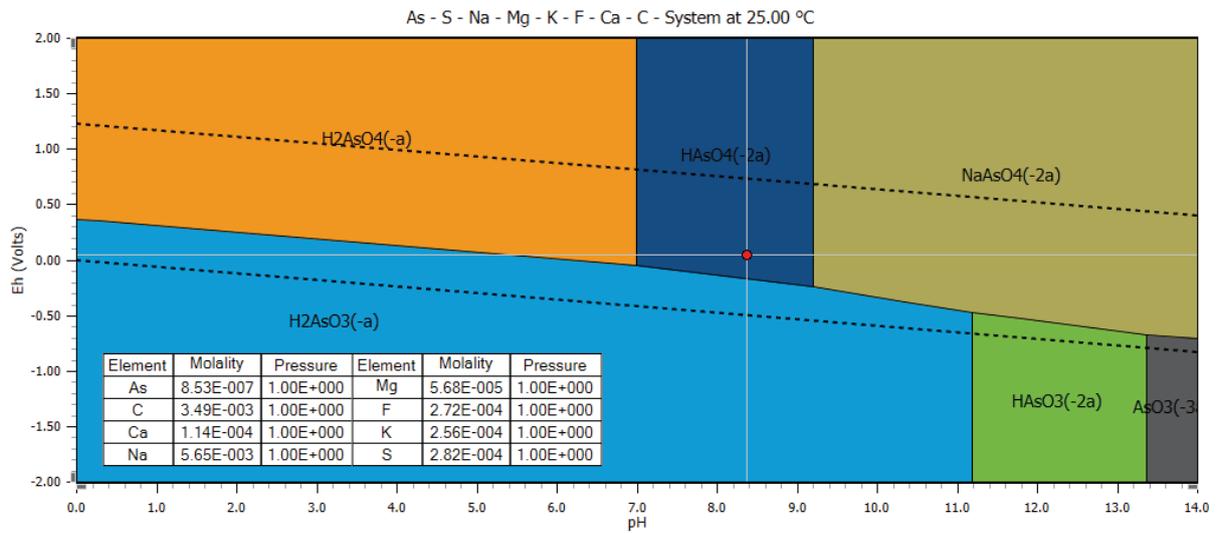


Figura 18. Diagrama de Pourbaix para arsénico del pozo PV. (Realizado con el programa HSC chemistry 9.0).

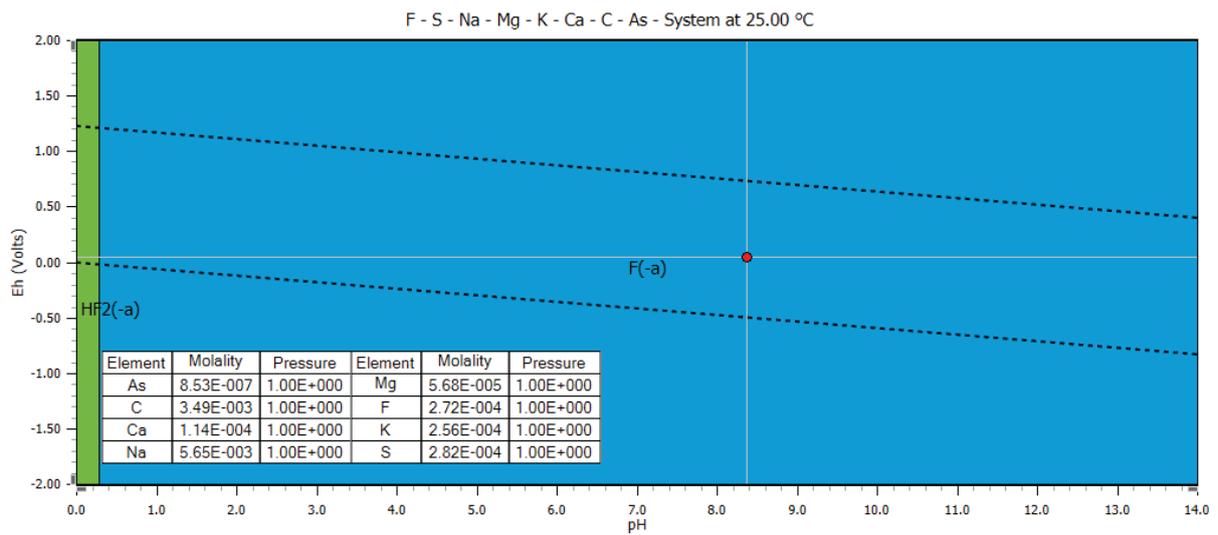


Figura 19. Diagrama de Pourbaix para fluoruro del pozo PV. (Realizado con el programa HSC chemistry 9.0).

Muhí

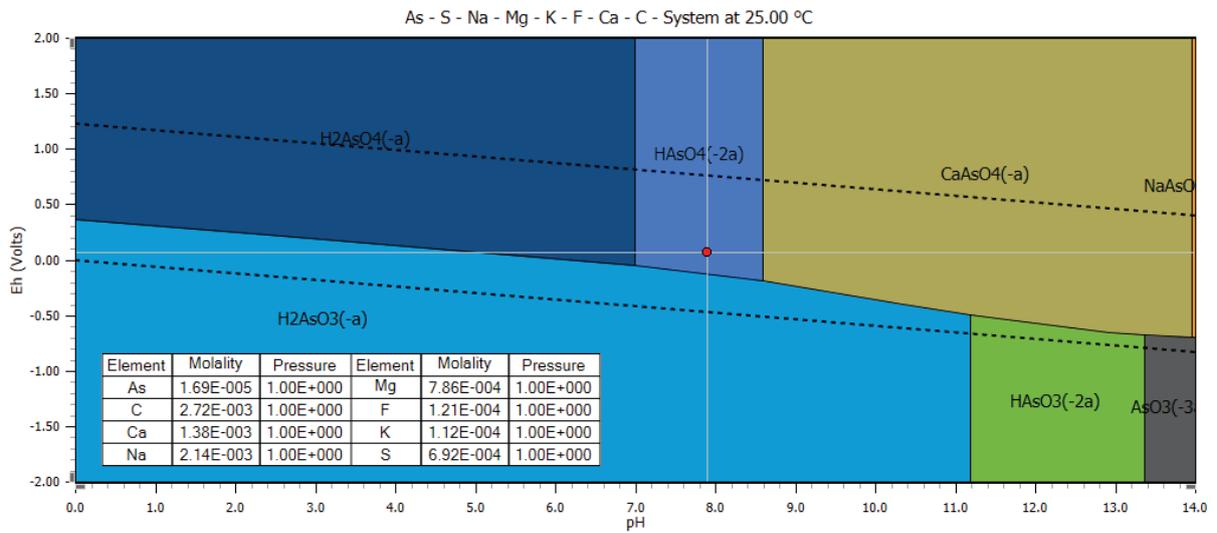


Figura 20. Diagrama de Pourbaix para arsénico del pozo Muhí. (Realizado con el programa HSC chemistry 9.0).

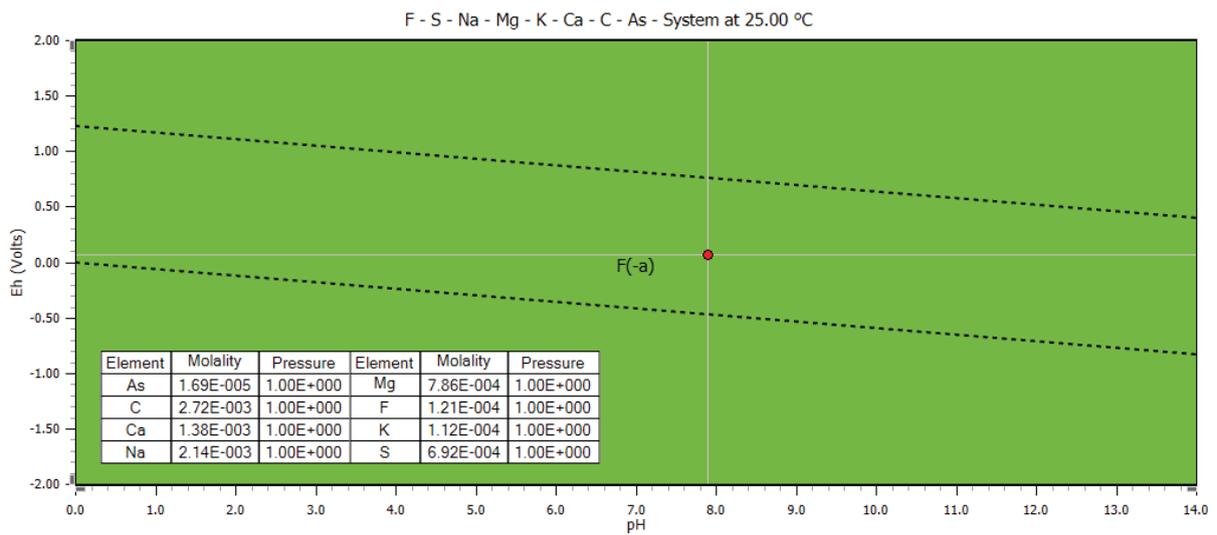


Figura 21. Diagrama de Pourbaix para fluoruro del pozo Muhí. (Realizado con el programa HSC chemistry 9.0).

Pb18

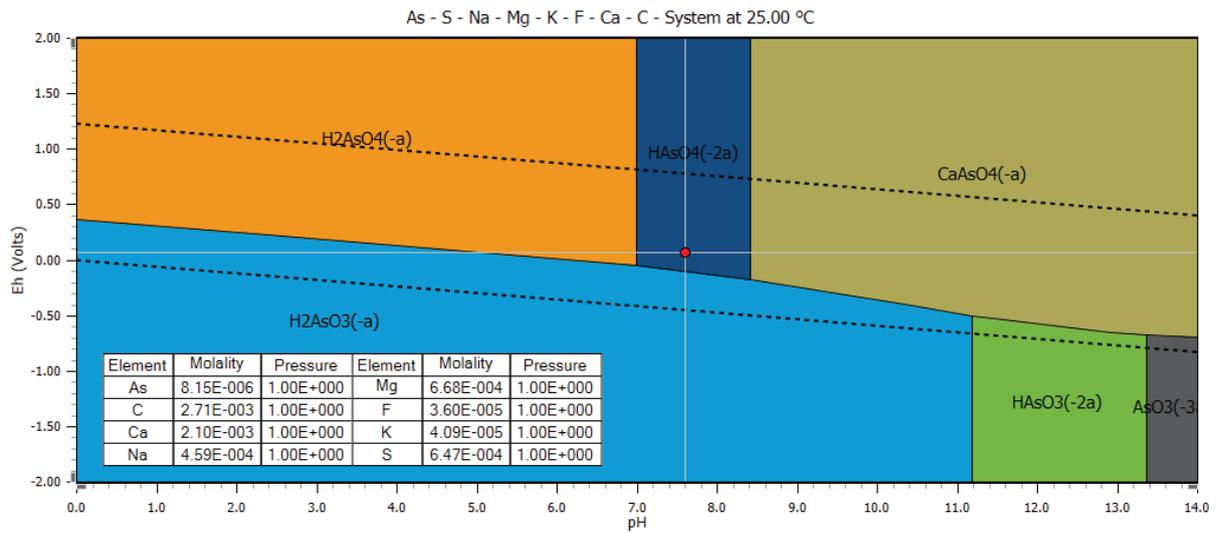


Figura 22. Diagrama de Pourbaix para arsénico del pozo Pb18. (Realizado con el programa HSC chemistry 9.0).

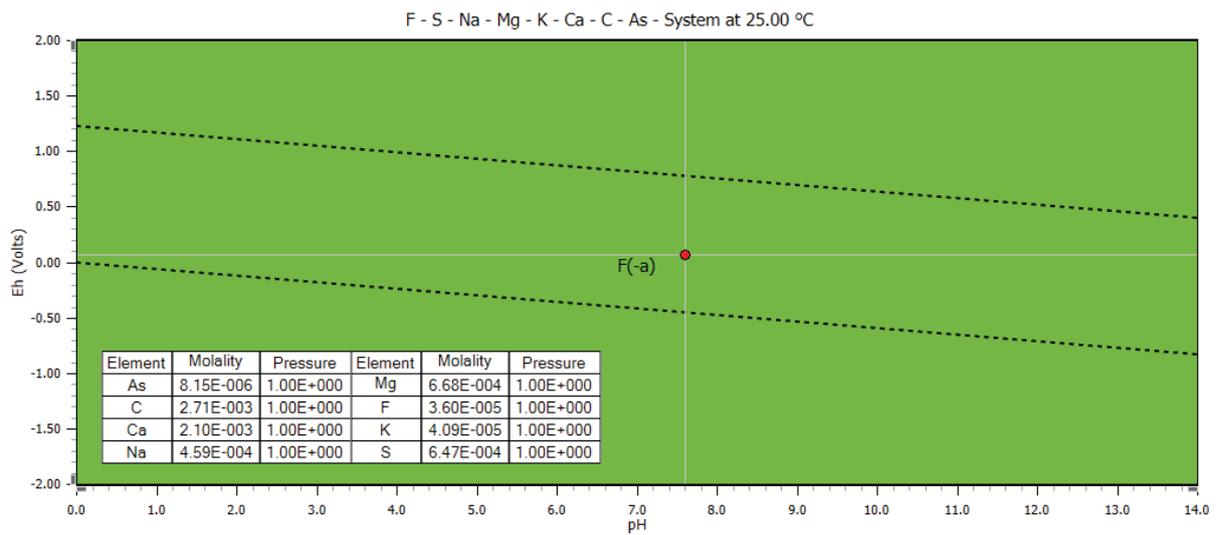


Figura 23. Diagrama de Pourbaix para fluoruro del pozo Pb18. (Realizado con el programa HSC chemistry 9.0)

Anexo VI. Índices de saturación.

Tabla 27. Valores de entrada para la modelación química de los índices de saturación para las muestras de Axocopan (Se encuentran remarcados los valores que fueron modificados).

Axocopan								
	Inicial	axpv-o	axpv-d	axsj-o	axsj-d	axmu-o	axmu-d	axpb
pH	5.57	5.57	5.57	5.57	5.57	5.57	5.57	5.57
HCO ₃ ⁻ (mg/L)	409	409	409	409	409	409	409	409
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	39	39	39	39	39	39	39	39
Cl ⁻ (mg/L)	18.35	18.35	18.35	18.35	18.35	18.35	18.35	18.35
Na ⁺ (mg/L)	52.55	60.40	61.58	55.70	55.19	55.04	55.25	53.88
K ⁺ (mg/L)	5.33	5.33	5.33	5.33	5.33	5.33	5.33	5.33
Ca ²⁺ (mg/L)	33	33	33	33	33	33	33	33
Mg ²⁺ (mg/L)	44	44	44	44	44	44	44	44
As (mg/L)	<0.002	1.788	2.317	1.558	1.509	2.590	3.410	1.430
F ⁻ (mg/L)	0.50	6.03	6.87	2.21	1.80	1.40	1.37	0.74

Tabla 28. Valores de entrada para la modelación química de los índices de saturación para las muestras de Atlimeyaya (Se encuentran remarcados los valores que fueron modificados).

Atlimeyaya								
	Inicial	atpv-o	atpv-d	atsj-o	atsj-d	atmu-o	atmu-d	atpb
pH	6.09	6.09	6.09	6.09	6.09	6.09	6.09	6.09
HCO ₃ ⁻ (mg/L)	98	98	98	98	98	98	98	98
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	7	7	7	7	7	7	7	7
Cl ⁻ (mg/L)	64.23	64.23	64.23	64.23	64.23	64.23	64.23	64.23
Na ⁺ (mg/L)	15.29	26.20	26.36	19.35	18.65	18.70	18.87	17.40
K ⁺ (mg/L)	2.23	2.23	2.23	2.23	2.23	2.23	2.23	2.23
Ca ²⁺ (mg/L)	10	10	10	10	10	10	10	10
Mg ²⁺ (mg/L)	10	10	10	10	10	10	10	10
As (mg/L)	<0.002	2.771	2.545	0.582	0.520	1.399	0.966	1.165
F ⁻ (mg/L)	0.55	8.31	8.50	3.21	2.64	2.46	2.71	1.45

Axocopan

Tabla 29. Resultados Primera parte de los resultados de la modelación química del agua proveniente de Axocopan con las concentraciones inicial, modificadas y sus duplicados de los pozos PV y SJM, mediante el programa Visual MINTEQ 3.1. (En rojo se muestran los valores con sobresaturación).

Axocopan								
Mineral	Inicial		axpv-o		axpv-d		axsj-o	
	log IAP	Sat. index						
Anhydrite	-6.966	-2.606	-6.97	-2.61	-6.97	-2.61	-6.967	-2.607
Aragonite	-10.29	-1.953	-10.29	-1.957	-10.29	-1.957	-10.29	-1.955
Artinite	-1.762	-11.362	-1.778	-11.378	-1.78	-11.38	-1.768	-11.368
As ₂ O ₅ (s)	-80.86	-46.165	-58.1	-23.411	-57.88	-23.186	-58.22	-23.53
Brucite	8.182	-8.918	8.175	-8.925	8.173	-8.927	8.18	-8.92
Ca ₃ (AsO ₄) ₂ ·4H ₂ O(s)	-57.35	-38.446	-34.6	-15.7	-34.38	-15.477	-34.71	-15.814
CaCO ₃ ·xH ₂ O(s)	-10.29	-3.145	-10.29	-3.149	-10.29	-3.149	-10.29	-3.147
Calcite	-10.29	-1.81	-10.29	-1.813	-10.29	-1.814	-10.29	-1.811
Dolomite (disordered)	-20.23	-3.694	-20.25	-3.705	-20.25	-3.707	-20.24	-3.698
Dolomite (ordered)	-20.23	-3.144	-20.25	-3.155	-20.25	-3.157	-20.24	-3.148
Epsomite	-6.621	-4.495	-6.63	-4.503	-6.631	-4.505	-6.624	-4.498
Fluorite	-12.64	-2.137	-10.48	0.023	-10.36	0.136	-11.35	-0.847
Gypsum	-6.966	-2.356	-6.97	-2.36	-6.971	-2.361	-6.967	-2.357
Halite	-6.023	-7.573	-5.964	-7.514	-5.955	-7.505	-5.998	-7.548
Huntite	-40.12	-10.154	-40.15	-10.181	-40.15	-10.186	-40.13	-10.163
Hydromagnesite	-31.6	-22.829	-31.64	-22.869	-31.64	-22.875	-31.61	-22.842
KCl(s)	-7.246	-8.146	-7.247	-8.147	-7.248	-8.148	-7.247	-8.147
Lime	7.837	-24.863	7.834	-24.866	7.833	-24.866	7.836	-24.864
Magnesite	-9.944	-2.484	-9.952	-2.492	-9.953	-2.493	-9.947	-2.487
Mg(OH) ₂ (active)	8.182	-10.612	8.175	-10.619	8.173	-10.621	8.18	-10.614
Mg ₂ (OH) ₃ Cl·4H ₂ O(s)	7.459	-18.541	7.444	-18.556	7.441	-18.559	7.454	-18.546
MgCO ₃ ·5H ₂ O(s)	-9.945	-5.405	-9.953	-5.413	-9.954	-5.414	-9.948	-5.408
MgF ₂ (s)	-12.29	-4.181	-10.14	-2.026	-10.02	-1.914	-11	-2.893
Mirabilite	-9.041	-7.927	-8.922	-7.808	-8.906	-7.792	-8.991	-7.877
NaF(s)	-7.355	-6.865	-6.214	-5.724	-6.149	-5.659	-6.685	-6.195
Natron	-12.37	-11.054	-12.25	-10.935	-12.23	-10.918	-12.32	-11.004
Nesquehonite	-9.945	-5.275	-9.953	-5.283	-9.954	-5.284	-9.947	-5.277
Periclase	8.182	-13.402	8.175	-13.409	8.174	-13.411	8.18	-13.404
Portlandite	7.837	-14.867	7.834	-14.87	7.833	-14.871	7.835	-14.869
Thenardite	-9.039	-9.361	-8.921	-9.242	-8.904	-9.226	-8.99	-9.311
Thermonatrite	-12.36	-13	-12.24	-12.881	-12.23	-12.865	-12.31	-12.95
Vaterite	-10.29	-2.376	-10.29	-2.38	-10.29	-2.38	-10.29	-2.377

Tabla 30. Segunda parte de los resultados de la modelación química del agua proveniente de Axocopan con las concentraciones modificadas y sus duplicados de los pozos SJM, Muhi y Pb18 mediante el programa Visual MINTEQ 3.1

Axocopan								
Mineral	axsj-d		axmu-o		axmu-d		Axbp	
	log IAP	Sat. index						
Anhydrite	-6.967	-2.607	-6.967	-2.607	-6.967	-2.607	-6.966	-2.606
Aragonite	-10.29	-1.955	-10.29	-1.954	-10.29	-1.955	-10.29	-1.954
Artinite	-1.767	-11.367	-1.766	-11.366	-1.766	-11.366	-1.764	-11.364
As ₂ O ₅ (s)	-58.25	-23.558	-57.78	-23.088	-57.54	-22.849	-58.29	-23.604
Brucite	8.18	-8.92	8.181	-8.919	8.18	-8.92	8.181	-8.919
Ca ₃ (AsO ₄) ₂ :4H ₂ O(s)	-34.74	-15.841	-34.27	-15.371	-34.03	-15.132	-34.79	-15.886
CaCO ₃ xH ₂ O(s)	-10.29	-3.146	-10.29	-3.146	-10.29	-3.146	-10.29	-3.146
Calcite	-10.29	-1.811	-10.29	-1.811	-10.29	-1.811	-10.29	-1.81
Dolomite (disordered)	-20.24	-3.697	-20.24	-3.696	-20.24	-3.697	-20.24	-3.695
Dolomite (ordered)	-20.24	-3.147	-20.24	-3.146	-20.24	-3.147	-20.24	-3.145
Epsomite	-6.624	-4.497	-6.623	-4.497	-6.623	-4.497	-6.622	-4.495
Fluorite	-11.53	-1.025	-11.74	-1.243	-11.76	-1.262	-12.3	-1.797
Gypsum	-6.967	-2.357	-6.967	-2.357	-6.967	-2.357	-6.966	-2.356
Halite	-6.002	-7.552	-6.003	-7.553	-6.001	-7.551	-6.012	-7.562
Huntite	-40.13	-10.161	-40.13	-10.16	-40.13	-10.161	-40.12	-10.156
Hydromagnesite	-31.61	-22.839	-31.6	-22.838	-31.6	-22.838	-31.6	-22.832
KCl(s)	-7.247	-8.147	-7.247	-8.147	-7.247	-8.147	-7.247	-8.147
Lime	7.836	-24.863	7.836	-24.863	7.836	-24.863	7.836	-24.863
Magnesite	-9.946	-2.486	-9.946	-2.486	-9.946	-2.486	-9.945	-2.485
Mg(OH) ₂ (active)	8.18	-10.614	8.181	-10.613	8.18	-10.614	8.181	-10.613
Mg ₂ (OH) ₃ Cl:4H ₂ O(s)	7.455	-18.545	7.456	-18.544	7.456	-18.544	7.458	-18.542
MgCO ₃ :5H ₂ O(s)	-9.947	-5.407	-9.947	-5.407	-9.947	-5.407	-9.946	-5.406
MgF ₂ (s)	-11.18	-3.071	-11.4	-3.289	-11.42	-3.307	-11.95	-3.841
Mirabilite	-8.999	-7.885	-9.001	-7.887	-8.998	-7.884	-9.019	-7.905
NaF(s)	-6.778	-6.288	-6.888	-6.398	-6.896	-6.406	-7.174	-6.684
Natron	-12.32	-11.012	-12.33	-11.014	-12.32	-11.011	-12.34	-11.032
Nesquehonite	-9.947	-5.277	-9.946	-5.276	-9.946	-5.276	-9.945	-5.275
Periclase	8.18	-13.404	8.181	-13.403	8.181	-13.403	8.182	-13.402
Portlandite	7.836	-14.868	7.836	-14.868	7.836	-14.868	7.836	-14.868
Thenardite	-8.997	-9.319	-9	-9.321	-8.997	-9.318	-9.018	-9.34
Thermonatrite	-12.32	-12.958	-12.32	-12.961	-12.32	-12.957	-12.34	-12.979
Vaterite	-10.29	-2.377	-10.29	-2.377	-10.29	-2.377	-10.29	-2.377

Atlimeyaya

Tabla 31. Primera parte de los resultados de la modelación química del agua proveniente de Atlimeyaya con las concentraciones inicial, modificadas y sus duplicados de los pozos PV y SJM mediante el programa Visual MINTEQ 3.1.

Mineral	Atlimeyaya							
	Inicial		atpv-o		atpv-d		atsj-o	
	log IAP	Sat. index	log IAP	Sat. index	log IAP	Sat. index	log IAP	Sat. Index
Anhydrite	-7.994	-3.634	-8.009	-3.649	-8.009	-3.649	-7.999	-3.639
Aragonite	-10.779	-2.443	-10.791	-2.455	-10.791	-2.455	-10.783	-2.447
Artinite	-1.857	-11.457	-1.896	-11.496	-1.896	-11.496	-1.871	-11.471
As ₂ O ₅ (s)	-81.93	-47.24	-58.799	-24.109	-58.873	-24.183	-60.151	-25.461
Brucite	8.692	-8.408	8.674	-8.426	8.674	-8.426	8.686	-8.414
Ca ₃ (AsO ₄) ₂ ·4H ₂ O(s)	-56.544	-37.644	-33.44	-14.54	-33.514	-14.614	-34.775	-15.875
CaCO ₃ ·xH ₂ O(s)	-10.779	-3.635	-10.791	-3.647	-10.791	-3.647	-10.783	-3.639
Calcite	-10.779	-2.299	-10.791	-2.311	-10.791	-2.311	-10.783	-2.303
Dolomite (disordered)	-21.328	-4.788	-21.361	-4.821	-21.361	-4.821	-21.34	-4.8
Dolomite (ordered)	-21.328	-4.238	-21.361	-4.271	-21.361	-4.271	-21.34	-4.25
Epsomite	-7.764	-5.638	-7.788	-5.662	-7.789	-5.662	-7.773	-5.646
Fluorite	-12.87	-2.37	-10.523	-0.023	-10.504	-0.004	-11.342	-0.842
Gypsum	-7.994	-3.384	-8.009	-3.399	-8.01	-3.4	-7.999	-3.389
Halite	-7.268	-8.818	-7.038	-8.588	-7.036	-8.586	-7.167	-8.717
Huntite	-42.427	-12.459	-42.501	-12.533	-42.502	-12.534	-42.452	-12.484
Hydromagnesite	-33.505	-24.739	-33.605	-24.839	-33.607	-24.841	-33.54	-24.774
KCl(s)	-8.335	-9.235	-8.338	-9.238	-8.339	-9.239	-8.336	-9.236
Lime	8.462	-24.237	8.453	-24.246	8.453	-24.246	8.459	-24.24
Magnesite	-10.549	-3.089	-10.57	-3.11	-10.57	-3.11	-10.556	-3.096
Mg(OH) ₂ (active)	8.692	-10.102	8.674	-10.12	8.674	-10.12	8.686	-10.108
Mg ₂ (OH) ₃ Cl·4H ₂ O(s)	7.228	-18.772	7.191	-18.809	7.19	-18.81	7.215	-18.785
MgCO ₃ ·5H ₂ O(s)	-10.549	-6.009	-10.57	-6.03	-10.57	-6.03	-10.557	-6.017
MgF ₂ (s)	-12.64	-4.53	-10.302	-2.192	-10.283	-2.173	-11.115	-3.005
Mirabilite	-10.681	-9.567	-10.223	-9.109	-10.218	-9.104	-10.48	-9.366
NaF(s)	-7.778	-7.288	-6.369	-5.879	-6.356	-5.866	-6.911	-6.421
Natron	-13.466	-12.155	-13.005	-11.694	-13	-11.689	-13.264	-11.953
Nesquehonite	-10.549	-5.879	-10.57	-5.9	-10.57	-5.9	-10.556	-5.886
Periclase	8.692	-12.892	8.674	-12.91	8.674	-12.91	8.686	-12.898
Portlandite	8.462	-14.242	8.453	-14.251	8.453	-14.251	8.459	-14.245
Thenardite	-10.68	-11.002	-10.223	-10.545	-10.218	-10.54	-10.48	-10.801
Thermonatrite	-13.466	-14.103	-13.005	-13.642	-13	-13.637	-13.263	-13.9
Vaterite	-10.779	-2.866	-10.791	-2.878	-10.791	-2.878	-10.783	-2.87

Tabla 32. Segunda parte de los resultados de la modelación química del agua proveniente de Atlimeyaya con las concentraciones modificadas y sus duplicados de los pozos SJM, Muhi y Pb18 mediante el programa Visual MINTEQ 3.1.

Atlimeyaya								
Mineral	atsj-d		atmu-o		atmu-d		atpb	
	log IAP	Sat. index						
Anhydrite	-7.998	-3.638	-7.998	-3.638	-7.999	-3.639	-7.996	-3.636
Aragonite	-10.782	-2.446	-10.783	-2.447	-10.783	-2.447	-10.781	-2.445
Artinite	-1.868	-11.468	-1.868	-11.468	-1.869	-11.469	-1.863	-11.463
As ₂ O ₅ (s)	-60.249	-25.559	-59.389	-24.699	-59.711	-25.021	-59.548	-24.858
Brucite	8.687	-8.413	8.687	-8.413	8.687	-8.413	8.689	-8.411
Ca ₃ (AsO ₄) ₂ ·4H ₂ O(s)	-34.871	-15.971	-34.011	-15.111	-34.333	-15.433	-34.166	-15.266
CaCO ₃ ·xH ₂ O(s)	-10.783	-3.638	-10.783	-3.639	-10.783	-3.639	-10.782	-3.637
Calcite	-10.782	-2.303	-10.783	-2.303	-10.783	-2.303	-10.781	-2.302
Dolomite (disordered)	-21.337	-4.797	-21.338	-4.798	-21.338	-4.798	-21.334	-4.794
Dolomite (ordered)	-21.337	-4.247	-21.338	-4.248	-21.338	-4.248	-21.334	-4.244
Epsomite	-7.771	-5.645	-7.771	-5.644	-7.771	-5.645	-7.768	-5.641
Fluorite	-11.511	-1.011	-11.572	-1.072	-11.488	-0.988	-12.03	-1.53
Gypsum	-7.998	-3.388	-7.999	-3.389	-7.999	-3.389	-7.997	-3.387
Halite	-7.183	-8.733	-7.182	-8.732	-7.178	-8.728	-7.213	-8.763
Huntite	-42.447	-12.479	-42.448	-12.48	-42.449	-12.481	-42.439	-12.471
Hydromagnesite	-33.533	-24.767	-33.534	-24.768	-33.535	-24.769	-33.521	-24.755
KCl(s)	-8.336	-9.236	-8.336	-9.236	-8.336	-9.236	-8.335	-9.235
Lime	8.459	-24.24	8.459	-24.24	8.459	-24.24	8.461	-24.239
Magnesite	-10.555	-3.095	-10.555	-3.095	-10.555	-3.095	-10.553	-3.093
Mg(OH) ₂ (active)	8.687	-10.107	8.687	-10.107	8.687	-10.107	8.689	-10.105
Mg ₂ (OH) ₃ Cl·4H ₂ O(s)	7.217	-18.783	7.218	-18.782	7.217	-18.783	7.222	-18.778
MgCO ₃ ·5H ₂ O(s)	-10.555	-6.015	-10.555	-6.015	-10.556	-6.016	-10.553	-6.013
MgF ₂ (s)	-11.283	-3.173	-11.344	-3.234	-11.261	-3.151	-11.801	-3.691
Mirabilite	-10.511	-9.397	-10.509	-9.395	-10.501	-9.387	-10.57	-9.456
NaF(s)	-7.012	-6.522	-7.041	-6.551	-6.995	-6.505	-7.302	-6.812
Natron	-13.295	-11.984	-13.294	-11.983	-13.286	-11.975	-13.355	-12.044
Nesquehonite	-10.555	-5.885	-10.555	-5.885	-10.556	-5.886	-10.553	-5.883
Periclase	8.687	-12.897	8.687	-12.897	8.687	-12.897	8.689	-12.895
Portlandite	8.459	-14.245	8.459	-14.245	8.459	-14.245	8.46	-14.244
Thenardite	-10.511	-10.833	-10.509	-10.83	-10.501	-10.823	-10.57	-10.892
Thermonatrite	-13.295	-13.932	-13.293	-13.93	-13.285	-13.922	-13.355	-13.992
Vaterite	-10.782	-2.869	-10.783	-2.869	-10.783	-2.869	-10.781	-2.868

Guanajuato e Hidalgo

Tabla 33. Resultados de la modelación química del agua proveniente de los estados de Guanajuato e Hidalgo mediante el programa Visual MINTEQ 3.1. (En rojo se muestran los valores con sobresaturación).

Mineral	Guanajuato				Hidalgo			
	SJM		PV		Muhí		Pb18	
	log IAP	Sat. index	log IAP	Sat. index	log IAP	Sat. index	log IAP	Sat. index
Anhydrite	-7.583	-3.223	-7.839	-3.479	-6.463	-2.103	-6.326	-1.966
Aragonite	-8.696	-0.36	-8.651	-0.314	-8.168	0.168	-8.264	0.072
Artinite	3.444	-6.156	3.328	-6.272	4.058	-5.542	3.06	-6.54
As ₂ O ₅ (s)	-68.784	-34.094	-69.453	-34.763	-65.064	-30.374	-64.611	-29.921
Brucite	12.201	-4.899	12.275	-4.825	12.463	-4.637	11.815	-5.285
Ca ₃ (AsO ₄) ₂ :4H ₂ O(s)	-32	-13.1	-31.737	-12.837	-26.966	-8.066	-27.69	-8.79
CaCO ₃ xH ₂ O(s)	-8.696	-1.552	-8.651	-1.506	-8.168	-1.023	-8.264	-1.119
Calcite	-8.696	-0.216	-8.651	-0.171	-8.168	0.312	-8.264	0.216
Dolomite (disordered)	-17.452	-0.912	-17.598	-1.058	-16.572	-0.032	-17.019	-0.479
Dolomite (ordered)	-17.452	-0.362	-17.598	-0.508	-16.572	0.518	-17.019	0.071
Epsomite	-7.644	-5.517	-8.136	-6.009	-6.7	-4.574	-6.819	-4.692
Fluorite	-11.487	-0.987	-11.34	-0.84	-11.024	-0.524	-11.887	-1.387
Gypsum	-7.583	-2.973	-7.839	-3.229	-6.463	-1.853	-6.326	-1.716
Halite	-5.979	-7.529	-5.382	-6.932	-6.494	-8.044	-7.02	-8.57
Huntite	-34.966	-4.998	-35.492	-5.524	-33.381	-3.413	-34.53	-4.562
Hydromagnesite	-22.826	-14.06	-23.514	-14.748	-21.156	-12.39	-23.207	-14.441
KCl(s)	-7.188	-8.088	-6.726	-7.626	-7.776	-8.676	-8.07	-8.97
Lime	12.261	-20.438	12.572	-20.127	12.7	-20	12.307	-20.392
Magnesite	-8.757	-1.297	-8.947	-1.487	-8.405	-0.945	-8.755	-1.295
Mg(OH) ₂ (active)	12.201	-6.593	12.275	-6.519	12.463	-6.331	11.815	-6.979
Mg ₂ (OH) ₃ Cl:4H ₂ O(s)	12.842	-13.158	13.103	-12.897	13.262	-12.738	12.4	-13.6
MgCO ₃ :5H ₂ O(s)	-8.757	-4.217	-8.948	-4.408	-8.405	-3.865	-8.756	-4.216
MgF ₂ (s)	-11.548	-3.438	-11.636	-3.526	-11.261	-3.151	-12.379	-4.269
Mirabilite	-8.685	-7.571	-8.283	-7.169	-8.825	-7.711	-10.214	-9.1
NaF(s)	-6.294	-5.804	-5.891	-5.401	-6.692	-6.202	-7.887	-7.397
Natron	-9.798	-8.487	-9.095	-7.784	-10.53	-9.219	-12.152	-10.841
Nesquehonite	-8.757	-4.087	-8.948	-4.278	-8.405	-3.735	-8.756	-4.086
Periclase	12.201	-9.383	12.275	-9.309	12.463	-9.121	11.815	-9.769
Portlandite	12.261	-10.443	12.572	-10.132	12.699	-10.005	12.307	-10.397
Thenardite	-8.684	-9.006	-8.282	-8.604	-8.824	-9.145	-10.213	-10.535
Thermonatrite	-9.798	-10.435	-9.094	-9.731	-10.529	-11.166	-12.151	-12.788
Vaterite	-8.696	-0.782	-8.651	-0.737	-8.168	-0.254	-8.264	-0.35