

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

---



**ORIGEN DE LAS CONCENTRACIONES DE ARSÉNICO Y  
FLUORURO EN EL AGUA SUBTERRÁNEA DE ACUÍFEROS EN  
ROCAS VOLCÁNICAS: EL CASO DE LA CIUDAD DE CHIHUAHUA**

POR:

**ING. JAVIER ELÍAS FERNÁNDEZ FRANCO**

**ESTUDIO DE CASO PRESENTADO**

**COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE**

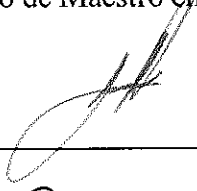
**MAESTRO EN INGENIERÍA EN HIDROLOGÍA**

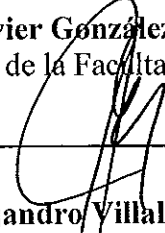
**CHIHUAHUA, CHIH., MÉXICO**

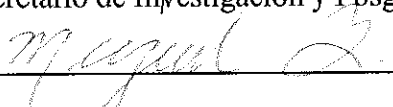
**DICIEMBRE DE 2020**



*Origen de las concentraciones de arsénico y fluoruro en el agua subterránea de acuíferos en rocas volcánicas: el caso de la ciudad de Chihuahua.* Estudio de Caso presentado por Ing. Javier Elías Fernández Franco como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Ingeniería, ha sido aprobado y aceptado por:

  
\_\_\_\_\_  
**M.I. Javier González Cantú**  
Director de la Facultad de Ingeniería

  
\_\_\_\_\_  
**Dr. Alejandro Villalobos Aragón**  
Secretario de Investigación y Posgrado

  
\_\_\_\_\_  
**M.I. Miguel Ángel González Núñez**  
Coordinador(a) Académico

  
\_\_\_\_\_  
**Dr. Juan Carlos Burillo Montúfar**  
Director(a) de Tesis

**Diciembre 2020**

Fecha

Comité:

**Dr. Juan Carlos Burillo Montúfar**  
**M.I. Miguel Ángel Méndez Alvarado**  
**Dr. Antonio Cardona Benavides (Codirector)**  
**Dr. Gerónimo Llerar Meza**

© Derechos Reservados  
**Ing. Javier Elías Fernández Franco**  
Circuito Universitario No. 1  
Campus Universitario 2  
Chihuahua, Chih. México

Diciembre 2020



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE  
**CHIHUAHUA**

16 de diciembre de 2020

**ING. JAVIER ELÍAS FERNÁNDEZ FRANCO.**  
**Presente**

En atención a su solicitud relativa al trabajo de tesis para obtener el grado de maestría en ingeniería en hidrología, nos es grato transcribirle el tema aprobado por esta dirección, propuesto y dirigido por el director la Dr. Juan Carlos Burillo Montufar para que lo desarrolle como tesis con el título **“ORIGEN DE LAS CONCENTRACIONES DE ARSÉNICO Y FLUORURO EN EL AGUA SUBTERRÁNEA DE ACUÍFEROS EN ROCAS VOLCÁNICAS: EL CASO DE LA CIUDAD DE CHIHUAHUA.”**

### ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTOS	
CRÉDITOS INSTITUCIONALES	
RESUMEN	
ÍNDICE DE TABLAS	
DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTOS	
CRÉDITOS INSTITUCIONALES	
RESUMEN	
ÍNDICE DE TABLAS	
ÍNDICE DE FIGURAS	
1. MARCO TEÓRICO	
1.1 Introducción	
1.2 Antecedentes	
2. METODOLOGÍA	
2.1 Trabajo de campo: muestreo de agua	
Titulación volumétrica para determinar la alcalinidad de las muestras:	
2.2 Trabajo de campo: muestreo de sedimentos	
2.3 Análisis químicos de las muestras	

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN
  - 3.1 Descripción estadística de la química del agua subterránea
  - 3.2 Caracterización del agua por As y F
  - 3.3 Tipos de agua
  - 3.4 Parámetros fisicoquímicos y otros elementos traza
  - 3.5 Análisis de correlación
  - 3.6 Relación de la temperatura con otros parámetros de calidad de agua
  - 3.7 Índices de saturación mineral
  - 3.8 Influencia de la profundidad
  - 3.9 Movilización del arsénico y fluoruros en el agua subterránea
  - 3.10 Remoción de arsénico y fluoro del agua subterránea empleando el programa GWB
  - 3.11 Análisis de componentes principales y modelo conceptual
  - 3.12 Análisis de sedimentos
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES
5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Solicitamos a Usted tomar nota de que el título del trabajo se imprima en lugar visible de los ejemplares de las tesis.

**ATENTAMENTE**  
“naturam subiecit aliis”

**EL DIRECTOR**

**M.I. JAVIER GONZÁLEZ CANTÚ**

FACULTAD DE  
INGENIERÍA  
U.A.CH.



**DIRECCIÓN**

**EL SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN  
Y POSGRADO**

**DR. ALEJANDRO VILLALOBOS ARAGÓN**



## DEDICATORIA

*A mi hija por ser mi fuente de energía e inspiración, tú me haces querer ser mejor persona.*

*A mi esposa por su apoyo incondicional y su paciencia.*

*A mi madre por su consejo y sabiduría en los momentos difíciles.*



## **AGRADECIMIENTOS**

*A mis padres y hermano por su apoyo, en todo momento, para llevar a cabo mis estudios de maestría*

*A los profesores que me impartieron clases a lo largo de la maestría, y dieron ejemplo por su dedicación a la enseñanza, a la Maestra Calderón, al Dr. Villalobos y al Dr. Silva.*

*Al Dr. Burillo por su ejemplo y su guía, así como en el apoyo para llevar a cabo este trabajo.*

*Agradecimiento al Dr. Cardona y a la Dra. García por el apoyo brindado, durante y después de la estancia en San Luis Potosí, para el análisis de las muestras y por sus consejos y guía.*

*A mi compañera de clases, Ana, por ayudarme en tantas ocasiones a realizar las tareas para sacar adelante la maestría.*

*Al personal de Junta Municipal de Agua y Saneamiento de Chihuahua por proporcionar apoyo para llevar a cabo el muestreo de los pozos.*



## **CRÉDITOS INSTITUCIONALES**

*Esta investigación se llevó a cabo como parte del proyecto **377899 Fuentes Geogénicas y Mecanismos de movilización de arsénico, fluoruro y uranio a sistemas de flujo de agua subterránea en la Sierra Madre Occidental, México, de la Convocatoria CONACYT Ciencia de Frontera 2019**, cuyo responsable técnico es el **Dr. Antonio Cardona Benavides**, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP) y el corresponsable técnico es el **Dr. Juan Carlos Burillo Montúfar** de la Universidad Autónoma de Chihuahua (UACH). El Ing. Javier Elías Fernández Franco es Becario Conacyt actualmente y su CVU es 910447. Los análisis de fluoruros y nitratos se llevaron a cabo en el laboratorio de Análisis de Agua y Suelo del Área de Ciencias de la Tierra de la Facultad de Ingeniería de la UASLP, mientras que los análisis de los elementos traza se realizaron en el Laboratorio de Geoquímica del Instituto de Geología de la UASLP, en ambos gracias al apoyo de la **Dra. María Elena García Arreola**. Los análisis químicos por elementos pesados, así como fluoruros se hicieron en el laboratorio de Ingeniería Sanitaria de la Facultad de Ingeniería de la UACH a cargo de la **Ing. Irma Peralta Segovia**.*



## RESUMEN

En la ciudad de Chihuahua, al Norte de México, se colectaron 34 muestras de agua entre noviembre del 2019 y enero del 2020 de pozos empleados para consumo humano, agrícola e industrial. En la ciudad confluyen tres acuíferos: El Sauz-Encinillas, Chihuahua-Sacramento y Tabalaopa-Aldama. El 80% y 32% de las muestras contienen fluoruro ( $F^-$ ) y arsénico (As), respectivamente, por arriba de límite permisible de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana (NOM-127-SSA1-1994), la cual establece los límites máximos permisibles de As y  $F^-$  (entre otros elementos) para consumo humano. Se encontró co-contaminación de As y  $F^-$  en los pozos del acuífero El Sauz. El agua es tipo  $HCO_3-Na-Ca$  en un ambiente oxidante y pH ligeramente alcalino. Las especies de As (V)  $HAsO_4^-$  y  $H_2AsO_4^-$  y de F (-1)  $F^-$  y  $HAsO_3F^-$  son los que predominan en el agua. Se confirma que el origen del As y  $F^-$  es geogénico por la presencia de Litio (Li) y altas temperaturas ( $> 28^\circ C$ ). En los pozos del acuífero Aldama se observó contaminación antropogénica por el contenido de nitratos  $NO_3^-$  y Conductividad Eléctrica (CE) elevados. Otros elementos detectados en el agua a nivel de trazas fueron: Estroncio (Sr), Bario (Ba) y Uranio (U). La fluorita disuelve en el agua favoreciendo así su movilización. Este mineral puede estar asociado a minerales de arsénico en forma de arseniatos:  $Al(AsO_4)(c)$ ,  $Ca_3(AsO_4)(2c)$ ,  $Mg_3(AsO_4)(2c)$ ,  $Zn_3(AsO_4)(2c)$ ,  $Sr_3(AsO_4)(2c)$ . Se propone un control del  $F^-$  para cumplir con la NOM mediante procesos de mezcla  $F^-$  alto vs  $F^-$  bajo y del As al reaccionar el agua subterránea con minerales de hierro como FeO y hematita. La presencia de As y  $F^-$  es una combinación de acciones naturales o antropogénicas como magmatismo, infiltración-extracción de agua, cambio climático, que produce variados efectos de interacción roca-sedimentos agua como alta temperatura de agua, hidrólisis mineral, procesos de intercambio iónico en las arcillas y disolución de la fluorita, así como disolución de los arseniatos y desorción de  $F^-$  de los sedimentos.





## ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA .....	iv
AGRADECIMIENTOS .....	v
CRÉDITOS INSTITUCIONALES .....	vi
RESUMEN .....	vii
ÍNDICE DE TABLAS .....	22
ÍNDICE DE FIGURAS.....	22
1. MARCO TEÓRICO.....	24
1.1 Introducción .....	24
1.2 Antecedentes .....	28
1.2.1 Localización del área de estudio .....	29
1.2.2 Hidrografía y mineralogía.....	31
1.2.3 Hidrogeoquímica.....	33
2. METODOLOGÍA.....	34
2.1 Trabajo de campo: muestreo de agua.....	34
2.1.1 Análisis de alcalinidad .....	37
Titulación volumétrica para determinar la alcalinidad de las muestras:.....	37
2.2 Trabajo de campo: muestreo de sedimentos .....	38
2.3 Análisis químicos de las muestras .....	39
2.3.1 Análisis en el laboratorio de Sanitaria de la UACH. ....	39
2.3.2 Análisis en el laboratorio de Análisis Químicos del Instituto de Geología de la UASLP.....	40
Análisis de fluoruros: .....	40
Análisis de nitratos:.....	41
Análisis de las muestras para medir elementos traza por medio del ICP-MS: .....	41
Análisis de las muestras para medir elementos traza por medio de ICP-OES: .....	41
2.3.3 Análisis los sedimentos en el laboratorio de Metalurgia de la UACH .....	41
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	43
3.1 Descripción estadística de la química del agua subterránea .....	43
3.2 Caracterización del agua por As y F.....	44
3.3 Tipos de agua .....	46
3.4 Parámetros fisicoquímicos y otros elementos traza .....	47
3.5 Análisis de correlación.....	48
3.6 Relación de la temperatura con otros parámetros de calidad de agua .....	48
3.7 Índices de saturación mineral.....	49
3.8 Influencia de la profundidad .....	52
3.9 Movilización del arsénico y fluoruros en el agua subterránea.....	53
3.10 Remoción de arsénico y fluoro del agua subterránea empleando el programa GWB .....	57
3.11 Análisis de componentes principales y modelo conceptual.....	58
3.12 Análisis de sedimentos.....	59



4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	62
5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	77



## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Rangos de concentración de arsénico y fluoruros en el agua subterránea potable .....	27
<b>Tabla 2.</b> Datos históricos de calidad de agua de acuerdo con la CNA .....	33
<b>Tabla 3.</b> Resultados del análisis de las muestras de agua. Los minerales que pueden estar presentes son los arseniatos y la fluorita .....	43
<b>Tabla 4.</b> Parámetros físicos y elementos traza en las muestras de agua subterránea. Los posibles minerales asociados con la calidad del agua son vanadita (V), celestita (Sr), barita (Ba) y uraninita (U).....	47
<b>Tabla 5.</b> Coeficientes de correlación de Pearson entre parámetros físico-químicos.....	48
<b>Tabla 6.</b> Análisis de sedimentos del arroyo El Mimbres.....	60
<b>Tabla 7.</b> Mediciones en campo y análisis químico del agua en el área de estudio. ....	64
<b>Tabla 8.</b> Parámetros físicos y elementos traza de la familia de agua bicarbonatada sódica, n=25.....	75
<b>Tabla 9.</b> Parámetros físicos y elementos traza de la familia de agua bicarbonatada cálcica, n=9.....	76

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Zona de estudio. ....	30
<b>Figura 2.</b> Localización de las muestras en el área de estudio. ....	35
<b>Figura 3.</b> Muestreo en campo. ....	36
<b>Figura 4.</b> Ubicación de los sitios de muestreo en el arroyo El Mimbres.....	39
<b>Figura 5.</b> Gráficas con las concentraciones de As y F de los tres acuíferos. ....	44
<b>Figura 6.</b> Ubicación de los pozos con concentraciones altas de As y F. ....	45
<b>Figura 7.</b> Diagramas de Schöeller y Durov.....	46
<b>Figura 8.</b> Relación de la temperatura con otros parámetros. ....	49
<b>Figura 9.</b> Índice de saturación mineral de cada muestra de agua subterránea. ....	50
<b>Figura 10.</b> Saturación mineral vs parámetros químicos.....	51



<b>Figura 11.</b> Influencia de la profundidad sobre As, CE y nitratos. ....	53
<b>Figura 12.</b> Relación del As con otros parámetros físicos y químicos.....	55
<b>Figura 13.</b> Diagrama Eh-pH. Sistema As-SO <sub>4</sub> -H <sub>2</sub> O .....	56
<b>Figura 14.</b> Diagrama Eh-pH. Sistema F-Li-H <sub>2</sub> O. ....	57
<b>Figura 15.</b> Remoción de As y F con hierro mediante mezcla de agua subterránea. ....	58
<b>Figura 16.</b> Análisis de componentes principales. ....	59
<b>Figura 17.</b> Relación causa-efecto-impacto de la presencia de As y F en el agua subterránea.....	61



# 1. MARCO TEÓRICO

## 1.1 Introducción

La presencia de arsénico en el agua subterránea afecta a millones de personas en todo el mundo (Podgorski & Michael, 2020). En todos los países de Latinoamérica se han reportado niveles tóxicos de arsénico, éste es liberado naturalmente al medio ambiente y movilizado desde fuentes geogénicas como: rocas volcánicas y emisiones, depósitos minerales metálicos y fluidos geotermales ricos en arsénico que ascienden de profundas reservas geotermales (Bundschuh, et al., 2020).

En México, el agua subterránea representa la única fuente disponible permanente para muchas regiones áridas y semiáridas, ya que la mayor parte del territorio nacional está dominado por condiciones climáticas secas, además se sabe que muchas de estas zonas áridas y semiáridas presentan altas concentraciones de arsénico (Arreguín, Chávez, Soto, & Smedley, 2012). Esto quiere decir que agua subterránea con estas características se emplea en la mayor parte del país para llevar a cabo actividades como la agricultura, la industria y para consumo humano. Por lo tanto, se vuelve sumamente valioso el realizar mediciones regulares de las concentraciones de ambos elementos en el agua subterránea, por una parte; para contar con información que permita establecer el comportamiento de estos elementos en el medio, también para no comprometer la salud de la población al cumplir con los límites máximos permisibles (0.025 mg/l para el As y 1.50 mg/l para F<sup>-</sup>) para consumo humano establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 (2000).

A nivel nacional el contenido natural de fluoruro en el agua subterránea varía desde 0.001 mg/l hasta 25 mg/l, reportándose elevadas concentraciones en las zonas áridas del centro, norte, noroeste y parte del noreste del país (Huizar, Carrillo, & Juárez, 2016). La presencia de arsénico (As) y fluoruro (F<sup>-</sup>) en el agua subterránea ocurre en diversos ambientes geológicos. Las altas concentraciones de ambos elementos obedecen a procesos geoquímicos naturales y a procesos antropogénicos. La coocurrencia de éstos en el agua subterránea se relaciona, generalmente, con rocas volcánicas. Estos acuíferos son contiguos a cinturones orogénicos y tienen un pH alcalino, lo cual favorece la disolución de sílice en vidrio volcánico y desorción de elementos adheridos a oxi-hidróxidos de hierro y manganeso, arcillas o materia orgánica. Así también que las



prolongadas sequías incrementan las concentraciones de estos elementos en los acuíferos, particularmente en los de las mesetas áridas y semi-áridas del norte-centro del país (Alarcón Herrera, et al., 2019).

En el acuífero Independencia en el estado de Guanajuato, México, se describe que la meteorización de las rocas volcánicas ácidas (riolitas) y la oxidación de minerales sulfurados que contienen As son los procesos responsables de los altos valores de  $F^-$  (16 mg/L) y As (0.12mg/L). Las fuentes naturales de As son la oxidación de minerales que contienen el elemento (como arsenopirita o escorodita), la descomposición de As adsorbiendo óxidos de hierro hidratados bajo condiciones reductoras, y el contacto con gases volcánicos y aguas termales (Mahlknecht, Steinich, & Navarro de Leon, 2004). De la misma manera en la cuenca Yuncheng, en el norte de China, mencionan también una correlación entre As y  $F^-$ , así como del As y los sólidos disueltos totales (SDT), la conductividad eléctrica y sulfatos. Las altas concentraciones de  $F^-$  y As en el agua subterránea con pH alcalino son debido a la adsorción del Fe (hierro) y As en las superficies oxidadas de los sedimentos (Khair, Li, Hu, Gao, & Wanga, 2014). En base a un mapa de monitoreo de As en el Estado de Arizona, E.U, que incluyó 33,000 muestras de agua, las áreas que habían experimentado actividades relacionadas con la minería o la explotación de agua eran las que tenían los valores más altos de arsénico, por ejemplo, las áreas de los condados Yavapai y Pinal, en el centro y sur del Estado. Los factores que contribuyeron al estrés hídrico son: disminución de la precipitación, en combinación con un aumento del consumo de agua de la población y la extracción intensiva de agua (Jones, et al., 2020).

Los ambientes con altas concentraciones de As en agua pueden ser de origen geogénico por fenómenos como: hidrotermalismo, evaporación en climas áridos, oxidación de minerales que contienen As como arsenopirita y escorodita, o antropogénicos por la generación y disposición en el suelo de residuos mineros, fundiciones, o el empleo de insecticidas. Los ambientes con altas concentración de  $F^-$  en el agua corresponden a depósitos de F asociados a minerales de pirita, barita, calcita y fluorita.

La concentración promedio de As y  $F^-$  en el agua subterránea en el mundo, en México y en la localidad de Chihuahua se muestran en la tabla 1. La probabilidad de que en Chihuahua la concentración de As en el agua subterránea sea mayor a 0.1  $\mu\text{g/L}$  es, al menos, 60%. Esto sucede de la misma forma en otras regiones de países como Argentina, India, China o Bangladesh



(Podgorski & Michael, 2020). Por lo tanto, se vuelve indispensable conocer la calidad del agua de los acuíferos para tomar decisiones con respecto a su explotación, administración y su consumo.

Los acuíferos oxidantes bajo condiciones de pH alto y los acuíferos reductores, así como las áreas afectadas por la actividad geotermal, minera o industrial, la disolución de rocas volcánicas, la desorción de As de minerales féreos en ambientes aluviales, el intemperismo de rocas volcánicas ácidas (riolitas), la oxidación de minerales de azufre que contienen arsénico, la disolución de minerales carbonatados, el descenso en el nivel freático, la contaminación del agua debido a descargas sanitarias, agrícolas o de irrigación son algunos de los fenómenos que causan la contaminación del agua por As y/o F<sup>-</sup>.

Estos fenómenos ocurren debido a procesos hidrogeoquímicos como el intercambio iónico, reacciones ácido-base, procesos óxido-reducción, disolución, precipitación, reducción bacteriana o degradación a lo largo del flujo subterráneo. Establecer mediante caracterización hidrogeoquímica los procesos que dan origen al agua de un acuífero permite proponer la causa de las altas concentraciones de As y F<sup>-</sup>. Una herramienta útil para desarrollar la modelación hidrogeoquímica es el software GWB (Geochemist Workbench), con el cual se pueden modelar sistemas geoquímicos en sistemas acuosos, así como también visualizar por medio de gráficas el balance iónico del sistema acuífero. El objetivo principal de este estudio es actualizar la información de calidad del agua en la ciudad de Chihuahua, respecto al arsénico y flúor, así como proponer un origen geogénico en el agua subterránea para ambos elementos.



*Tabla 1. Rangos de concentración de arsénico y fluoruros en el agua subterránea potable*

<b>Nivel / Rango</b>	<b>As (µg/L)</b>	<b>F<sup>-</sup> (mg/L)</b>
<i>Mundial</i>	<b>&lt;1- 4730</b> (Shankar, Shanker, & Shikha, 2014) <b>10-5000</b> (Smedley & Kinniburgh, 2002)	<b>4-22</b> (Ameur, Hamzaoui-Azaza, Cheikha, & Gueddari, 2019) <b>0.27-10.3</b> (Yousefi, Ghoochani, & Mahvi, 2018) <b>1.5-8.3</b> (Su, Wang, Xie, & Li, 2013)
<i>Nacional</i>	<b>5-530</b> (Alarcón Herrera, et al., 2019) <b>1-940</b> (Reyes-Gómez, Alarcón-Herrera, Gutiérrez, & Núñez López, 2013)	<b>0.71-7.38</b> (Pérez-Martínez, et al., 2020) <b>4.5-29.6</b> (Alarcón Herrera, et al., 2019) <b>&lt;0.25-4</b> (Knappett, et al., 2020)
<i>Local</i>	<b>1-39</b> (Ocampo-Astudillo, Garrido-Hoyos, Salcedo-Sánchez, & Martínez-Morales, 2020) <b>&lt;10<sup>-6</sup>-34.4</b> (Mahlknech, Horst, Hernandez-Limon, & Aravena, 2008)	<b>1-4.55</b> (Ocampo-Astudillo, Garrido-Hoyos, Salcedo-Sánchez, & Martínez-Morales, 2020) <b>&lt;0.04-4.56</b> (Mahlknech, Horst, Hernandez-Limon, & Aravena, 2008)





## 1.2 Antecedentes

Los estudios de calidad del agua en la ciudad de Chihuahua ya mencionaban la presencia de arsénico y fluoruro en el agua subterránea. En el estudio elaborado por la Comisión Nacional del Agua (CNA) en conjunto con la Universidad Autónoma de Chihuahua (UACH) y la Junta Municipal de Agua y Saneamiento (JMAS) titulado: *Evaluación de las fuentes actuales de abastecimiento a la ciudad de Chihuahua, estudio de factibilidad de fuentes alternas y anteproyecto de infraestructura hidráulica necesaria* se mencionan los pozos, que abastecen a la ciudad de Chihuahua que excedían los límites establecidos por la NOM-127-SSA1-1994 para fluoruro. Hace énfasis en ajustar las extracciones en los tres acuíferos debido al abatimiento que presentaban, así como continuar con las mediciones en los pozos.

Un problema muy importante y que ha surgido debido a la rápida expansión de la ciudad es el abatimiento que presentan los tres acuíferos. Este fenómeno es mencionado en *Acuíferos en Chihuahua: estudios sobre sustentabilidad* (Gutiérrez, Reyes, Alarcón, & Núñez, 2016). En este artículo se menciona la forma no sustentable en que los acuíferos de la parte central del estado, donde convergen los tres acuíferos de la zona de estudio, han sido manejados y que de continuar así se agravarán los problemas ya existentes en la zona. También relaciona los acuíferos con mayor déficit con las zonas donde hay una agricultura intensiva, así como la presencia de nitratos en el acuífero Tabalaopa-Aldama, a pesar de que éste no presenta déficit importante.

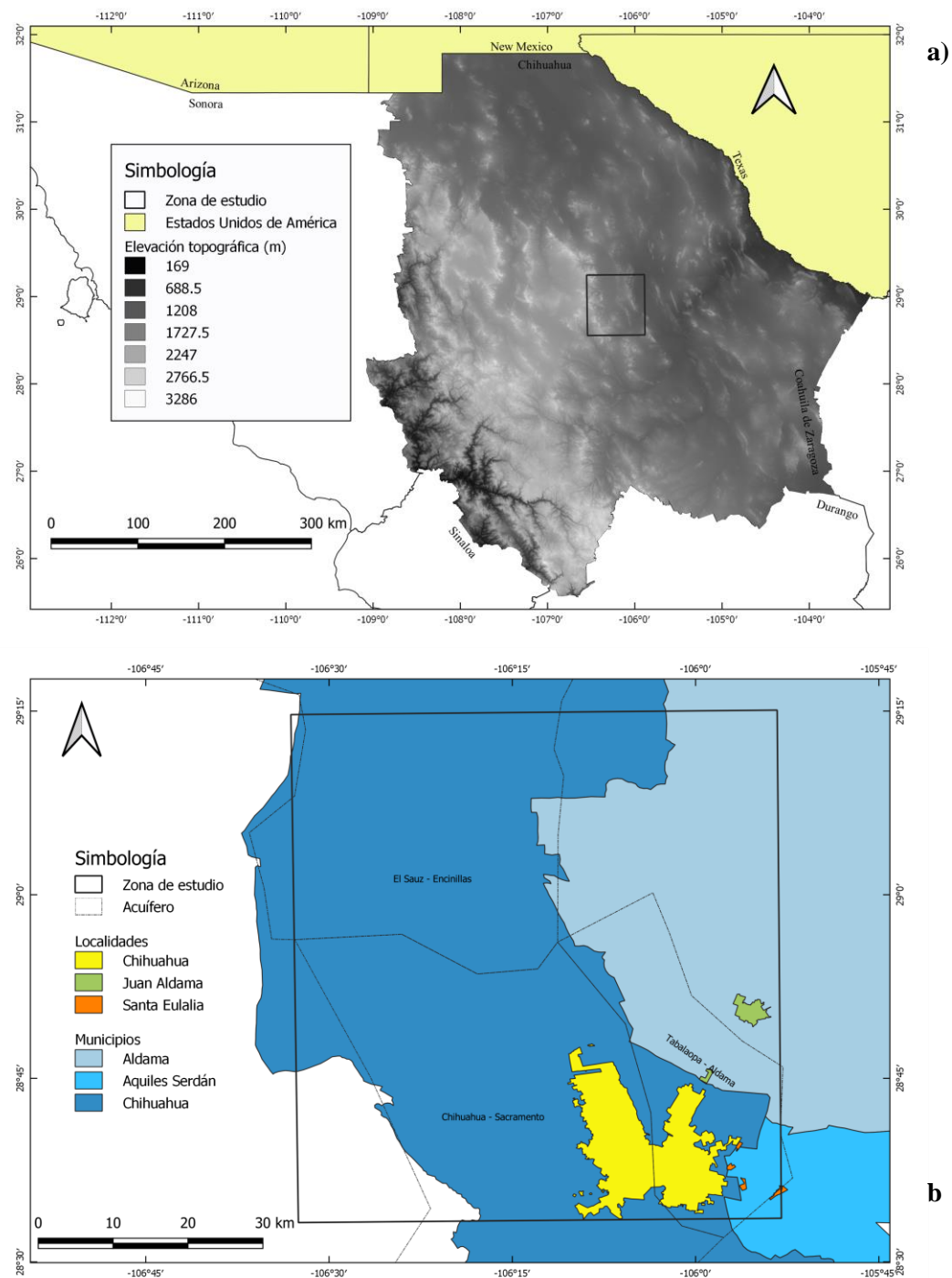
La identificación de fuentes potenciales de As y F<sup>-</sup> es un aspecto importante de la modelación hidrogeoquímica, ya que permite establecer un posible origen. Identificar posibles fuentes fue precisamente el objetivo en el estudio *Fluoride and Arsenic in an Alluvial Aquifer System in Chihuahua, Mexico: Contaminant Levels, Potential Sources and Co-occurrence* (Reyes-Gómez, Alarcón-Herrera, Gutiérrez, & Núñez López, 2013). Ellos concluyen que las características geoquímicas de las rocas, sedimentos y agua subterránea apoya la hipótesis de un origen geogénico de As y F<sup>-</sup> en el sistema del área de estudio. La zona de estudio comprendió tres acuíferos contiguos: el Tabalaopa-Aldama, Aldama-Dolores y Laguna de Hormigas. Los resultados resaltan la necesidad de ampliar los estudios con el fin de encontrar otra posible fuente de contaminación, especialmente de la proveniente de los desechos de mina, material derivado del viento y escorrentía, así como cambio de suelo.



### 1.2.1 Localización del área de estudio

La ciudad de Chihuahua se encuentra en la parte central del estado del mismo nombre. En ella convergen tres acuíferos, de los cuales se extrae agua para consumo humano: El Sauz-Encinillas, Chihuahua-Sacramento y Tabalaopa-Aldama.

El acuífero de El Sauz-Encinillas, identificado por la Comisión Nacional del Agua con la clave 0807, cubre una superficie de 2743 km<sup>2</sup> y se localiza en la porción central del estado de Chihuahua, entre los paralelos 28°53'31" a 29°39'41" de latitud norte y los meridianos 106°09'35" a 106°43'27" de longitud oeste. Geopolíticamente se ubica parcialmente en los municipios de Chihuahua y Namiquipa, y comprende pequeñas porciones de los municipios de Aldama y Buenaventura (CNA, 2018). El acuífero de Chihuahua-Sacramento, identificado con la clave 0830, cubre una superficie de 1889 km<sup>2</sup> y se localiza en la porción central del estado de Chihuahua. Geográficamente se encuentra ubicada entre los paralelos 28°26' y 28°56' de latitud Norte y entre los meridianos 105°58' y 106°32' de longitud oeste. Geopolíticamente comprende parcialmente los municipios de Chihuahua y Riva Palacio (CNA, 2018). El acuífero de Tabalaopa-Aldama, con la clave 0835, cubre una superficie de 728 km<sup>2</sup> y se localiza ente los paralelos 28°32'30" y 29°0'0" de latitud norte y los meridianos 106°10'0" y 105°52'0" de longitud oeste. Geopolíticamente abarca parcialmente los municipios de Aldama, Aquiles Serdán y Chihuahua (CNA, 2018). En la Figura 1: *a)* y *b)* se muestra la ubicación del área de estudio.



**Figura 1.** Zona de estudio. a) Ubicación de la zona de estudio en el estado de Chihuahua y contexto topográfico. b) Acercamiento al área de estudio.



## 1.2.2 Hidrografía y mineralogía

El municipio de Chihuahua, donde se llevó cabo la mayor parte de la extracción de muestras de agua subterránea (97%), cuenta con una extensión territorial de 9,219 km<sup>2</sup>, la cual representa el 3.73% de la superficie estatal.

Las provincias fisiográficas que se manifiestan en la región son las Sierras y llanuras del norte (62.7%) y Sierra Madre Occidental (37.3%). La ciudad de Chihuahua se asienta en un valle con pendientes de hasta el 5%, cuenta con barreras naturales al oriente (Sierra Nombre de Dios) y al poniente (Sierra El Mogote y Sierra Azul), considerándose zonas no urbanizables ya que cuentan con pendientes superiores al 20%. La subprovincia Del Bolsón de Mapimí (62.5%), sierras y llanuras del norte (24.6%), sierras y llanuras de Durango (12.8%) y sierras plegadas del norte (0.1%). Asimismo, el sistema de toposformas consiste en Bajada típica (30.5%), sierra alta con mesetas (29.1%), sierra escarpada (8.8%), llanura aluvial salina (5.6%), llanura aluvial (4.6%), valle de laderas tendidas con lomerío (4.3%), llanura aluvial de piso rocoso o cementado (4.3%), lomerío escarpado con llanuras (4.0%), lomerío con mesetas (1.6%), sierra plegada (1.5%), sierra alta con lomerío (1.3%), lomerío ramificado (1.3%), lomerío escarpado (1.2%), llanura aluvial inundable y salina (0.9%), lomerío típico (0.4%), meseta con cañadas (0.4%) y llanura aluvial con lomerío (0.2%) (INEGI, 2009).

En cuanto a la geología, en la región se encuentran formaciones principalmente del período Terciario (45.3%), Cuaternario (34.4%), Neógeno (12.1%), No aplicable (4.0%), Cretácico (0.9%) y Paleógeno (0.4%). El tipo de roca que se localiza es:

- ❖ Ígnea extrusiva: riolita-toba ácida (43.0%), basalto (4.8%), andesita (0.5%) y toba ácida (0.3%)
- ❖ Suelo: aluvial (28.6%)
- ❖ Sedimentaria: conglomerado (17.8%), caliza (0.8%), arenisca-conglomerado (0.8%), arenisca (0.2%) y caliza-lutita (0.1%)
- ❖ Ígnea intrusiva: monzonita (0.2%)

Debido a la riqueza mineral del estado de Chihuahua, éste es tradicionalmente minero desde la época de la Colonia, a partir de la cual se han venido explotando importantes yacimientos minerales que regionalmente se pueden enmarcar dentro de 12 regiones de acuerdo al tipo de



mineralización y a su ubicación. Así se distingue la región minera de Chihuahua, la cual incluye el municipio de Chihuahua, por su mineralización metálica de oro (Au), plata (Ag), plomo (Pb), zinc (Zn), cobre (Cu), hierro (Fe), bario (Ba), manganeso (Mn), molibdeno (Mo) y uranio (U), en yacimientos tipo veta, manto, chimenea, brecha, diseminado, stockwork o skarn. En cuanto a la mineralización no metálica y bancos de materiales, las sustancias que se encuentran en la región son el carbonato de calcio, calizas, perlita, arena sílica, toba alterada, arcillas, caliche, agregados pétreos y pumicita (SGM, 2018).

La región hidrológica en la que se encuentra la zona de estudio es en la de Cuencas Cerradas del Norte (54.5%) y Bravo Conchos (45.5%), asimismo comprende las cuencas de A. Carrizo y otros (52.8%), R. Conchos – P. El Granero (32.5%), R. San Pedro (13.0%), R. del Carmen (1.2%) y L. de Bustillos y de los Mexicanos (0.5%). Mientras que las principales subcuencas que incluye son la de L. Encinillas (30.2%), L. del Cuervo (21.0%), Sacramento (12.6%), R. Chuvíscar (9.4%), R. Santa Isabel (9.3%), A. Bachimba (6.8%), P. Chihuahua (3.7%), P. Francisco I. Madero (3.7%), L. del Diablo (1.4%), R. del Carmen (1.1%), L. Bustillos (0.5%), entre otros.

Las corrientes de agua que se encuentran en la zona son intermitentes: Arroyo Seco, Los Nogales, Chuvíscar, Guadalupe, El Sauz, El Álamo, Sacramento, La Campana, Barriga, Los Fresnos, El Coyote. De la misma forma incluye cuerpos de agua perennes: Encinillas, Chihuahua, El Rejón y Chuvíscar, así como cuerpos intermitentes: Laguna el Diablo y Laguna Palomas.



### 1.2.3 Hidrogeoquímica

La calidad del agua de cada acuífero se resume en la tabla 2 (CNA, 2018), (CNA, 2016). Los datos se obtuvieron de la sección Hidrogeología dentro de cada informe técnico. Los parámetros reportados en la zona de estudio fueron: nitratos ( $\text{NO}_3$ ), fluoruro ( $\text{F}^-$ ), hierro (Fe), arsénico (As), Dureza Total (DT), ya que entre los años 2016 a 2018 rebasaron los límites máximos permisibles (LMP) indicados por la Norma Oficial Mexicana para consumo humano (NOM-127-SSA1-1994, 2000). El LMP para As es  $25 \mu\text{g/L}$ , para nitratos es  $10 \text{ mg/L}$ , para sólidos disueltos totales (SDT)  $1000 \text{ mg/L}$  y F  $1.5 \text{ mg/L}$ . En general el agua es de tipo bicarbonatada cálcica o sódica.

*Tabla 2. Datos históricos de calidad de agua de acuerdo con la CNA*

<i>Acuífero</i>	<i>SDT (ppm)</i>	<i>Parámetros fuera de norma</i>
<i>0807 el Sauz-Encinillas</i>	2018: < 500	$\text{NO}_3$ , F, Fe, As
<i>0830 Chihuahua-Sacramento</i>	2018: < 500	F
<i>0835 Tabalaopa-Aldama</i>	2016: 660 - 760	F, As, DT, Fe

El muestreo estacional de agua, del 2004 al 2010, en el sistema acuífero aluvial de Chihuahua mostró que aquellos pozos con concentración de As por arriba de  $25 \mu\text{g/L}$  y  $\text{F}^-$  por arriba de  $1.5 \text{ mg/L}$  se agrupan en las parte sur y noreste del área de estudio, lo cual corresponde a zonas con mayor extracción de agua cercanas al pueblo de Aldama. El origen de esta contaminación puede deberse a escurrimientos del río Chuvíscar y Sacramento, a las actividades mineras o al aumento en la extracción del agua. La composición mineralógica de las rocas en el área de estudio se compone de: ortoclasa, cuarzo, vidrio volcánico, sanidina, tridimita, biotita, hematita, albita, calcita, caolinita, montmorillonita, hornblenda, fluorapatita y As en un rango entre 2.3 y  $514.2 \text{ mg/kg}$  (Reyes-Gómez, Alarcón-Herrera, Gutiérrez, & Núñez López, 2013).



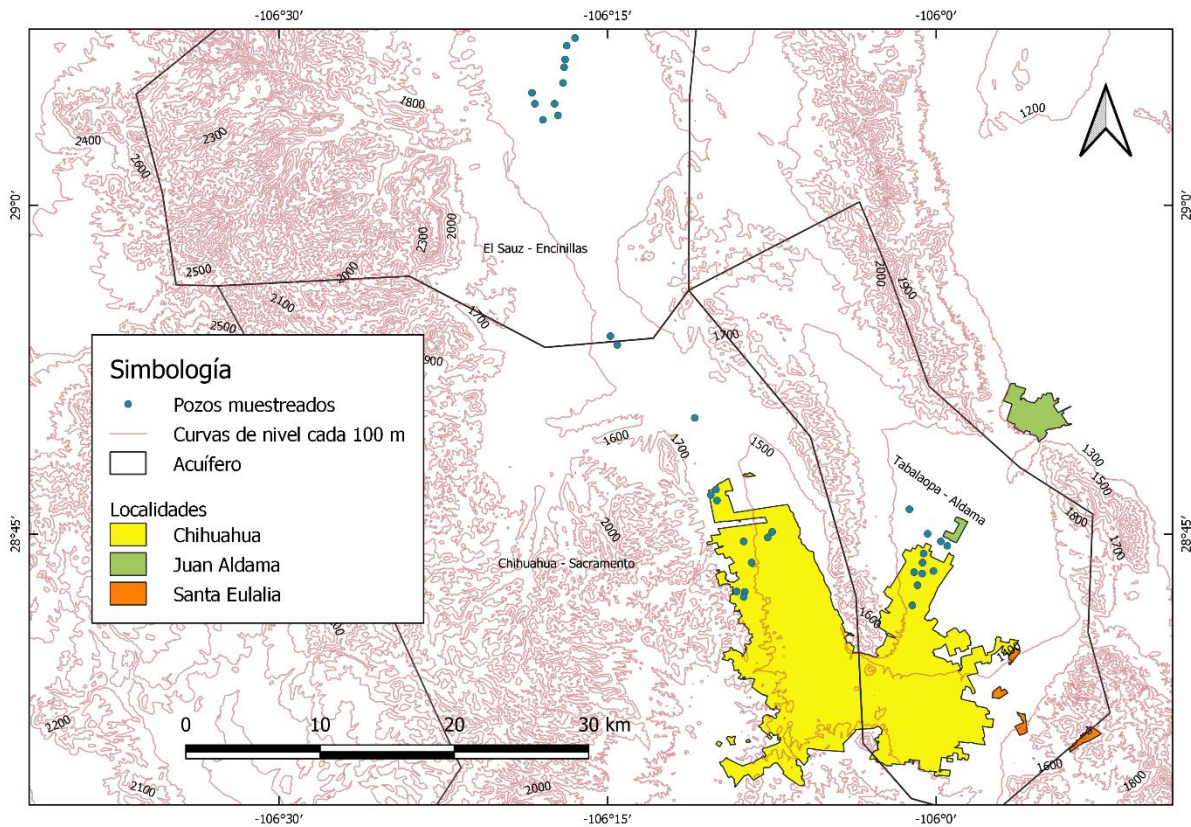
## 2. METODOLOGÍA

### 2.1 Trabajo de campo: muestreo de agua

Parte fundamental de la presente investigación fue el trabajo de campo realizado para corroborar la localización y muestrear los pozos seleccionados. La selección de los pozos muestreados se llevó a cabo tomando en cuenta los datos de las concentraciones de F y As, en diversos pozos, definidos en el estudio: *Evaluación de las fuentes actuales de abastecimiento a la ciudad de Chihuahua, estudio de factibilidad de fuentes alternas y anteproyecto de infraestructura hidráulica necesaria* (2013).

Con esta información disponible se formó una lista preliminar de 49 pozos que reportaron valores cercanos o que excedían el LMP. Estos pozos fueron visitados en diversos recorridos de campo, con el fin de evaluar las condiciones en las que se encontraba cada uno: si aún estaban activos, el acceso para tomar las muestras, así como las rutas de acceso para llegar a cada uno.

En total se muestrearon 34 pozos, repartidos entre los 3 acuíferos que abastecen a la ciudad de Chihuahua, en tres campañas de un día cada una. La primera campaña de muestreo se llevó a cabo el 19 de noviembre del 2019, se extrajeron muestras de agua de 11 pozos del acuífero Tabalaopa-Aldama. La segunda campaña de muestreo se realizó, el 2 de diciembre de 2019, en pozos del acuífero Chihuahua-Sacramento y se muestrearon 11 pozos. La tercera campaña se hizo el 15 de enero del 2020 y se muestrearon 12 pozos del acuífero Sauz-Encinillas. En la figura 2 se muestra la ubicación de los pozos en los tres acuíferos.



*Figura 2. Localización de las muestras en el área de estudio.*

Los materiales y el equipo usados para el muestreo de agua fue el siguiente:

- ❖ Contenedores de plástico con capacidad de 1 L y 50 ml
- ❖ Etiquetas de identificación adhesivas
- ❖ GPS
- ❖ Sonda multiparamétrica Hanna Instruments HI-9828 Multi-Parameter Water Quality Portable Meter
- ❖ Sonda multiparamétrica Hanna Instruments HI-9146 Portable Waterproof Microprocessor Dissolved Oxygen Meter
- ❖ Filtros de 45 micras y porta filtros
- ❖ Jeringa
- ❖ Ácido nítrico
- ❖ Manguera para jardín
- ❖ Celda de aislamiento para simular las condiciones del acuífero

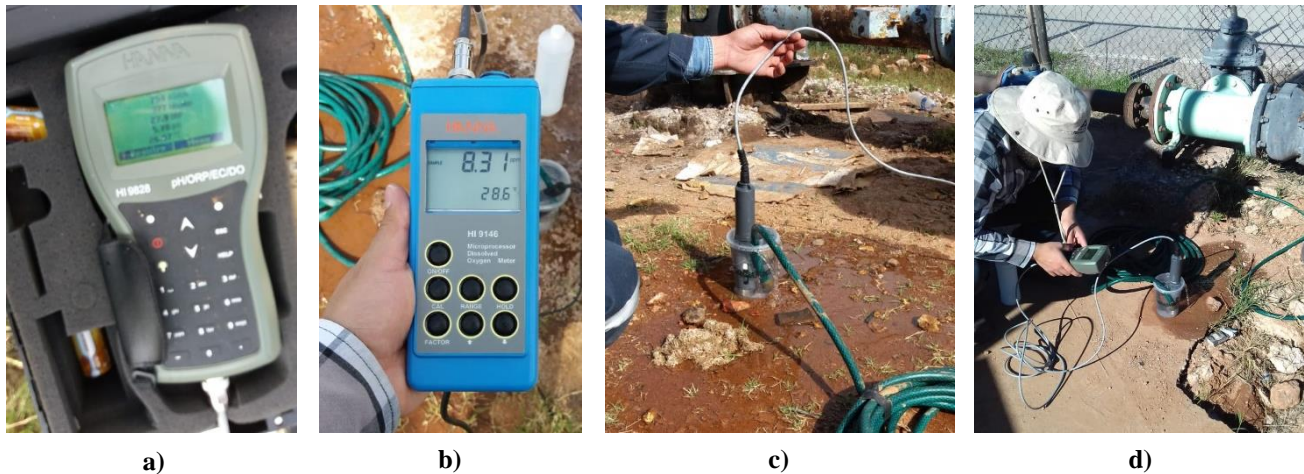




## ❖ Hielera y hielo

Para realizar el muestreo de agua se siguieron los siguientes pasos:

- 1) Se obtuvo autorización por parte de la Junta Municipal de Agua y Saneamiento para acceder con el fin de obtener las muestras de agua de los pozos.
- 2) Se verificó que estuvieran activos los pozos a muestrear.
- 3) En cada instalación donde se encontraba cada pozo se conectó la manguera para jardín y se conectó a la celda de aislamiento, con el agua corriendo para simular el comportamiento del acuífero.
- 4) Se dejó correr el agua por 1 minuto y se procedió a medir, con la sonda multiparamétrica HI-9828 los parámetros de campo: temperatura, Eh, pH, conductividad eléctrica (CE) y sólidos disueltos totales (SDT).
- 5) Después, con la sonda HI-9146 se midió el oxígeno disuelto. Los datos se registraron en una bitácora.
- 6) Se llenó el contenedor de 1 L y, por medio de una membrana de  $0.45 \mu\text{m}$ , el de 50 ml para cada pozo. Al llenar el contenedor de 50 ml, de cada pozo, se le añadieron 4 gotas de ácido nítrico.



**Figura 3.** Muestreo en campo. a) y b): Sondas multiparamétricas HI-9828 y HI-9146, respectivamente. c) Celda de aislamiento durante la medición de los parámetros con la sonda HI-9828. d) Muestreo en campo de uno de los pozos.



### 2.1.1 Análisis de alcalinidad

La alcalinidad es una medida de la capacidad del agua para neutralizar ácidos, no tiene efectos nocivos en los seres humanos sea alta o baja. Ésta presenta un efecto importante en cuanto a cultivo s se refiere, pues interviene en la disponibilidad de algunos nutrientes necesarios para las plantas. La alcalinidad del agua también es conocida como capacidad buffer (o de amortiguamiento) del agua. Algunos ejemplos de bases que contribuyen a la alcalinidad en una solución son los carbonatos, bicarbonatos, amonios, boratos, fosfatos y silicatos. En la práctica, los mayores contribuidores de la alcalinidad de al agua son carbonatos y bicarbonatos.

La alcalinidad de las muestras se midió por titulación volumétrica, con ácido sulfúrico, en el laboratorio de Sanitaria de la UACH. La determinación de la alcalinidad, por medio de titulación volumétrica, se llevó a cabo un día después de cada muestreo.

Material y equipo usado para medir alcalinidad:

- ❖ Ácido sulfúrico (0.02 N)
- ❖ Naranja de metilo
- ❖ Matraz de Erlenmeyer
- ❖ Agitador magnético (Magnetic Stirrer HI 190M Hanna)
- ❖ Probeta graduada
- ❖ Pipeta graduada

#### **Titulación volumétrica para determinar la alcalinidad de las muestras:**

Se transfirieron 50 ml de muestra en un matraz Erlenmeyer. Se adicionaron 3 gotas de naranja de metilo y se introdujo la barra magnética. Se inició la agitación y se tituló con ácido sulfúrico (con 0.02 N) hasta el cambio de color de naranja a rosa. Finalmente se calculó la alcalinidad con la siguiente fórmula:

$$\text{Alc. total en } \frac{\text{mg}}{\text{l}} \text{ de } \text{CaCO}_3 = \frac{A \times N \times (50_1) \times (1000)}{50_2}$$

donde:

$A$  es el volumen total gastado de ácido sulfúrico en la titulación hasta el cambio de color, en ml;

$N$  es la normalidad de la disolución del ácido sulfúrico (0.02);



- $50_1$  es el factor para convertir eq/l a mg  $\text{CaCO}_3$ /l;
- $1000$  es el factor para convertir ml a l;
- $50_2$  es la cantidad de volumen de muestra (50 ml en el matraz) en ml.

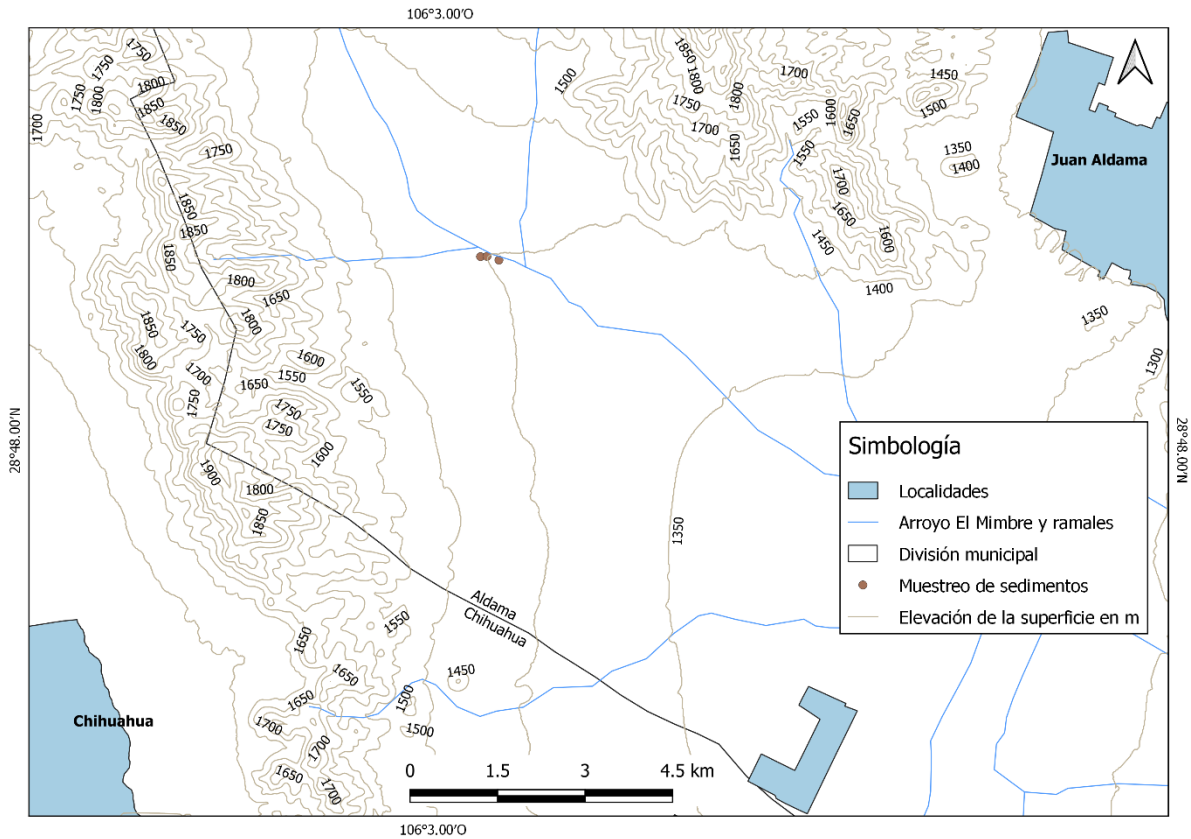
## 2.2 Trabajo de campo: muestreo de sedimentos

Se llevó a cabo un muestreo de sedimentos en arroyo El Mimbres, localizado en el municipio de Aldama entre la Sierra de Nombre de Dios y la de El Cuervo, cerca del municipio de Chihuahua, con el fin de evaluar una posible relación del contenido metálico del sedimento y su asociación con el entorno.

Una vez tomadas las muestras se enviaron al laboratorio de Metalurgia de la Facultad de Ingeniería de la UACH para su análisis por contenido metálico. Se eligieron 3 puntos de muestreo, como se muestran en la figura 4, debido a lo accidentado y al difícil acceso en vehículo al área.

Materiales y equipo para muestrear sedimento:

- ❖ Bolsas resellables para guardar las muestras
- ❖ GPS
- ❖ Libreta de apuntes
- ❖ Etiquetas de identificación adhesivas



*Figura 4. Ubicación de los sitios de muestreo en el arroyo El Mimbres.*

## 2.3 Análisis químicos de las muestras

### 2.3.1 Análisis en el laboratorio de Sanitaria de la UACH.

En el Laboratorio de Sanitaria de la UACH se analizaron las muestras para los siguientes parámetros:

- ❖ Potencial de Hidrógeno
- ❖ Alcalinidad Total
- ❖ Conductividad Eléctrica
- ❖ Bicarbonatos
- ❖ Flúor mg/l
- ❖ Calcio mg/l



- ❖ Magnesio mg/l
- ❖ Sodio mg/l
- ❖ Potasio mg/l
- ❖ Cloruros mg/l
- ❖ Sulfatos mg/l

Para los análisis de agua, el laboratorio de Sanitaria se basó en las Normas Mexicanas; para el pH la NMX-AA-008-SCFI-2016, para la alcalinidad total se basó en la NMX-AA-036-SCFI-2001, para la determinación de la CE se basó en la NMX-AA-093-SCFI-2000, para la determinación de fluoruros se basó en la norma NMX-AA-077-SCFI-2001, para analizar cloruros se fundamentó en la NMX-AA-073-SCFI-2001, para la medición de metales se realizó por absorción atómica basado en la NMX-AA-051-SCFI-2016 (sodio, calcio, potasio, magnesio) y, finalmente, para la medición de sulfatos se basó en la NMX-AA-074-SCFI-2014.

### **2.3.2 Análisis en el laboratorio de Análisis Químicos del Instituto de Geología de la UASLP**

#### **Análisis de fluoruros:**

Con el fin de complementar los datos obtenidos del laboratorio de Sanitaria de la UACH, se contó con el apoyo del laboratorio de Análisis Químicos de Agua y Suelo de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP) para analizar el contenido de fluoruro en las muestras de agua colectadas en Chihuahua. Para tal fin se usó el espectrofotómetro marca HACH DR/2000 y se siguió la metodología establecida en el manual de procedimiento del equipo para fluoruro: *DR 2000 Spectrophotometer Procedures Manual, A-F (method 8029 for fluoride 0 to 2.00 mg/L F<sup>-</sup> using SPADNS reagent solution)*.

Una vez que se obtuvieron los resultados por este método se vio la necesidad de realizar una prueba de calibración para comprobar la exactitud del método. Se encontró que el método arrojaba errores muy grandes en las mediciones, por lo tanto, los resultados se toman con mucha



reserva debido al error del aparato, esto quiere decir que los resultados de los análisis por medio de este aparato se toman con reserva.

#### **Análisis de nitratos:**

Se midió la cantidad de nitratos presentes en las muestras usando el espectrofotómetro HACH DR/2000 y se siguió la metodología establecida en el manual de procedimiento del equipo para nitrato: *DR 2000 Spectrophotometer Procedures Manual, H-N (method 8039 for Nitrate, HR 0 to 30.0 mg/L NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N using powder pillows).*

#### **Análisis de las muestras para medir elementos traza por medio del ICP-MS:**

La concentración de elementos traza de las muestras colectadas se determinó por espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS: Inductively coupled plasma mass spectrometry), en el Laboratorio de Geoquímica de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí en un sistema cuadrupolo Thermo X series II. Para preparar las muestras les fue añadido ácido nítrico previamente al extraer el agua de los pozos, ya descrito anteriormente en muestreo de agua de los pozos seleccionados. El método de medición y la preparación instrumental fueron llevados a cabo por personal del laboratorio.

#### **Análisis de las muestras para medir elementos traza por medio de ICP-OES:**

El análisis para elementos traza de las muestras se complementó con la espectrometría de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (ICP-OES: Inductively coupled plasma-optical emission spectrometry), en el Laboratorio de Geoquímica de la UASLP. El equipo de análisis es una Thermo Scientific iCap 7400 series Duo. También se utilizó un auto muestreador (*AutoSampler ASX-520*).

### **2.3.3 Análisis los sedimentos en el laboratorio de Metalurgia de la UACH**

Las muestras de sedimentos colectadas, en el arroyo El Mimbre, se analizaron en el laboratorio de Metalurgia de la UACH, a cargo de la Ing. Yoletzy Molina González por medio de digestión por agua regia, la cual consiste en realizar una digestión por ebullición con una parte de ácido nítrico por tres partes de ácido clorhídrico.



El análisis estadístico de la información de calidad del agua y la correlación Pearson se realizó con el programa Excel. La modelación hidrogeoquímica para la remoción de As y F del agua subterránea y la representación gráfica mediante diagramas de Duro, Schoeller, Eh-pH y XY se realizó en el programa Geochemist's Workbench (GWB) 11.0. La remoción de As se basa en la reacción del agua con óxidos de hierro y la remoción de F mediante mezclas de agua de pozos con valores altos y bajos. La descripción del área de estudio y pozos, con valores altos de As y F, se realizó con el programa QGIS 3.8.2.



### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 Descripción estadística de la química del agua subterránea

Solo los elementos arsénico y fluoruros rebasan el límite permitido por la NOM-127-SSA1-1994. La zona más afectada es El Sauz. Más del 80% de las muestras tuvieron valores altos de fluoruros en el agua subterránea de los 3 acuíferos. Los resultados se muestran en la tabla 3. Destacan los fluoruros, pH y arsénico por el porcentaje de muestras fuera de limite.

*Tabla 3. Resultados del análisis de las muestras de agua. Los minerales que pueden estar presentes son los arseniatos y la fluorita.*

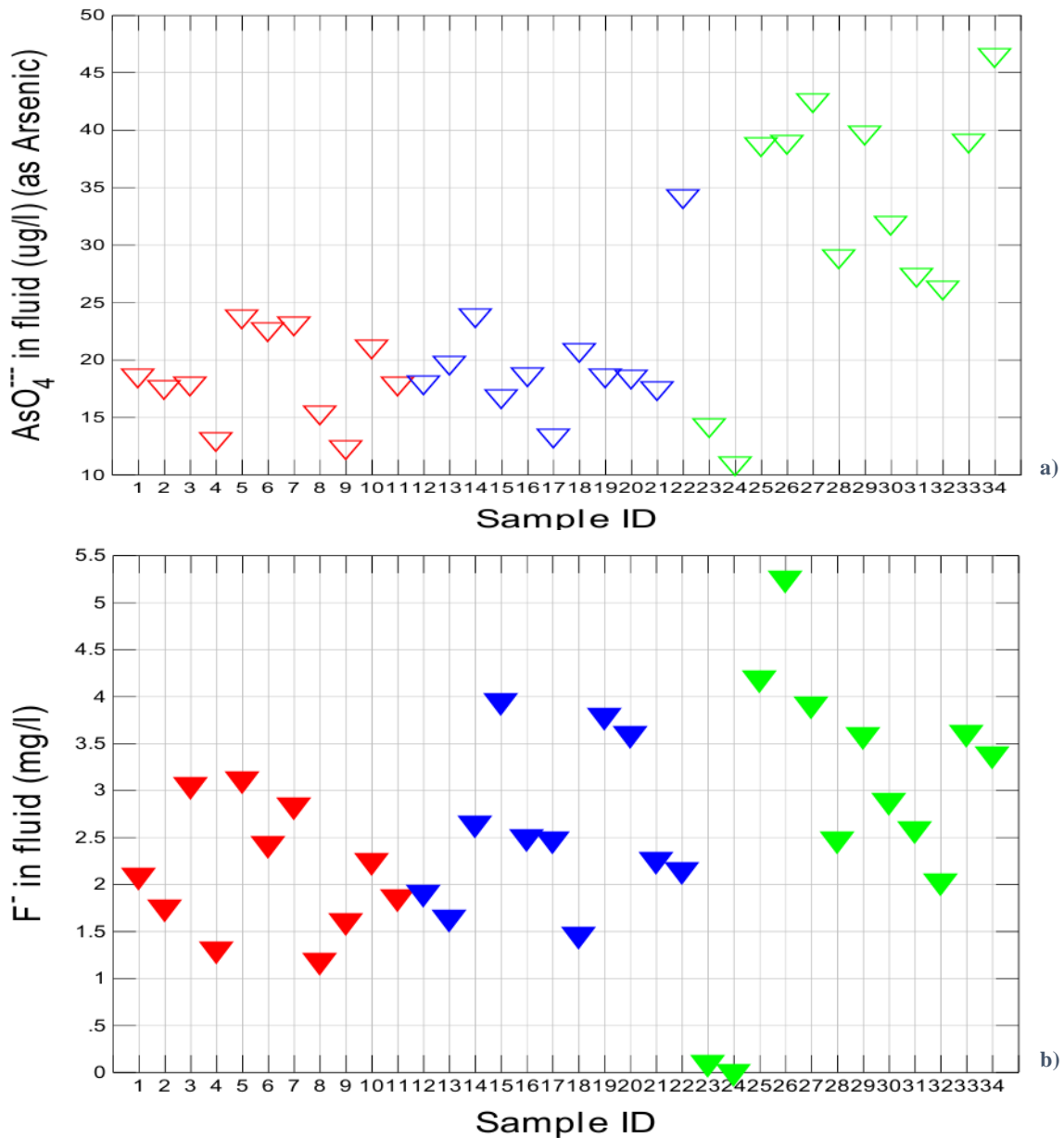
<i>Parámetro</i>	<i>n=34</i>	<i>Rango</i>	<i>Media ± DS</i>	<i>Estándar NOM</i>	<i>No. muestras arriba del límite NOM</i>	<i>% de muestras arriba límite</i>
<i>Aluminio µg/L</i>		< 0.1 - 4.8	4.8 ± 0	200	0	0
<i>Arsénico µg/L</i>		10.86 - 45.89	23.55 ± 9.42	25	11	32.35
<i>Bario µg/L</i>		1.61 - 53.38	13.9 ± 12.36	700	0	0
<i>Cadmio mg/L</i>		< 0.1 - < 0.1	0 ± 0	0.005	0	0
<i>Cobre mg/L</i>		< 0.1 - < 0.1	0 ± 0	2	0	0
<i>Cromo µg/L</i>		0.03 - 3.41	1.01 ± 1.15	50	0	0
<i>Dureza CaCO<sub>3</sub></i>		21.37 - 199.36	94.1 ± 37.84	500	0	0
<i>Fierro mg/L</i>		< 0.1 - < 0.1	0 ± 0	0.3	0	0
<i>Fluoruros mg/L</i>		0 - 5.22	2.50 ± 1.09	1.5	29	85.29
<i>Manganeso mg/L</i>		< 0.1 - < 0.1	0 ± 0	0.15	0	0
<i>Mercurio µg/L</i>		0.01 - 0.33	0.14 ± 0.1	1	0	0
<i>Nitrato (N) mg/L</i>		0.6 - 8.2	2.46 ± 1.87	10	0	0
<i>pH</i>		5.57 - 7.46	6.57 ± 0.55	6.5 - 8.5	13	38.24
<i>Plomo mg/L</i>		< 0.1 - < 0.1	0 ± 0	0.025	0	0
<i>Sodio mg/L</i>		29.11 - 84.34	51.04 ± 12.2	200	0	0
<i>Sulfatos mg/L</i>		2.81 - 97.54	57.79 - 18.59	400	0	0



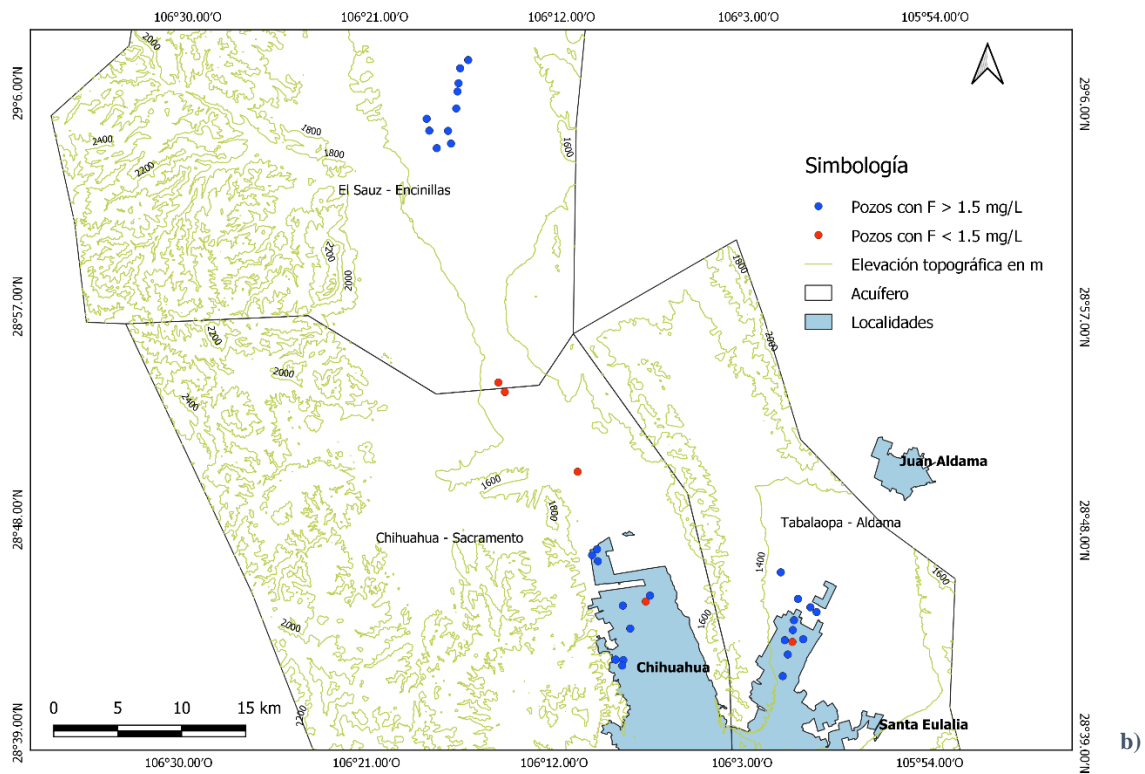
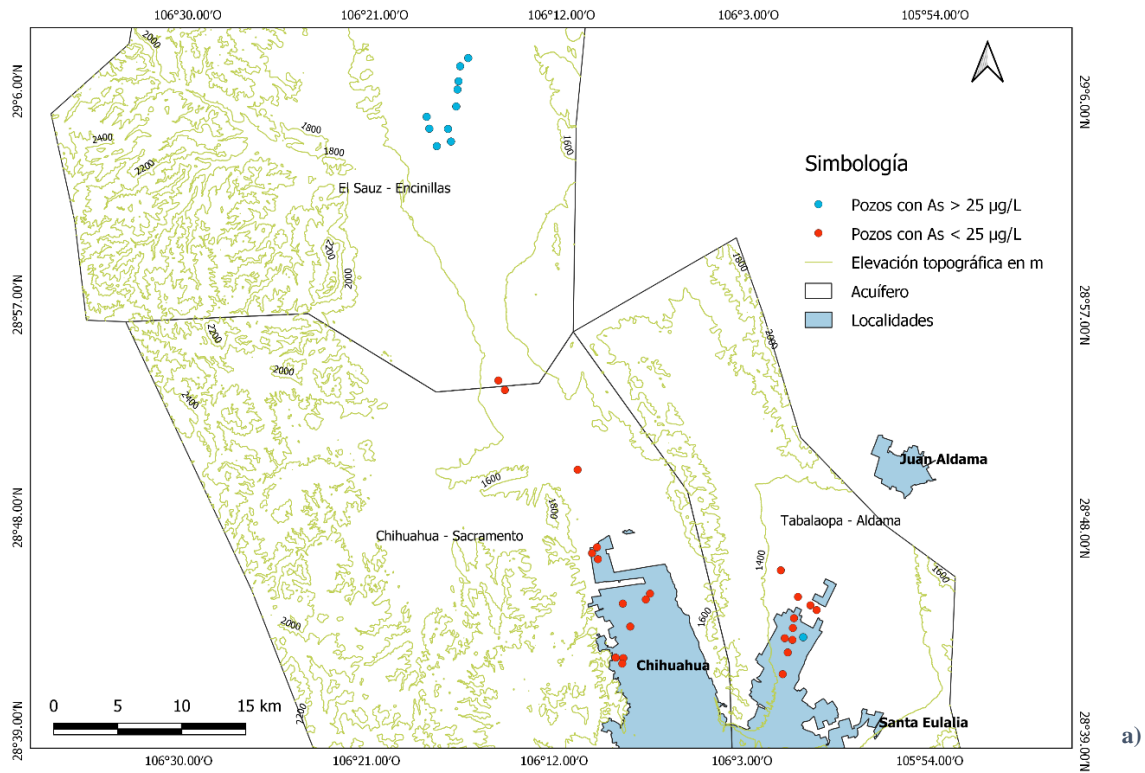


### 3.2 Caracterización del agua por As y F

Las muestras de agua de El Sauz (verde) rebasan el límite permisible de 25  $\mu\text{g/L}$  establecido por la norma: **ROJO CHIHUAHUA-SACRAMENTO**, **AZUL ALDAMA**, **VERDE EL SAUZ**. (Fig. 5a y 5b). La gran mayoría, más del 80%, rebasaron el límite de fluoruros (1.5 mg/L). Los resultados de As y F en el agua subterránea son comparables a los obtenidos por Mahlkecht et al. (2008) y Reyes-Gómez et al. (2013).



**Figura 5.** Gráficas con las concentraciones de As y F de los tres acuíferos. a) Gráfica con las concentraciones de As. b) Gráfica con las concentraciones de F.

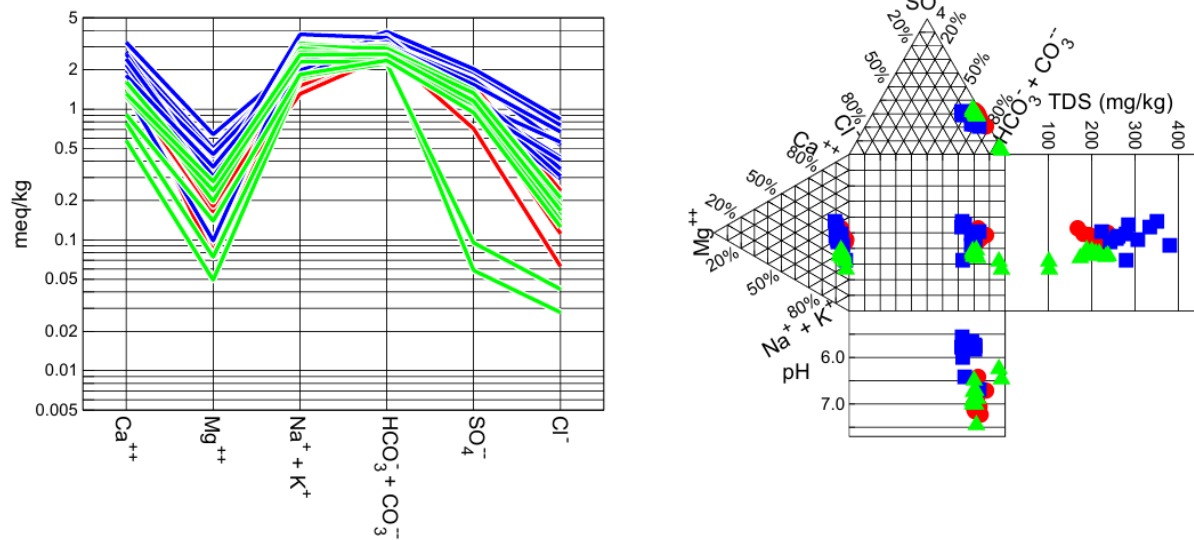


**Figura 6.** Ubicación de los pozos con concentraciones altas de As y F. a) Ubicación de los pozos con As mayor y menor de 25 µg/L. b) Ubicación de los pozos con F mayor y menor de 25 µg/L.



### 3.3 Tipos de agua

El tipo de agua es bicarbonatada sódica-cálcica. Los valores SDT o TDS (Total dissolved solids, por sus siglas en inglés) son bajos para El Sauz y están asociados a zonas de recarga y los valores de SDT altos corresponden a las muestras de Tabalaopa-Aldama asociados a las zonas bajas o de descarga figura 7. En color rojo se representan los de Chihuahua-Sacramento, en azul los de Tabalaopa-Aldama y en verde el Sauz-Encinillas. En Tabalaopa-Aldama se registraron 10 muestras, de un total de 13 que presentan la misma condición, con valores de pH por debajo de 6.5 por lo que podría estar asociado a actividades humanas por su cercanía con zonas agrícolas o mineras como Santa Eulalia.



**Figura 7.** Diagramas de Schöeller y Durov. a) Diagrama de Schöeller. b) Diagrama de Durov



### 3.4 Parámetros fisicoquímicos y otros elementos traza

La máxima temperatura registrada fue mayor a 30 °C por lo es posible que haya agua termal subterránea. El ambiente es oxidante con valores de Eh positivos. La profundidad de los pozos varía entre 144 y 380 m. Los elementos químicos que mostraron los valores de concentración más altos fueron el estroncio, boro y litio a nivel de trazas (Tabla 4). Otros elementos detectados en el agua son el Bario (Ba) y el uranio (U) posiblemente debido a la disolución de minerales.

*Tabla 4. Parámetros físicos y elementos traza en las muestras de agua subterránea. Los posibles minerales asociados con la calidad del agua son vanadita (V), celestita (Sr), barita (Ba) y uraninita (U).*

n=34

Parámetro	Rango	Media $\pm$ DS
Temperatura (°C)	20.15 - 35.1	27.78 $\pm$ 3.43
Eh (mV)	195.8 - 232.8	214.66 $\pm$ 10.50
SDT (ppm)	101 - 380	229.35 $\pm$ 58.24
C.E. ( $\mu$ S/cm)	196 -760	458.85 $\pm$ 116.9
OD (ppm)	0.05 - 9.44	5.04 $\pm$ 3.79
Profundidad (m)	144 - 380	263.64 $\pm$ 53.02
Litio ( $\mu$ g/L)	12.96 - 150	99.66 $\pm$ 32.19
Boro ( $\mu$ g/L)	31.98 - 233.3	146.36 $\pm$ 44.06
Escandio ( $\mu$ g/L)	1.15 - 4.25	3.02 $\pm$ 0.71
Titanio ( $\mu$ g/L)	0.82 - 2.49	1.77 $\pm$ 0.41
Vanadio ( $\mu$ g/L)	1.49 - 14.6	5.33 $\pm$ 2.69
Selenio ( $\mu$ g/L)	0.25 - 3.69	1.45 $\pm$ 0.89
Bromo ( $\mu$ g/L)	11.01 - 218.5	70.95 $\pm$ 49.01
Rubidio ( $\mu$ g/L)	0.014 - 21.65	12.64 $\pm$ 4.4
Estroncio ( $\mu$ g/L)	110.85 - 1357	453.16 $\pm$ 243
Yoduro ( $\mu$ g/L)	7.28 - 24.88	12.98 $\pm$ 4.89
Cesio ( $\mu$ g/L)	3.17 - 25.62	10.56 $\pm$ 5.91
Bario ( $\mu$ g/L)	1.61 - 53.38	13.96 $\pm$ 12.36
Uranio ( $\mu$ g/L)	2.75 - 12.21	5.56 $\pm$ 1.91
Silicio (mg/L)	5.93 - 33.37	21.85 $\pm$ 5.78
Arsénico ( $\mu$ g/L)	10.86 - 45.89	23.55 $\pm$ 9.42
Fluoruro (mg/L)	0 - 5.22	2.50 $\pm$ 1.09



### 3.5 Análisis de correlación

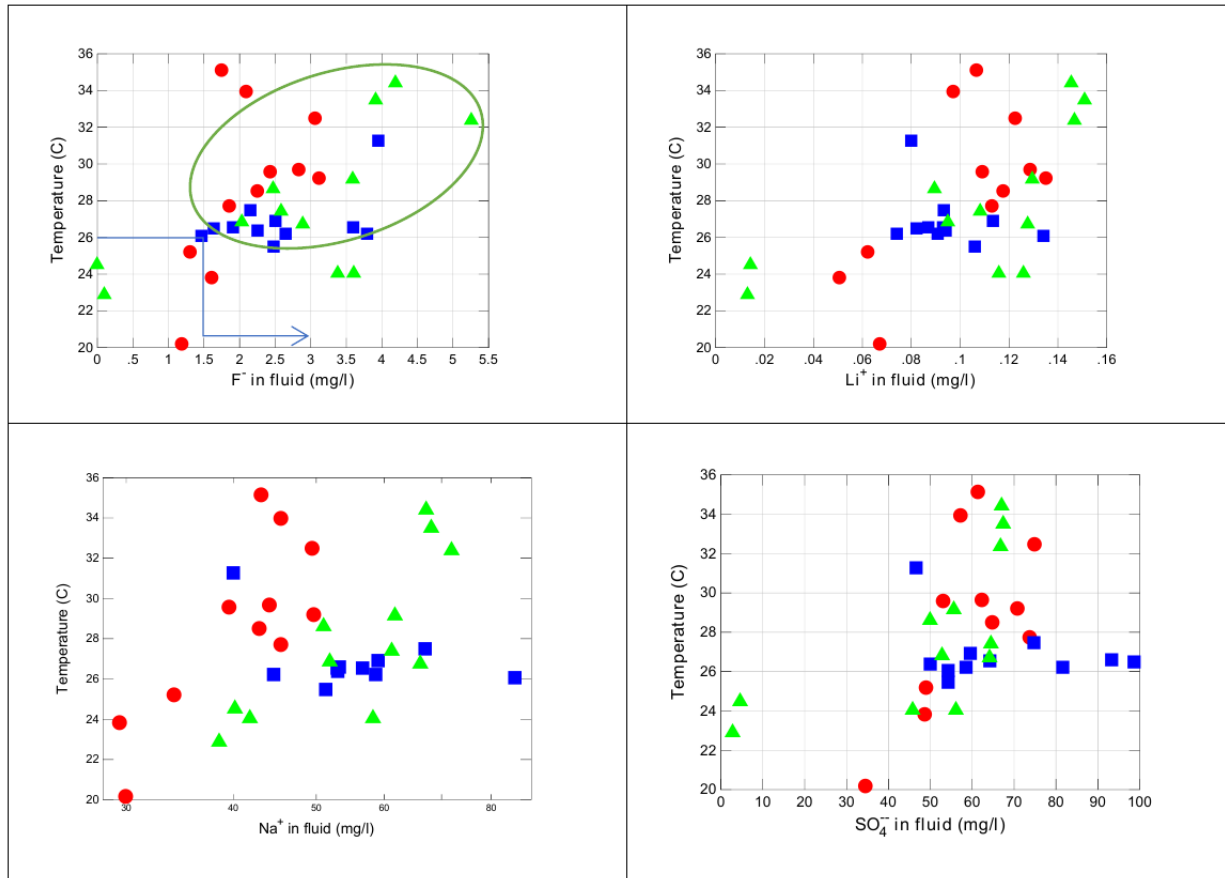
En la tabla 5 se muestra la relación directa del F con Li y As. La única relación inversa del As y se obtuvo con la concentración de oxígeno disuelto. La concentración de F y Li depende de la temperatura del agua. La liberación de As y F de la roca al agua puede deberse al intemperismo de los sulfuros en ambientes oxidantes, de ahí la relación de ambos elementos con los sulfatos. También puede deberse a la disolución de feldespatos de K a pH alcalinos de la relación del F y As con el pH y el K.

*Tabla 5. Coeficientes de correlación de Pearson entre parámetros físico-químicos.*

X	Y	$\rho_{xy}$
F	Li	0.73
As	F	0.65
As	Disolved Oxygen	-0.67
Temperature	Li	0.56
Temperature	F	0.5
F	SO <sub>4</sub>	0.43
F	K	0.34
As	pH	0.27
As	SO <sub>4</sub>	0.24

### 3.6 Relación de la temperatura con otros parámetros de calidad de agua

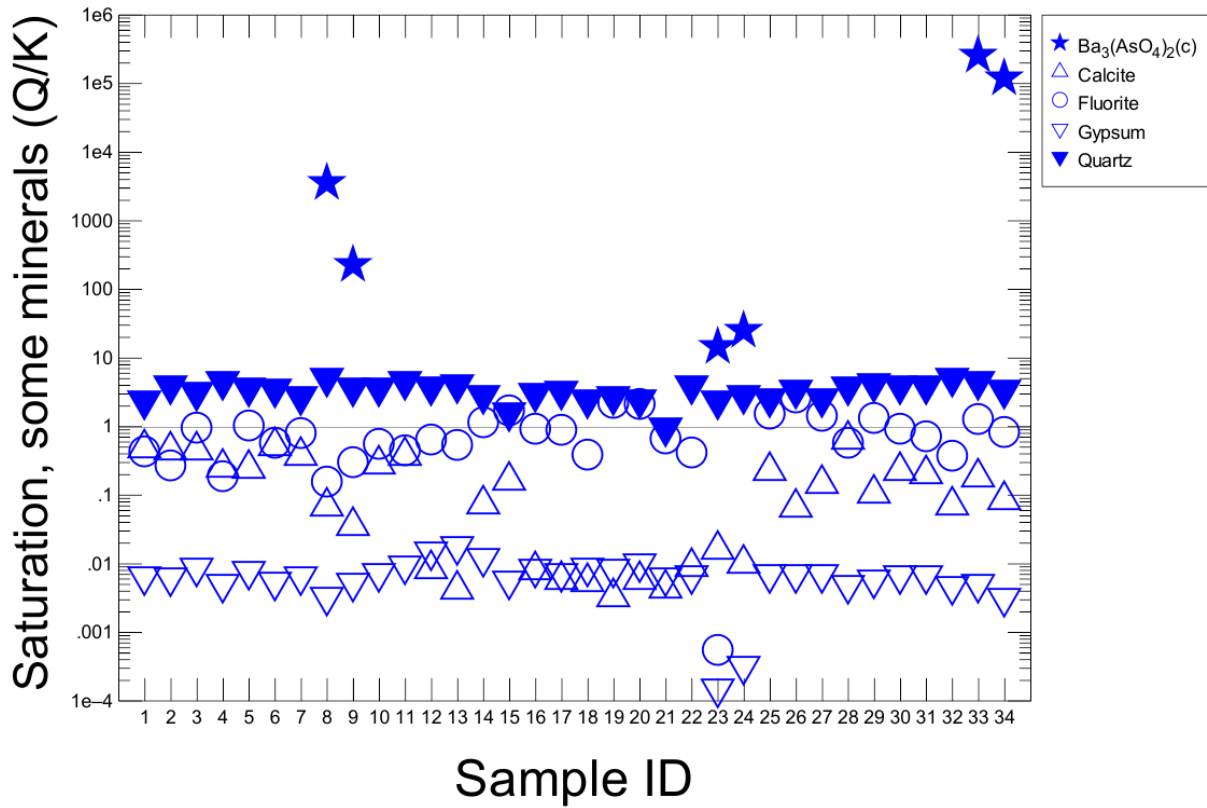
La temperatura del agua es el factor que controla las concentraciones de iones F, Li, Na y SO<sub>4</sub>, este comportamiento es más claro en los acuíferos El Sauz (verde) y Chihuahua-Sacramento (rojo) que en Aldama (azul) como se observa en la figura 8. Se presume que el agua de los dos primeros pudiera provenir de flujos regionales o intermedios con mayor tiempo de interacción roca-agua. Las aguas termales contienen las concentraciones más altas de iones y elementos traza, lo que indica que la alta temperatura favorece la hidrólisis de las matrices sólidas del acuífero, modificando la estructura vítrea y facilitando la movilidad de As y F en las aguas subterráneas (Bianchini, et al., 2020).



*Figura 8. Relación de la temperatura con otros parámetros.*

### 3.7 Índices de saturación mineral

La fluorita tiene un IS, primordialmente,  $\leq 0$  lo cual indica que el agua puede estar en equilibrio con ella ( $IS \approx 0$ ) o la puede estar disolviendo ( $IS < 0$ ), lo que favorece su movilización como se muestra en la figura 9. El agua subterránea disuelve más la calcita que el yeso, ya que hay más zonas de calizas que de yesos en la geología de la ciudad como lo indican los reportes técnicos de (CNA, 2018), (CNA, 2016).



**Figura 9.** Índice de saturación mineral de cada muestra de agua subterránea.

La saturación mineral de la calcita y la fluorita dependen en forma directa de la temperatura y la concentración del litio, los cuales a su vez dependen de las características del sistema de flujo de agua subterránea, de la mezcla entre los flujos locales, regionales e intermedios (Figura 10).

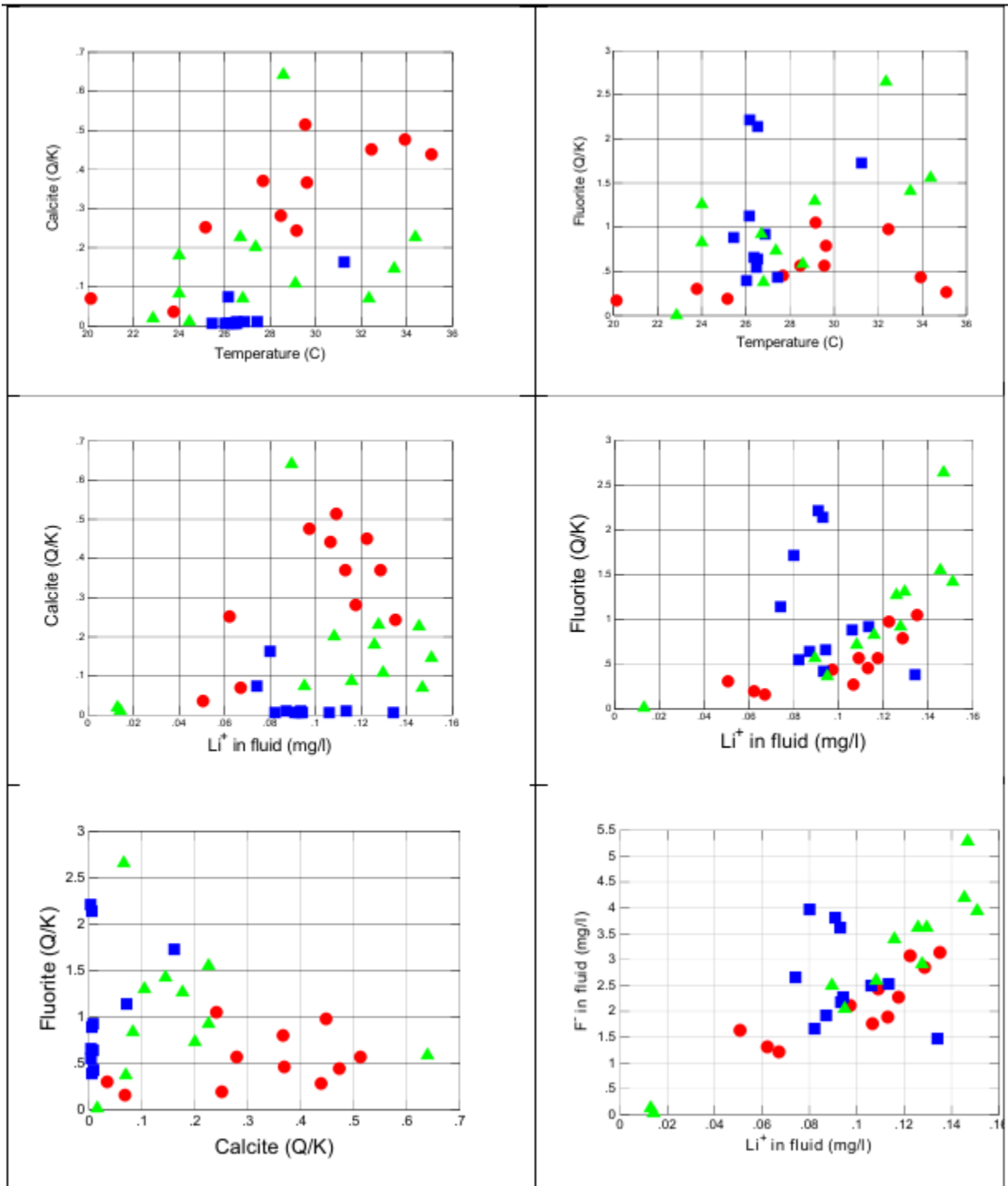


Figura 10. Saturación mineral vs parámetros químicos



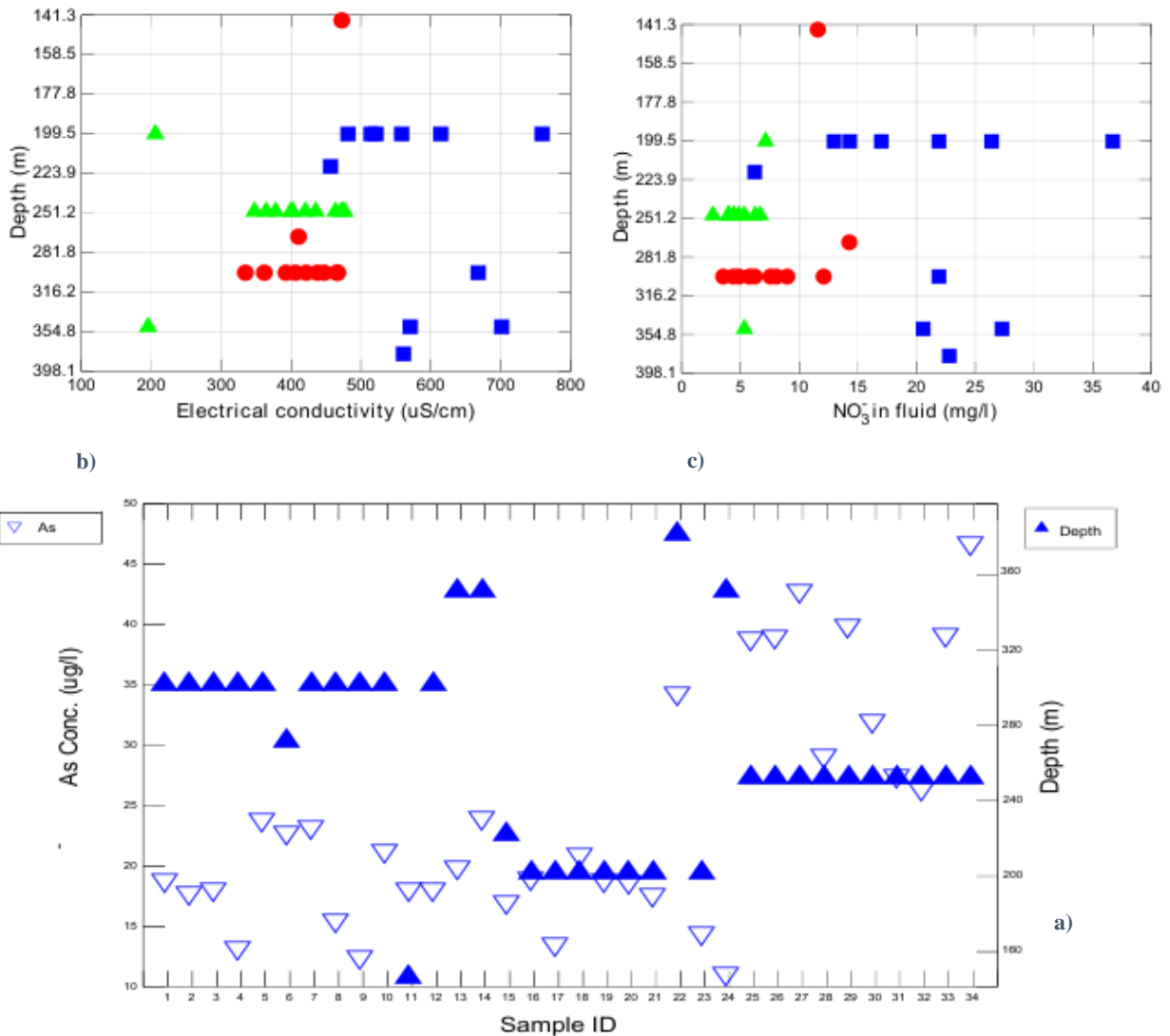


La relación directa de As y Li en agua subterránea confirma que el origen del As es geogénico. La presencia de As en aguas geotermales puede degradar la calidad del agua potable de un río o un lago. El As se lixivia de las rocas por intemperismo, con otros elementos como F, Li, B, Se, lo que indica que el agua termal se mezcla con el agua subterránea o superficial (López et al. 2012).

### **3.8 Influencia de la profundidad**

En zonas específicas de los acuíferos se producen los procesos de disolución y precipitación mineral, los cuales se reflejan en las concentraciones de conductividad eléctrica. En las gráficas de la figura 11 se muestran que los pozos más profundos son Chihuahua-Sacramento (rojo) y El Sauz-Encinillas (verde) y el menos profundo es Tabalaopa-Aldama (azul). Los valores más altos de nitratos se encontraron en Tabalaopa-Aldama, esto puede deberse por ser la zona agrícola más importante de la ciudad y la que está topográficamente más abajo por lo que representa la zona de mayor acumulación de sales disueltas (Figura 11 a). La concentración de arsénico varía inversamente con la profundidad de los pozos (Yadav, Devi, & Singh, 2015). Los pozos con una profundidad de 250 m presentaron concentraciones elevadas de As ( $\geq 25 \mu\text{g/L}$ ) en contraste a los de 300 m que tuvieron concentraciones menores ( $< 25 \mu\text{g/L}$ ). Es importante señalar que los pozos de 250 m de profundidad, y que presentan los valores más altos de As, se encuentran en la zona del acuífero Sauz-Encinillas.

Una topografía superficial plana genera un gradiente hidráulico bajo y, consecuentemente, un flujo de agua subterránea lento, lo que permite un aumento gradual de las concentraciones de arsénico en el agua subterránea. Aumenta la concentración de arsénico del agua en un ambiente evaporativo o cuando el pH del suelo es alto porque se facilita su desorción (Podgorski, et al., 2017).



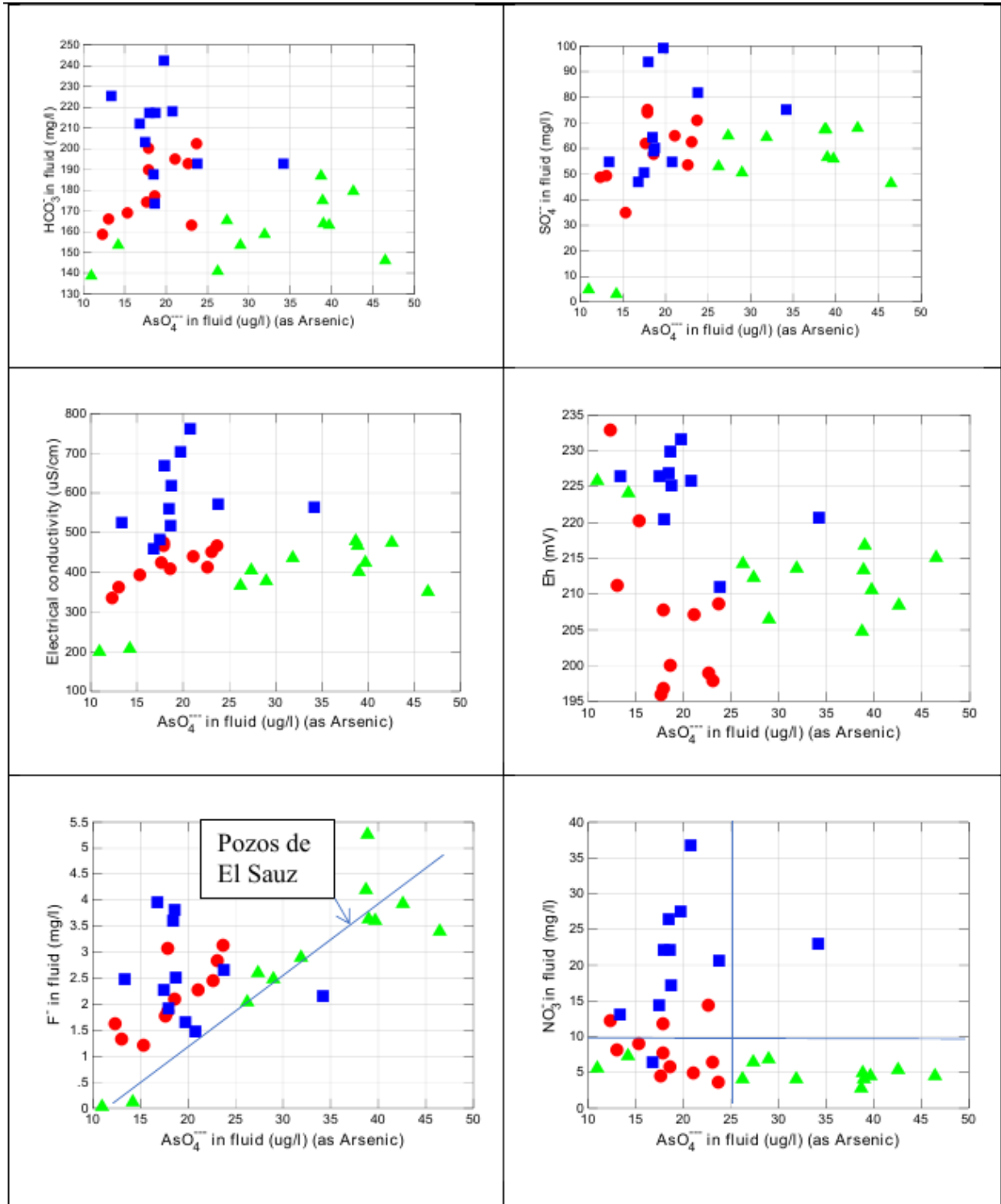
**Figura 11.** Influencia de la profundidad sobre As, CE y nitratos. a) Profundidad del pozo y su concentración de As, el primer sector, de izquierda a derecha, pertenece al T-A, el que le sigue a CH-S y el último a S-E. b) Gráfica de profundidad vs CE. c) Gráfica de profundidad vs nitratos.

### 3.9 Movilización del arsénico y fluoruros en el agua subterránea

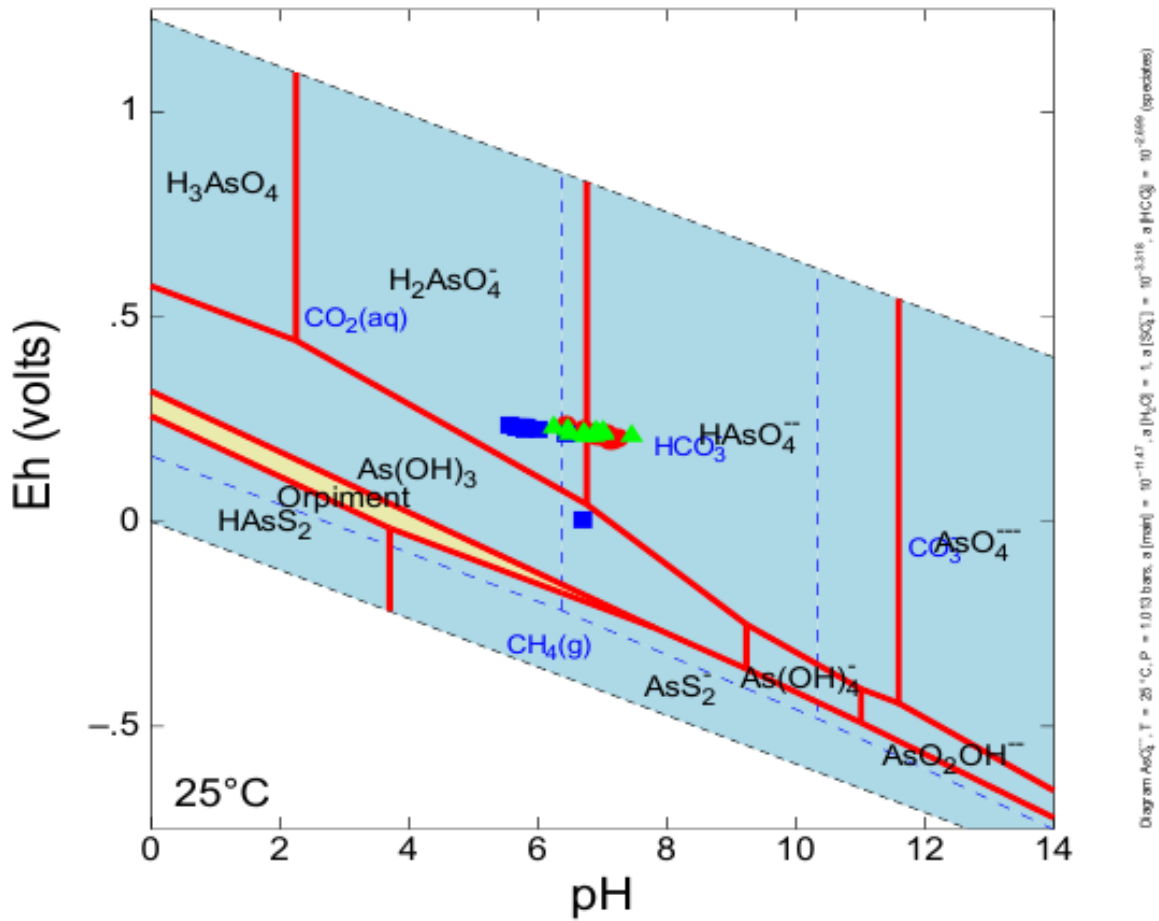
El arsénico del agua subterránea está bajo condiciones de pH alcalino en ambientes oxidantes, donde se observan especies ricas en oxígeno como HCO<sub>3</sub>, SO<sub>4</sub> y Eh positivo. Existe, en los pozos de El Sauz, una clara relación entre el arsénico y fluoruros, esto puede deberse a la disolución de minerales de F y As en esta zona. En El Sauz (verde) el origen del As es geológico (As > 25), en cambio en Aldama (azul) los nitratos son de origen antropogénico (NO<sub>3</sub> > 10 mg/L).



La movilidad del arsénico y fluoruros depende de las especies iónicas estables que son solubles en el agua. La solubilidad depende de las condiciones de oxidación y la acidez del agua como se demuestra en los diagramas Eh-pH (Figura 13 y 14). Las concentraciones más altas de As en el agua subterránea se encuentran en: 1) arenas limosas y limos arcillosos que contienen óxidos de Fe y Mn, 2) materia orgánica y silicatos, 3) desechos agrícolas o domésticos. Todos estos materiales favorecen la disolución de los óxidos de hierro que liberan As al agua subterránea (Anawar, et al., 2011).



*Figura 12. Relación del As con otros parámetros físicos y químicos*



**Figura 13.** Diagrama Eh-pH. Sistema As-SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O

Figura 13: Las especies  $\text{HAsO}_4^{2-}$  y  $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$  en presencia de aniones  $\text{HCO}_3^-$ . Los posibles minerales de As son oropimente y arseniatos: Al ( $\text{AsO}_4$ ) (c),  $\text{Ca}_3(\text{AsO}_4)$  (2c),  $\text{Mg}_3(\text{AsO}_4)$  (2c),  $\text{Zn}_3(\text{AsO}_4)$  (2c),  $\text{Sr}_3(\text{AsO}_4)$  (2c). El oropimente ( $\text{As}_2\text{S}_3$ ) puede provenir de venas hidrotermales. (c) significa en estado cristalino.

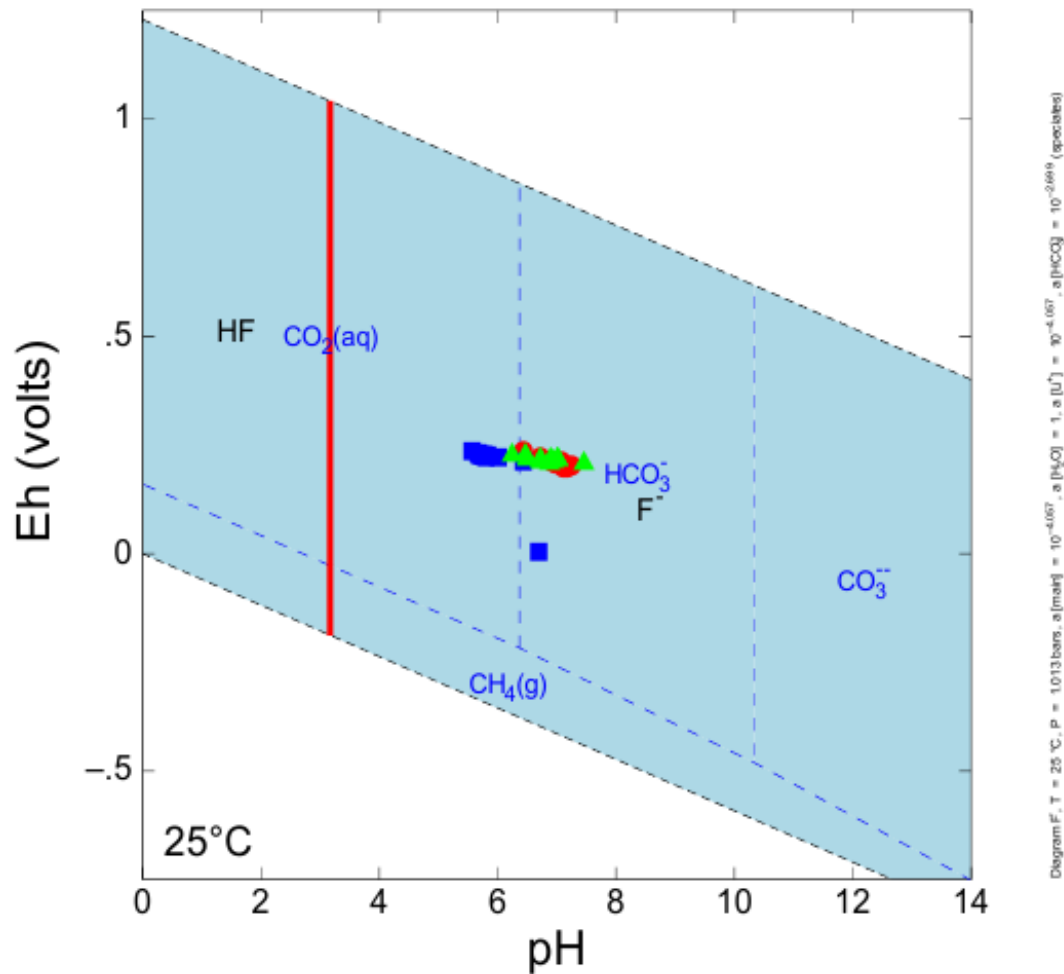


Figura 14. Diagrama Eh-pH. Sistema F-Li-H<sub>2</sub>O.

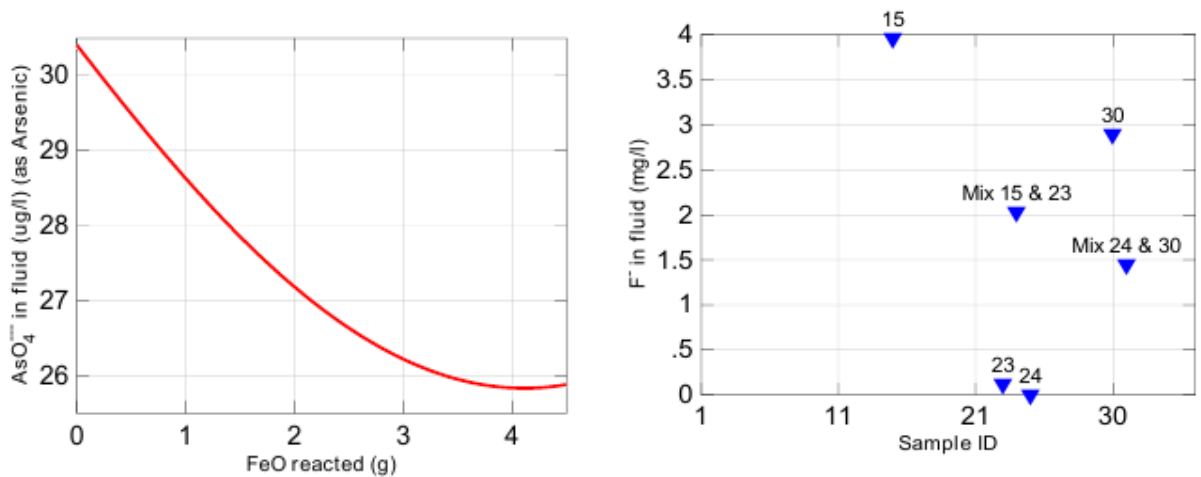
Figura 14: El anión F<sup>-</sup>, en presencia del ion HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, puede provenir de la disolución de la fluorita.

### 3.10 Remoción de arsénico y fluoruro del agua subterránea empleando el programa GWB

Para la remoción del arsénico se empleó el pozo 34, 30 µg/L As, con 4.5 de óxido de hierro (FeO), 500 g/L de O<sub>2</sub>(g) y 15 g de cuarzo para disminuir el arsénico a menos de 26 µg/L. Se mezclaron dos diferentes tipos de muestras de agua subterránea que corresponden a valores altos y bajos de concentraciones de F para que la mezcla tuviera un valor aproximado de 1.5 mg/L como se muestra en la figura 15. Se identificaron los pozos por su cercanía entre sí y se observan 3 grupos. En el grupo 1 se encuentran la mayoría de los pozos del acuífero Chihuahua-Sacramento,



el grupo 2 se encuentran en Tabalaopa-Aldama y el 3 pertenecen a pozos con uso agrícola, principalmente, en el Sauz-Encinillas.



La remoción de As hasta valores cercanos a 25  $\mu\text{g/L}$  mediante óxidos de hierro empleando el programa *React* de *GWB*.

La mezcla de pozos cercanos entre sí con valores altos y bajos de F deja un pozo con concentraciones de 2 y de 1.5 mg/L con el programa *GSS* de *GWB*.

**Figura 15.** Remoción de As y F con hierro mediante mezcla de agua subterránea.

### 3.11 Análisis de componentes principales y modelo conceptual

Una correlación positiva entre As, F y Li confirma el origen geogénico del As y F. Mientras que una correlación negativa entre As y Oxígeno se explica por una disolución reductiva de los arseniatos y/o la desorción del F de los sedimentos. En general, se observa que la temperatura del agua y su condición oxidante ( $\text{HCO}_3$ ,  $\text{SO}_4$ ,  $\text{O}_2$  (aq)) controlan las concentraciones de As y F del agua subterránea (Figura 16).

Los procesos y modelos que explican las posibles fuentes que liberan arsénico al agua subterránea son: las reacciones de intercambio iónico (efecto contador iónico) con modelación inversa, la disolución del vidrio volcánico y feldespatos, el intemperismo de silicatos (monosialitización) con modelos de patrones de reacción, diagramas de estabilidad, y análisis de saturación mineral, y la mezcla con aguas salinas mediante modelos conceptuales. El enriquecimiento del agua con arsénico, posiblemente, ocurrió al mezclarse el agua meteórica, proveniente de la lluvia, con aguas salinas o evaporitas (aguas hidrotermales). El agua mezclada se depositó en los sedimentos del acuífero. Como los iones de V, Mo, Si y  $\text{PO}_{4-3}$  coexisten con el arsénico y son del mismo radio iónico compiten por los sitios de superficie del mineral provocando



su movilización (Raychowdhury, et al., 2014) (Figura 17). El arsénico en el agua subterránea se verifica a pH alcalino y bajo contenido de Fe en el agua, esto es debido a condiciones de aridez, baja precipitación con alta evaporación, o en bajos niveles de carbono orgánico con un crecimiento de vegetación mínimo y pH alcalino (entre 7.5 y 9) en el suelo. Estas condiciones pueden ser naturales, pero también ser causadas por el hombre por desechos humanos o agrícolas o por actividad agrícola intensiva (Podgorski, et al., 2017).

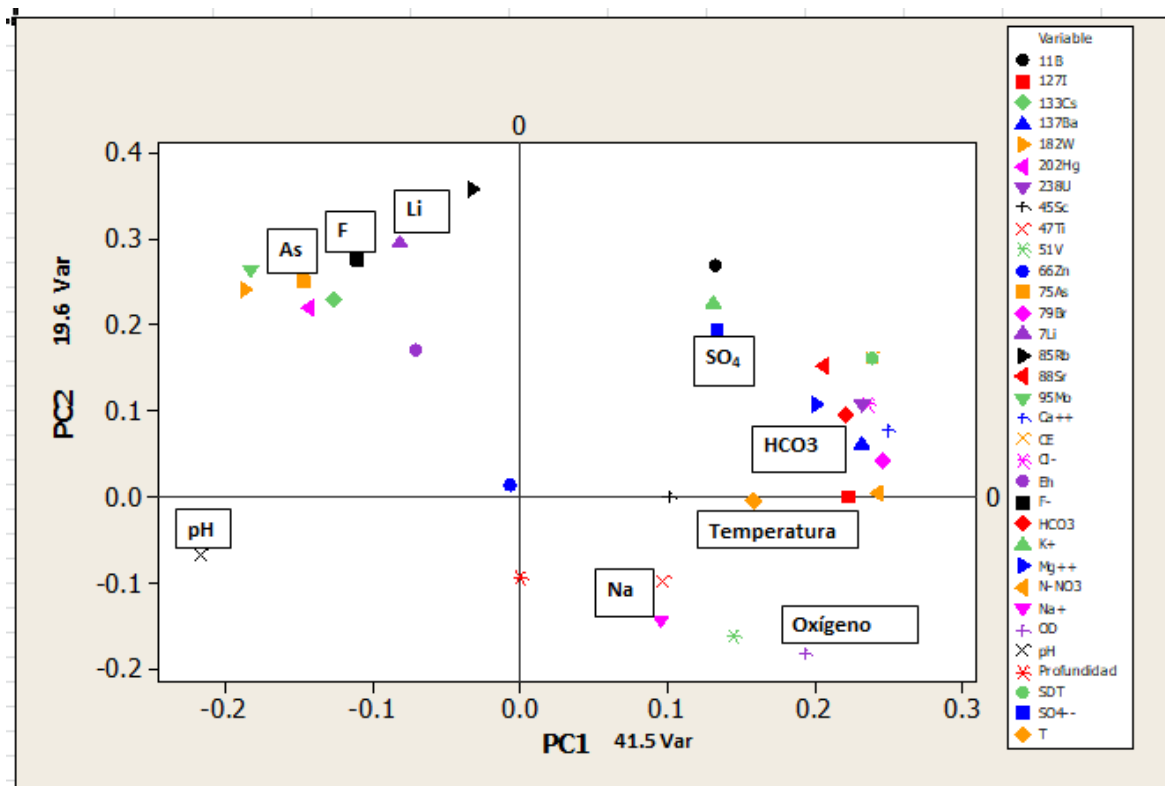


Figura 16. Análisis de componentes principales.

### 3.12 Análisis de sedimentos

Los resultados de los análisis de sedimentos del arroyo El Mimbres, cercano a la población de Aldama, se muestran en la tabla 6. Como se observa en todas las muestras, se cumple que  $Fe \gg Pb > Ag$ . No se encontró una relación entre el contenido de estos metales en el suelo con su contenido en el agua subterránea. Sin embargo, en los reportes técnicos de (CNA, 2018) si se

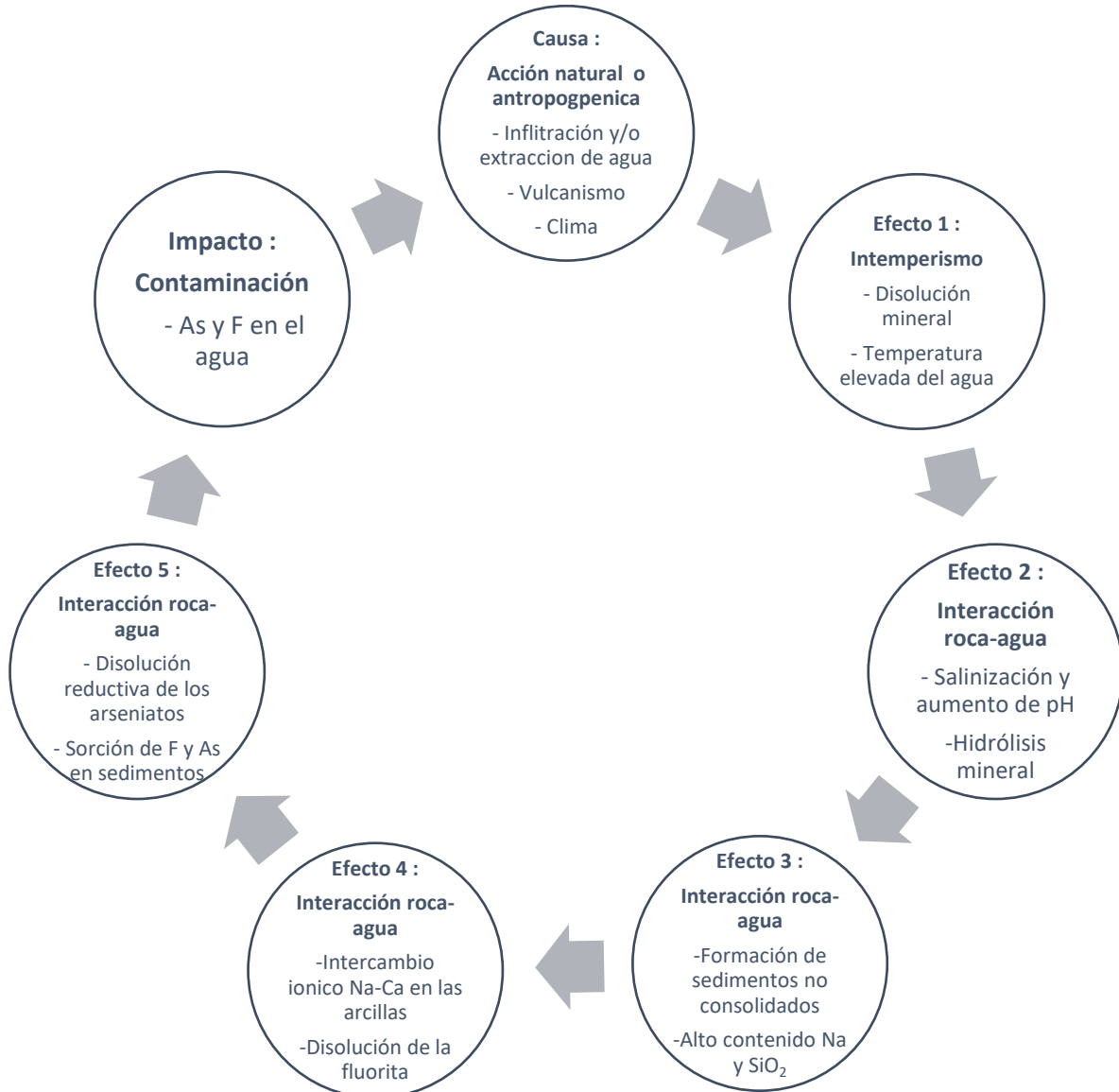




menciona que en el agua subterránea se han detectado valores de Fe en agua por arriba de lo establecido por la norma para consumo humano en estos acuíferos.

*Tabla 6. Análisis de sedimentos del arroyo El Mimbres.*

<i>Muestra</i>	<i>Ag (ppm)</i>	<i>Pb (ppm)</i>	<i>Fe (ppm)</i>
<i>1</i>	2.26	210	51,500
<i>2</i>	3.90	190	13,000
<i>3</i>	1.65	170	101,000



**Figura 17.** Relación causa-efecto-impacto de la presencia de As y F en el agua subterránea



#### 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La mayoría de los pozos de la ciudad de Chihuahua (>80%), es decir 29 de 34, mostraron contenidos de fluoruros en agua por arriba del límite permisible (1.5 mg/L), el acuífero de El Sauz no solo rebasa el límite de fluoruros sino también de arsénico (25 µg/L). El 32 % de los pozos muestreados (11 de 34) rebasaron el límite de arsénico.

Los pozos ubicados en los acuíferos Chihuahua-Sacramento y Aldama, en donde se concentra la mancha urbana, se usan principalmente para consumo humano a excepción de El Sauz donde se uso es principalmente agrícola.

El tipo de agua es bicarbonatada sódica-cálcica que proviene de rocas volcánicas riolíticas y rellenos aluviales. El agua circula en el acuífero en un ambiente oxidante, con un rango de Eh de entre 200 y 230 mV y pH entre 5.5 y 7.4. Las especies de arsénico As (V) son  $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$  y  $\text{HAsO}_4^{2-}$  y de los fluoruros  $\text{F}^-$  y  $\text{HAsO}_3\text{F}^-$ . En El Sauz se encontró el agua menos aireada con los valores más bajos de Eh y de oxígeno disuelto y los valores más altos de As.

Los pozos están ubicados a una profundidad aproximada de entre 150 y 400 m por lo que provienen posiblemente de sistemas de flujo regionales e intermedios. Lo anterior se confirma por las concentraciones de Litio y las temperaturas del agua de más de 28 °C.

Existe posible contaminación antropogénica por actividad agrícola en pozos de Aldama que son los menos profundos donde se encontraron concentraciones de nitratos y sulfatos, estos valores aun no rebasan el límite permisible de acuerdo a la norma.

Los procesos que promueven la liberación de As y F al agua son: pH alcalino del agua sujeta a ambientes oxidantes, que el agua interactúe con agua termal subterránea, que el agua circule por fallas donde el  $\text{CO}_2$  aumenta la hidrólisis de los minerales, depósitos de F que contengan minerales de As, por ejemplo, vidrios volcánicos, anfíboles y apatitas.

Los fluoruros en el agua se deben a la disolución de la calcita, que aporta iones calcio al agua, al intercambio iónico entre los iones Ca y Na en las arcillas, el descenso en el contenido de calcio



que hace que se disuelva fluorita aportando Ca y F al agua. Esta condición de agua alcalina y medio oxidante más un aumento de la temperatura y la presencia de minerales arseniatos de aluminio, estroncio, zinc, magnesio y calcio en las rocas volcánicas permite la liberación del arsénico y fluoruros por procesos de disolución y desorción.

El arsénico se puede remover del agua mediante minerales de hierro como hematita, magnetita, así como óxidos de hierro, particularmente FeO. Este mineral se encontró en los sedimentos del arroyo El Mimbres, estos sedimentos posiblemente formaban parte de la roca vítrea que contenía el As y F del agua subterránea.

Se recomienda continuar con el estudio de caracterización y modelación hidrogeoquímica en el área de estudio, ya que la calidad del agua puede variar de un año a otro y de una temporada de seca a una de lluvia.

Se recomienda complementar el estudio químico con el estudio de diseño y operación de los pozos, es decir los perfiles geológicos, registros eléctricos, pruebas de aforo, niveles estáticos y dinámicos, para revisar la movilidad y transporte del arsénico y fluoruros a nivel local y regional.



*Tabla 7. Mediciones en campo y análisis químico del agua en el área de estudio.*

Numero	Nombre	ID lab	acuifero	latitud	Longitud	X (UTM)	Y(UTM)	Fecha muestreo	Temperatura °C
1	Picacho 1	20-013	Chihuahua-Sacramento	28°42'23" N	106°08'06" O	3176000	387508.1	02-dic-19	33.94
2	Picacho 2	20-014	Chihuahua-Sacramento	28°42'08" N	106°08'47" O	3175533	388019.2	02-dic-19	35.1
3	Picacho 3	20-015	Chihuahua-Sacramento	28°42'22" N	106°08'44" O	3175963	388104.8	02-dic-19	32.47
4	Pozo Villas del Rey	20-016	Chihuahua-Sacramento	28°44'51" N	106°07'41" O	3180533	389857.7	02-dic-19	25.18
5	Riberas 4	20-017	Chihuahua-Sacramento	28°46'32" N	106°10'00" O	3183678	386117.9	02-dic-19	29.18
6	Riberas Sacramento 1	20-018	Chihuahua-Sacramento	28°47'02" N	106°10'03" O	3184602	386045.6	02-dic-19	29.56
7	Riberas Sacramento 5	20-019	Chihuahua-Sacramento	28°46'47" N	106°10'17" O	3184144	385661.4	02-dic-19	29.64
8	Riberas Sacramento 13	20-020	Chihuahua-Sacramento	28°50'18" N	106°11'01" O	3190650	384533	02-dic-19	20.15
9	Sacramento Norte 1	20-021	Chihuahua-Sacramento	28°45'06" N	106°07'29" O	3180991	390187.5	02-dic-19	23.78
10	Sacramento Norte 3	20-022	Chihuahua-Sacramento	28°44'40" N	106°08'47" O	3180211	388064.2	02-dic-19	28.48
11	20 Aniversario 1	20-025	Chihuahua-Sacramento	28°43'42" N	106°08'25" O	3178421	388643.9	02-dic-19	27.7
12	Tabalaopa Nombre de Dios 1	20-026	Tabalaopa-Aldama	28°44'28" N	105°59'29" O	3179706	403196.6	19-nov-19	26.55
13	Tabalaopa Nombre de Dios 3	20-027	Tabalaopa-Aldama	28°44'40" N	105°59'47" O	3180080	402711.4	19-nov-19	26.49
14	Tabalaopa Nombre de Dios 6	20-028	Tabalaopa-Aldama	28°45'01" N	106°00'23" O	3180734	401740.4	19-nov-19	26.17
15	Tabalaopa Nombre de Dios 7	20-029	Tabalaopa-Aldama	28°46'08" N	106°01'13" O	3182808	400401.9	19-nov-19	31.26
16	Tabalaopa Aldama 1	20-030	Tabalaopa-Aldama	28°42'40" N	106°00'51" O	3176401	400944	19-nov-19	26.88
17	Tabalaopa Aldama 3	20-023	Tabalaopa-Aldama	28°41'45" N	106°01'05" O	3174712	400549.7	19-nov-19	25.46
18	Tabalaopa Aldama 5	20-034	Tabalaopa-Aldama	28°43'12" N	106°00'38" O	3177383	401305.1	19-nov-19	26.04
19	Tabalaopa Aldama 6	20-024	Tabalaopa-Aldama	28°43'42" N	106°00'37" O	3178306	401340.1	19-nov-19	26.19
20	Tabalaopa Aldama 7	20-031	Tabalaopa-Aldama	28°44'07" N	106°00'34" O	3179075	401428	19-nov-19	26.54
21	Tabalaopa Aldama 8	20-035	Tabalaopa-Aldama	28°43'16" N	106°01'00" O	3177511	400709.3	19-nov-19	26.37
22	Pozo 300	20-012	Tabalaopa-Aldama	28°43'19" N	106°00'07" O	3177591	402148	19-nov-19	27.45
23	Sauz 3	20-032	Sauz-Encinillas	28°53'38" N	106°14'33" O	3177591	402148	15-ene-20	22.87
24	Sauz 5	20-036	Sauz-Encinillas	28°54'02" N	106°14'52" O	3197608	378345.2	15-ene-20	24.47
25	Sauz 16	20-043	Sauz-Encinillas	29°03'54" N	106°17'57" O	3215884	373534.7	15-ene-20	34.4
26	Sauz 17	20-039	Sauz-Encinillas	29°04'38" N	106°18'19" O	3217245	372954.8	15-ene-20	32.36
27	Sauz 18	20-037	Sauz-Encinillas	29°05'08" N	106°18'27" O	3218170	372748.7	15-ene-20	33.47
28	Sauz 24	20-044	Sauz-Encinillas	29°04'06" N	106°17'16" O	3216241	374647.5	15-ene-20	28.6
29	Sauz 25	20-042	Sauz-Encinillas	29°04'38" N	106°17'25" O	3217229	374414.9	15-ene-20	29.13
30	Sauz 27	20-041	Sauz-Encinillas	29°05'35" N	106°17'02" O	3218976	375055.9	15-ene-20	26.71
31	Sauz 28	20-033	Sauz-Encinillas	29°06'18" N	106°16'59" O	3220299	375151.4	15-ene-20	27.37
32	Sauz 29	20-038	Sauz-Encinillas	29°06'39" N	106°16'56" O	3220944	375239.6	15-ene-20	26.81
33	Sauz 30	20-045	Sauz-Encinillas	29°07'17" N	106°16'52" O	3222113	375360.4	15-ene-20	24.02
34	Sauz 31	20-040	Sauz-Encinillas	29°07'38" N	106°16'29" O	3222752	375989.1	15-ene-20	24.01



Numero	Eh	pH	SDT	C.E.	Alcalinidad	HCO3	OD	Profundidad	pH
	mV	campo	ppm	μS/cm	campo	campo	ppm	m	lab
1	199.9	7.15	204	407	<b>144</b>	175.68	6.1	300	<b>7.8</b>
2	195.8	7.15	211	422	<b>142</b>	173.24	8.3	300	<b>7.95</b>
3	196.8	7.11	233	467	<b>154</b>	187.88	7.67	300	<b>7.99</b>
4	211.1	7.08	181	362	<b>134</b>	163.48	7.82	300	<b>7.7</b>
5	208.5	6.91	233	466	<b>164</b>	200.08	7.89	300	<b>7.54</b>
6	198.8	7.25	205	411	<b>156</b>	190.32	6.4	270	<b>7.64</b>
7	197.8	7.17	224	448	<b>132</b>	161.04	6.31	300	<b>7.6</b>
8	220.1	6.72	195	393	<b>136</b>	165.92	6.17	300	<b>7.55</b>
9	232.8	6.44	168	335	<b>128</b>	156.16	9.27	300	<b>7.95</b>
10	207	6.98	219	438	<b>158</b>	192.76	7.86	300	<b>7.8</b>
11	207.6	7.03	237	473	<b>162</b>	197.64	8.78	144	<b>7.5</b>
12	220.4	5.8	334	668	<b>176</b>	214.72	7.35	300	<b>7.67</b>
13	231.5	5.57	351	702	<b>196</b>	239.12	8.07	350	<b>7.65</b>
14	210.9	6.44	285	571	<b>156</b>	190.32	ND	350	<b>7.9</b>
15	ND	6.7	223	457	<b>172</b>	209.84	ND	220	<b>8</b>
16	225.1	5.83	307	615	<b>176</b>	214.72	7.73	200	<b>7.89</b>
17	226.4	5.77	261	522	<b>182</b>	222.04	9.44	200	<b>7.87</b>
18	225.8	5.7	380	760	<b>176</b>	214.72	9.32	200	<b>7.45</b>
19	229.8	5.67	257	515	<b>171</b>	171	9.35	200	<b>7.63</b>
20	226.7	5.76	280	559	<b>152</b>	185.44	8.83	200	<b>7.57</b>
21	226.3	5.74	243	482	<b>164</b>	200.08	8.35	200	<b>7.55</b>
22	220.5	6.01	280	561	<b>156</b>	190.32	7.13	380	<b>7.7</b>
23	223.9	6.47	103	206	<b>124</b>	151.28	0.66	200	<b>7.96</b>
24	225.7	6.25	101	196	<b>112</b>	136.64	0.64	350	<b>7.71</b>
25	204.7	6.88	238	477	<b>152</b>	185.44	0.35	250	<b>7.88</b>
26	213.2	6.5	233	464	<b>142</b>	173.24	0.44	250	<b>7.58</b>
27	208.4	6.74	237	473	<b>146</b>	178.12	0.43	250	<b>7.6</b>
28	206.3	7.46	189	378	<b>124</b>	151.28	0.05	250	<b>7.66</b>
29	210.5	6.72	210	421	<b>132</b>	161.04	0.07	250	<b>7.5</b>
30	213.5	7.02	218	436	<b>128</b>	156.16	0.1	250	<b>7.51</b>
31	212.2	6.95	201	403	<b>134</b>	163.48	0.1	250	<b>7.6</b>
32	214.2	6.72	183	365	<b>114</b>	139.08	0.15	250	<b>7.52</b>
33	216.7	7.02	200	400	<b>132</b>	161.04	0.17	250	<b>7.29</b>
34	215	6.9	174	348	<b>118</b>	143.96	0.15	250	<b>7.44</b>



Numero	Alcalinidad mg/L CaCO3	C.E. µS/cm	HCO3- mg/L	F-	Ca++	Mg++	Na+	K+	Cl-
1	130.6	263	160.4	2.08	33.1	1.1	45.2	1.4	3.97
2	140	323	170.8	1.74	30.0	1.0	42.9	1.6	3.97
3	145.6	394	177.6	3.04	35.4	0.9	49.1	1.5	5.96
4	131.6	260	160.6	1.29	29.3	1.9	33.7	1.8	3.97
5	154	391	187.9	3.09	33.9	2.2	49.2	2.3	4.96
6	156.8	395	191.3	2.41	29.4	2.1	39.2	2.0	4.47
7	160	361	184.7	2.81	30.6	2.0	43.7	1.9	4.71
8	131.6	245	160.6	1.17	24.7	2.9	29.5	2.2	2.23
9	128.8	286	157.1	1.59	28.9	2.0	29.1	1.7	4.71
10	150.8	390	191.3	2.23	33.9	2.2	42.5	2.2	5.71
11	151.2	446	184.5	1.84	40.2	2.7	45.0	2.4	8.44
12	168	463	205	1.89	54.8	6.1	52.6	3.0	26.8
13	182	632	22.04	1.62	64.9	7.8	52.3	3.1	29.78
14	151.2	482	184.5	2.62	49.6	5.6	44.1	2.6	18.86
15	156.8	377	191.3	3.92	35.5	3.9	39.7	1.7	10.42
16	165.2	499	201.5	2.48	42.9	5.3	58.4	2.7	12.9
17	162.4	441	198.1	2.45	39.8	5.5	50.7	2.0	15.14
18	131.6	380	160.6	1.45	52.8	3.6	84.3	2.7	19.85
19	140	427	170.8	3.75	43.9	3.3	58.0	2.2	10.92
20	148.4	456	181.1	3.56	48.5	3.7	56.0	2.7	12.41
21	148.4	420	181.1	2.23	36.2	4.4	52.4	2.2	14.39
22	136.2	507	169.3	2.13	26.8	1.2	66.3	1.9	23.82
23	103.6	179.8	126.4	0.1	11.5	0.6	38.0	1.2	0.99
24	109.2	190	133.2	0	15.7	0.9	39.7	1.7	1.49
25	150.6	403	183.7	4.17	31.4	2.6	66.8	3.7	6.95
26	142.8	470	174	5.22	32.4	2.8	71.4	3.2	6.45
27	142	453	174	3.89	32.1	2.6	67.7	3.2	7.44
28	122.7	327	149.7	2.45	27.9	2.8	50.5	2.8	5.46
29	133.8	362	163.3	3.56	30.7	2.4	61.2	3.3	5.96
30	137.2	415	167.4	2.86	32.4	3.0	65.4	3.4	6.45
31	126	371	153.7	2.56	32.4	3.3	60.6	3.7	7.44
32	114.8	371	140.1	2.01	25.0	2.9	51.3	3.2	4.96
33	147.8	362	180.3	3.56	26.3	3.4	57.5	4.0	5.96
34	112	344	136.6	3.34	18.2	1.7	41.3	1.8	4.47



Numero	Si	SO4--	E.B.I.	Tipo	D.T.	N-NO3	7Li	9Be	11B
			%		CaCO3	mg/L	µg/L (ppb)		
1	19.6	56.87	<b>4.59%</b>	Na-HCO3	<b>87.48068</b>	1.3	96.68	<b>&lt; 0.01</b>	115.25
2	33.4	61.05	<b>2.72%</b>	Na-HCO3	<b>78.94979</b>	1	106.15	<b>&lt; 0.01</b>	129.15
3	24.1	74.39	<b>2.17%</b>	Na-HCO3	<b>92.30451</b>	1.7	121.7	<b>&lt; 0.01</b>	155.55
4	26.9	48.42	<b>3.21%</b>	Na-HCO3	<b>81.10422</b>	1.8	61.575	<b>&lt; 0.01</b>	90.875
5	25.2	70.18	<b>8.24%</b>	Na-HCO3	<b>93.71179</b>	0.8	133.9	<b>&lt; 0.01</b>	166.35
6	24.8	52.63	<b>6.06%</b>	Na-HCO3	<b>82.13832</b>	3.2	108.1	<b>&lt; 0.01</b>	128.35
7	19.1	61.75	<b>6.22%</b>	Na-HCO3	<b>84.76987</b>	1.4	127.5	<b>&lt; 0.01</b>	153.5
8	24.4	34.04	<b>3.65%</b>	Na-HCO3	<b>73.66104</b>	2	66.205	<b>&lt; 0.01</b>	74.15
9	20.6	48.07	<b>1.10%</b>	Na-HCO3	<b>80.59538</b>	2.7	50.085	<b>&lt; 0.01</b>	68.13
10	24.5	64.21	<b>2.72%</b>	Na-HCO3	<b>93.77933</b>	1.1	116.5	<b>&lt; 0.01</b>	151.25
11	29.9	72.98	<b>-1.42%</b>	Na-HCO3	<b>111.6103</b>	2.6	111.9	<b>&lt; 0.01</b>	155
12	23.8	92.28	<b>-1.82%</b>	Ca-HCO3	<b>162.0823</b>	4.9	86.12	<b>&lt; 0.01</b>	166.25
13	24.9	97.54	<b>-2.73%</b>	Ca-HCO3	<b>194.2649</b>	6.1	81.37	<b>&lt; 0.01</b>	172.6
14	17.6	80.7	<b>-4.27%</b>	Ca-HCO3	<b>146.9987</b>	4.6	73.375	<b>&lt; 0.01</b>	167.25
15	11.7	46.32	<b>-11.45%</b>	Ca-HCO3	<b>104.5686</b>	1.4	79.465	<b>&lt; 0.01</b>	163.35
16	19.2	58.95	<b>-0.02%</b>	Ca-HCO3	<b>128.88</b>	3.8	112.25	<b>&lt; 0.01</b>	181
17	19.6	53.68	<b>3.02%</b>	Na-HCO3	<b>122.0455</b>	2.9	104.85	<b>&lt; 0.01</b>	176.25
18	14.7	53.71	<b>15.07%</b>	Na-HCO3	<b>146.9072</b>	8.2	132.6	<b>&lt; 0.01</b>	233.3
19	16.6	57.89	<b>4.05%</b>	Na-HCO3	<b>123.1866</b>	4.9	89.895	<b>&lt; 0.01</b>	199.1
20	15.1	63.51	<b>-5.24%</b>	Ca-HCO3	<b>136.2083</b>	5.9	92.015	<b>&lt; 0.01</b>	194.1
21	5.9	49.47	<b>-9.11%</b>	Ca-HCO3	<b>108.6569</b>	3.2	93.175	<b>&lt; 0.01</b>	173.05
22	24.7	74	<b>4.62%</b>	Na-HCO3	<b>71.91338</b>	5.1	92.465	<b>&lt; 0.01</b>	185.05
23	12.6	2.81	<b>-22.85%</b>	Na-HCO3	<b>31.05728</b>	1.6	12.96	<b>&lt; 0.01</b>	31.985
24	16.2	4.56	<b>-24.80%</b>	Na-HCO3	<b>42.872</b>	1.2	14.1	<b>&lt; 0.01</b>	34.22
25	21.4	66.67	<b>-21.16%</b>	Na-HCO3	<b>89.35174</b>	0.6	144.65	<b>&lt; 0.01</b>	172.45
26	25.9	66.32	<b>-16.73%</b>	Na-HCO3	<b>92.37392</b>	1.1	145.8	<b>&lt; 0.01</b>	174.8
27	20.7	67.02	<b>-18.17%</b>	Na-HCO3	<b>90.79015</b>	1.2	150	<b>&lt; 0.01</b>	180.1
28	25.1	49.47	<b>-19.37%</b>	Ca-HCO3	<b>81.17048</b>	1.5	88.705	<b>&lt; 0.01</b>	129
29	29.4	55.09	<b>-18.49%</b>	Ca-HCO3	<b>86.67261</b>	1	128.4	<b>&lt; 0.01</b>	166.45
30	24.5	63.51	<b>-16.20%</b>	Na-HCO3	<b>93.28384</b>	0.9	126.3	<b>&lt; 0.01</b>	159.05
31	25.1	63.81	<b>-14.66%</b>	Na-HCO3	<b>94.59312</b>	1.4	107.1	<b>&lt; 0.01</b>	127.95
32	31.6	52.28	<b>-17.51%</b>	Na-HCO3	<b>74.44057</b>	0.9	94.04	<b>&lt; 0.01</b>	115.4
33	25.1	55.44	<b>-28.97%</b>	Na-HCO3	<b>79.75488</b>	0.9	124.3	<b>&lt; 0.01</b>	152.65
34	19.2	45.26	<b>-20.63%</b>	Na-HCO3	<b>52.52705</b>	1	114.45	<b>&lt; 0.01</b>	133.6





Numero	27Al	31P	45Sc	47Ti	51V	52Cr	55Mn	56Fe	59Co
1	< 0.1	< 1.0	3.783	2.085	3.905	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
2	< 0.1	< 1.0	4.252	2.4215	3.579	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
3	< 0.1	< 1.0	4.1385	2.2645	3.063	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
4	< 0.1	< 1.0	2.53	1.8865	4.373	0.0315	< 0.01	< 0.01	< 0.01
5	< 0.1	< 1.0	3.789	2.2165	3.997	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
6	< 0.1	< 1.0	3.224	2.028	5.2205	0.137	< 0.01	< 0.01	< 0.01
7	< 0.1	< 1.0	3.384	2.0665	4.4465	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
8	< 0.1	< 1.0	2.619	1.4915	5.5815	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
9	< 0.1	< 1.0	2.317	1.5205	4.4455	0.0485	< 0.01	< 0.01	< 0.01
10	< 0.1	< 1.0	3.6385	2.3505	3.792	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
11	< 0.1	< 1.0	3.708	2.1645	3.8375	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
12	< 0.1	< 1.0	2.7245	1.4215	5.812	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
13	< 0.1	< 1.0	3.4	1.9445	5.655	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
14	< 0.1	< 1.0	3.2135	1.849	5.8125	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
15	< 0.1	< 1.0	2.6565	1.4015	5.529	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
16	< 0.1	< 1.0	4.159	2.497	6.2045	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
17	< 0.1	< 1.0	3.6625	2.475	4.8425	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
18	< 0.1	< 1.0	3.8945	1.961	7.596	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
19	< 0.1	< 1.0	2.98	1.908	5.6655	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
20	< 0.1	< 1.0	3.006	1.7245	6.158	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
21	4.18	< 1.0	3.5415	2.248	7.6755	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
22	< 0.1	< 1.0	2.646	1.6385	9.7055	1.807	< 0.01	< 0.01	< 0.01
23	< 0.1	1.0	1.3165	0.8265	14.6	3.419	< 0.01	< 0.01	< 0.01
24	< 0.1	< 1.0	1.152	0.8785	11.845	2.307	< 0.01	< 0.01	< 0.01
25	< 0.1	< 1.0	2.3735	1.5085	1.5015	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
26	< 0.1	2.69	2.9335	1.5135	1.9175	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
27	< 0.1	< 1.0	2.8715	1.3905	1.499	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
28	< 0.1	< 1.0	2.5035	1.6385	3.7885	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
29	< 0.1	< 1.0	3.0035	1.412	2.3155	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
30	< 0.1	< 1.0	2.866	1.694	2.433	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
31	< 0.1	< 1.0	2.7415	1.6205	4.8805	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
32	< 0.1	< 1.0	2.4055	1.43	7.515	0.178	< 0.01	< 0.01	< 0.01
33	< 0.1	< 1.0	3.023	1.694	6.063	0.3705	< 0.01	< 0.01	< 0.01
34	< 0.1	< 1.0	2.3395	1.2865	6.083	0.804	< 0.01	< 0.01	< 0.01



Numero	<b>60Ni</b>	<b>65Cu</b>	66Zn	<b>69Ga</b>	<b>72Ge</b>	75As	78Se	79Br	85Rb
1	< 0.01	< 0.01	1.784	< 0.01	< 0.01	18.52	< 0.01	46.09	10.0315
2	< 0.01	< 0.01	1.874	< 0.01	< 0.01	17.575	< 0.01	45.535	10.255
3	< 0.01	< 0.01	3.2605	< 0.01	<b>0.009</b>	17.795	< 0.01	51.84	13.08
4	< 0.01	< 0.01	3.9445	< 0.01	< 0.01	12.925	< 0.01	48.955	9.702
5	< 0.01	< 0.01	3.335	< 0.01	<b>0.3905</b>	23.49	< 0.01	45.105	14.25
6	< 0.01	< 0.01	6.64	< 0.01	<b>0.021</b>	22.465	< 0.01	36.35	12.645
7	< 0.01	< 0.01	4.872	< 0.01	<b>0.135</b>	22.89	< 0.01	42.59	11.955
8	< 0.01	< 0.01	6.1655	< 0.01	< 0.01	15.125	< 0.01	30.96	7.2795
9	< 0.01	< 0.01	29.27	< 0.01	< 0.01	12.205	< 0.01	54.11	8.438
10	< 0.01	< 0.01	0.9925	< 0.01	<b>0.304</b>	20.91	< 0.01	45.695	13.885
11	< 0.01	< 0.01	37.59	< 0.01	<b>0.0485</b>	17.735	0.255	88.72	13.98
12	< 0.01	< 0.01	5.6875	<b>0.087</b>	< 0.01	17.79	1.1765	125.45	13.24
13	< 0.01	< 0.01	8.6495	<b>0.0245</b>	< 0.01	19.53	0.849	147.95	15.865
14	< 0.01	< 0.01	10.94	< 0.01	< 0.01	23.54	1.441	129.55	14.135
15	< 0.01	< 0.01	7.8735	< 0.01	< 0.01	16.695	1.261	54.89	7.795
16	< 0.01	< 0.01	15.135	< 0.01	<b>0.136</b>	18.555	0.68	138.75	16.015
17	< 0.01	< 0.01	4.6295	< 0.01	<b>0.1125</b>	13.245	0.865	113.35	11.23
18	< 0.01	< 0.01	16.21	< 0.01	<b>0.442</b>	20.56	1.5035	218.5	15.81
19	< 0.01	< 0.01	24.32	< 0.01	< 0.01	18.44	2.1335	145.85	8.344
20	< 0.01	< 0.01	19.275	< 0.01	<b>0.106</b>	18.285	2.1985	141.5	11.915
21	< 0.01	< 0.01	15.57	< 0.01	< 0.01	17.315	3.695	119.45	12.275
22	< 0.01	< 0.01	10.56	< 0.01	<b>0.346</b>	33.845	< 0.01	128.4	7.6965
23	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	14.055	< 0.01	11.01	< 0.01
24	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	10.86	< 0.01	19.39	0.014
25	< 0.01	< 0.01	18.565	< 0.01	<b>0.978</b>	38.495	< 0.01	36.68	20.65
26	< 0.01	< 0.01	13.645	< 0.01	<b>0.975</b>	38.62	< 0.01	36.54	21.25
27	< 0.01	< 0.01	5.718	< 0.01	<b>1.128</b>	42.335	< 0.01	38.995	21.655
28	< 0.01	< 0.01	44.73	< 0.01	<b>0.125</b>	28.72	< 0.01	34.435	13.945
29	< 0.01	< 0.01	8.6835	< 0.01	<b>0.9705</b>	39.35	< 0.01	42.19	17.43
30	< 0.01	< 0.01	19.21	< 0.01	<b>0.9115</b>	31.545	< 0.01	42.16	18.2
31	< 0.01	< 0.01	15.135	< 0.01	<b>0.238</b>	27.095	< 0.01	43.57	11.97
32	< 0.01	< 0.01	22.585	< 0.01	<b>0.0375</b>	25.96	< 0.01	34.21	8.3125
33	< 0.01	< 0.01	8.3995	< 0.01	<b>0.567</b>	38.51	< 0.01	40.91	14.05
34	< 0.01	< 0.01	3.6075	< 0.01	<b>0.5375</b>	45.89	< 0.01	32.725	9.9765



Numero	88Sr	89Y	90Zr	93Nb	95Mo	101Ru	103Rh	105Pd	111Cd
1	401.2	< 0.01	< 0.01	< 0.01	4.522	< 0.01	< 0.01	0.067	< 0.01
2	425.25	< 0.01	< 0.01	< 0.01	4.403	< 0.01	< 0.01	0.027	< 0.01
3	479.5	< 0.01	< 0.01	< 0.01	4.705	< 0.01	< 0.01	0.0635	< 0.01
4	296.35	< 0.01	< 0.01	< 0.01	2.99	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
5	376.85	< 0.01	< 0.01	< 0.01	6.195	< 0.01	< 0.01	0.0395	< 0.01
6	349.95	< 0.01	< 0.01	< 0.01	5.1045	< 0.01	< 0.01	0.03	< 0.01
7	368	< 0.01	< 0.01	< 0.01	5.4665	< 0.01	< 0.01	0.027	< 0.01
8	258.75	< 0.01	< 0.01	< 0.01	3.106	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
9	291.85	< 0.01	< 0.01	< 0.01	2.734	< 0.01	< 0.01	0.0205	< 0.01
10	396.3	< 0.01	< 0.01	< 0.01	4.7875	< 0.01	< 0.01	0.0225	< 0.01
11	427.95	< 0.01	< 0.01	< 0.01	3.807	< 0.01	< 0.01	0.0555	< 0.01
12	1105	< 0.01	< 0.01	< 0.01	3.497	< 0.01	< 0.01	0.3	< 0.01
13	1357	< 0.01	< 0.01	< 0.01	2.9185	< 0.01	< 0.01	0.505	< 0.01
14	905.45	< 0.01	< 0.01	< 0.01	3.303	< 0.01	< 0.01	0.303	< 0.01
15	393.35	< 0.01	< 0.01	< 0.01	4.5905	< 0.01	< 0.01	0.02	< 0.01
16	583.95	< 0.01	< 0.01	< 0.01	3.4225	< 0.01	< 0.01	0.1055	< 0.01
17	468.15	< 0.01	< 0.01	< 0.01	4.364	< 0.01	< 0.01	0.082	< 0.01
18	612.15	< 0.01	< 0.01	< 0.01	2.23	< 0.01	< 0.01	0.1305	< 0.01
19	470.75	< 0.01	< 0.01	< 0.01	3.4685	< 0.01	< 0.01	0.0715	< 0.01
20	692.65	< 0.01	< 0.01	< 0.01	2.9095	< 0.01	< 0.01	0.1755	< 0.01
21	407.8	< 0.01	< 0.01	< 0.01	6.0485	< 0.01	< 0.01	0.0575	< 0.01
22	300.25	< 0.01	< 0.01	< 0.01	4.594	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
23	110.85	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
24	146.1	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
25	451.9	< 0.01	< 0.01	< 0.01	9.468	< 0.01	< 0.01	0.019	< 0.01
26	429.05	< 0.01	< 0.01	< 0.01	9.9625	< 0.01	< 0.01	0.041	< 0.01
27	490.35	< 0.01	< 0.01	< 0.01	9.577	< 0.01	< 0.01	0.0245	< 0.01
28	415.5	< 0.01	< 0.01	< 0.01	6.0035	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
29	380.3	< 0.01	< 0.01	< 0.01	8.399	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
30	340.6	< 0.01	< 0.01	< 0.01	8.134	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
31	368.95	< 0.01	< 0.01	< 0.01	5.1265	< 0.01	< 0.01	0.0245	< 0.01
32	312.75	< 0.01	< 0.01	< 0.01	4.593	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
33	336.2	< 0.01	< 0.01	< 0.01	7.7995	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
34	256.7	< 0.01	< 0.01	< 0.01	6.8005	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01



Numero	118Sn	121Sb	125Te	127I	133Cs	137Ba	139La	140Ce	141Pr
1	< 0.01	< 0.01	< 0.01	11.96	14.95	4.521	< 0.01	< 0.01	< 0.01
2	< 0.01	< 0.01	< 0.01	11.315	15.59	6.1305	< 0.01	< 0.01	< 0.01
3	< 0.01	< 0.01	< 0.01	11.875	17.285	11.62	< 0.01	< 0.01	< 0.01
4	< 0.01	< 0.01	< 0.01	12.56	7.5525	10.865	< 0.01	< 0.01	< 0.01
5	< 0.01	< 0.01	< 0.01	10.63	14.73	12.81	< 0.01	< 0.01	< 0.01
6	< 0.01	< 0.01	< 0.01	10.455	11.275	13.905	< 0.01	< 0.01	< 0.01
7	< 0.01	< 0.01	< 0.01	10.805	12.03	13.945	< 0.01	< 0.01	< 0.01
8	< 0.01	< 0.01	< 0.01	9.064	4.591	7.6385	< 0.01	< 0.01	< 0.01
9	< 0.01	< 0.01	< 0.01	12.115	5.599	9.789	< 0.01	< 0.01	< 0.01
10	< 0.01	< 0.01	< 0.01	10.695	14.855	5.8265	< 0.01	< 0.01	< 0.01
11	< 0.01	< 0.01	< 0.01	10.6	12.785	4.405	< 0.01	< 0.01	< 0.01
12	< 0.01	< 0.01	< 0.01	20.9	5.0105	53.385	< 0.01	< 0.01	< 0.01
13	< 0.01	< 0.01	< 0.01	22.2	5.8955	47.33	< 0.01	< 0.01	< 0.01
14	< 0.01	< 0.01	< 0.01	19.105	6.8905	19.505	< 0.01	< 0.01	< 0.01
15	< 0.01	< 0.01	< 0.01	10.795	6.4485	24.285	< 0.01	< 0.01	< 0.01
16	< 0.01	< 0.01	< 0.01	10.805	7.418	29.995	< 0.01	< 0.01	< 0.01
17	< 0.01	< 0.01	< 0.01	11.815	8.731	16.105	< 0.01	< 0.01	< 0.01
18	< 0.01	< 0.01	< 0.01	16.015	6.3965	24.885	< 0.01	< 0.01	< 0.01
19	< 0.01	< 0.01	< 0.01	17.13	6.794	27.765	< 0.01	< 0.01	< 0.01
20	< 0.01	< 0.01	< 0.01	17.355	7.363	37.905	< 0.01	< 0.01	< 0.01
21	< 0.01	< 0.01	< 0.01	13.125	5.369	10.83	< 0.01	< 0.01	< 0.01
22	< 0.01	< 0.01	< 0.01	23.85	4.0705	12.255	< 0.01	< 0.01	< 0.01
23	< 0.01	< 0.01	< 0.01	24.88	< 0.01	1.6125	< 0.01	< 0.01	< 0.01
24	< 0.01	< 0.01	< 0.01	22.295	< 0.01	3.7615	< 0.01	< 0.01	< 0.01
25	< 0.01	0.3585	< 0.01	8.6365	24.2	6.706	< 0.01	< 0.01	< 0.01
26	< 0.01	0.272	< 0.01	9.6395	24.375	6.0425	< 0.01	< 0.01	< 0.01
27	< 0.01	0.4785	< 0.01	9.528	25.625	4.4535	< 0.01	< 0.01	< 0.01
28	< 0.01	< 0.01	< 0.01	10.98	11.715	5.881	< 0.01	< 0.01	< 0.01
29	< 0.01	0.007	< 0.01	10.0165	12.905	6.2635	< 0.01	< 0.01	< 0.01
30	< 0.01	< 0.01	< 0.01	8.778	11.855	4.485	< 0.01	< 0.01	< 0.01
31	< 0.01	< 0.01	< 0.01	7.352	6.4605	5.459	< 0.01	< 0.01	< 0.01
32	< 0.01	< 0.01	< 0.01	7.2895	3.1785	6.4845	< 0.01	< 0.01	< 0.01
33	< 0.01	< 0.01	< 0.01	8.876	10.87	9.3705	< 0.01	< 0.01	< 0.01
34	< 0.01	< 0.01	< 0.01	7.9305	5.3725	8.566	< 0.01	< 0.01	< 0.01





Numero	178Hf	181Ta	182W	185Re	189Os	193Ir	195Pt	197Au	202Hg
1	< 0.01	< 0.01	1.499	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.0725
2	< 0.01	< 0.01	1.152	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.0645
3	< 0.01	< 0.01	1.247	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.038
4	< 0.01	< 0.01	0.7835	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.0695
5	< 0.01	< 0.01	2.398	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.0715
6	< 0.01	< 0.01	2.0255	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.084
7	< 0.01	< 0.01	2.061	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.0295
8	< 0.01	< 0.01	0.9915	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.04
9	< 0.01	< 0.01	0.8235	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.226
10	< 0.01	< 0.01	1.9485	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.035
11	< 0.01	< 0.01	1.414	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.016
12	< 0.01	< 0.01	0.2605	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.0205
13	< 0.01	< 0.01	0.4555	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.083
14	< 0.01	< 0.01	1.7535	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.3335
15	< 0.01	< 0.01	1.797	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.0725
16	< 0.01	< 0.01	1.75	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.087
17	< 0.01	< 0.01	1.744	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.094
18	< 0.01	< 0.01	1.198	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.098
19	< 0.01	< 0.01	1.62	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.1355
20	< 0.01	< 0.01	1.0285	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.1685
21	< 0.01	< 0.01	1.9755	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.211
22	< 0.01	< 0.01	2.5705	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.071
23	< 0.01	< 0.01	0.328	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.0325
24	< 0.01	< 0.01	0.2265	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
25	< 0.01	< 0.01	9.472	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.2915
26	< 0.01	< 0.01	9.4955	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.334
27	< 0.01	< 0.01	9.3175	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.312
28	< 0.01	< 0.01	6.2235	< 0.01		< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.2225
29	< 0.01	< 0.01	8.6715	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.28
30	< 0.01	< 0.01	8.0175	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.328
31	< 0.01	< 0.01	6.15	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.1675
32	< 0.01	< 0.01	5.5685	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.169
33	< 0.01	< 0.01	8.182	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.2075
34	< 0.01	< 0.01	9.788	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.265



Numero	<b>205Tl</b>	<b>208Pb</b>	<b>209Bi</b>	<b>232Th</b>	238U
1	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	5.927
2	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	6.2305
3	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	6.833
4	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	4.9895
5	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	5.0945
6	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	4.5555
7	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	5.1325
8	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	3.291
9	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	4.2235
10	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	4.7405
11	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	5.834
12	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	9.2515
13	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	9.404
14	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	6.1035
15	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	4.7615
16	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	7.46
17	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	6.618
18	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	12.21
19	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	5.977
20	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	6.8975
21	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	5.1115
22	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	7.52
23	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	4.163
24	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	4.172
25	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	5.6
26	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	4.9145
27	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	5.411
28	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	3.872
29	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	4.649
30	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	4.7575
31	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	4.1635
32	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	3.0105
33	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	3.735
34	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	2.754



*Tabla 8. Parámetros físicos y elementos traza de la familia de agua bicarbonatada sódica, n=25*

Parámetro	Rango	Media $\pm$ DS
Temperatura ( $^{\circ}$ C)	20.15 - 35.1	27.87 $\pm$ 3.88
Eh (mV)	195.8 - 232.8	213.01 $\pm$ 10.51
SDT (ppm)	101 - 380	215.04 $\pm$ 53.13
C.E. ( $\mu$ S/cm)	179.8 - 507	362.71 $\pm$ 82.82
OD (ppm)	0.1 - 9.44	4.84 $\pm$ 3.80
Profundidad (m)	144 - 380	265.76 $\pm$ 50.92
Litio ( $\mu$ g/L)	12.96 - 150	102.15 $\pm$ 35.92
Boro ( $\mu$ g/L)	31.98 - 233.3	138.53 $\pm$ 48.07
Escandio ( $\mu$ g/L)	1.15 - 4.25	2.98 $\pm$ 0.77
Titanio ( $\mu$ g/L)	0.82 - 2.47	1.77 $\pm$ 0.43
Vanadio ( $\mu$ g/L)	1.5 - 14.6	5.29 $\pm$ 3.01
Selenio ( $\mu$ g/L)	0.25 - 2.13	1.19 $\pm$ 0.70
Bromo ( $\mu$ g/L)	11.01 - 218.5	59.13 $\pm$ 45.40
Rubidio ( $\mu$ g/L)	0.014 - 21.65	12.27 $\pm$ 4.84
Estroncio ( $\mu$ g/L)	110.85 - 612.15	366.66 $\pm$ 107.24
Yoduro ( $\mu$ g/L)	7.28 - 24.88	12.24 $\pm$ 4.79
Cesio ( $\mu$ g/L)	3.17 - 25.62	11.70 $\pm$ 6.43
Bario ( $\mu$ g/L)	1.61 - 27.76	9.57 $\pm$ 6.16
Uranio ( $\mu$ g/L)	2.75 - 12.21	5.27 $\pm$ 1.82
Silicio (mg/L)	12.6 - 33.4	22.8 $\pm$ 4.9
Arsénico ( $\mu$ g/L)	10.86 - 45.89	24.04 $\pm$ 10.
Fluoruro (mg/L)	0 - 5.22	2.43 $\pm$ 1.18





**Tabla 9.** *Parámetros físicos y elementos traza de la familia de agua bicarbonatada cálcica, n=9*

Parámetro	Rango	Media $\pm$ DS
Temperatura ( $^{\circ}$ C)	26.17 - 31.26	27.55 $\pm$ 1.64
Eh (mV)	206.3 - 231.5	219.71 $\pm$ 8.68
SDT (ppm)	189 - 351	269.11 $\pm$ 53.16
C.E. ( $\mu$ S/cm)	378 - 702	539.22 $\pm$ 105.52
OD (ppm)	0.05 - 8.83	5.77 $\pm$ 3.64
Profundidad (m)	200 - 350	257.77 $\pm$ 58.07
Litio ( $\mu$ g/L)	73.37 - 128.4	92.76 $\pm$ 16.30
Boro ( $\mu$ g/L)	129 - 194.1	168.11 $\pm$ 16.48
Escandio ( $\mu$ g/L)	2.50 - 4.16	3.13 $\pm$ 0.48
Titanio ( $\mu$ g/L)	1.40 - 2.49	1.79 $\pm$ 0.36
Vanadio ( $\mu$ g/L)	2.31 - 7.67	5.43 $\pm$ 1.44
Selenio ( $\mu$ g/L)	0.68 - 3.69	1.61 $\pm$ 0.96
Bromo ( $\mu$ g/L)	34.43 - 147.95	103.79 $\pm$ 43.42
Rubidio ( $\mu$ g/L)	7.79 - 17.43	13.62 $\pm$ 2.67
Estroncio ( $\mu$ g/L)	380.3 - 1357	693.44 $\pm$ 335.59
Yoduro ( $\mu$ g/L)	10.01 - 22.2	15.03 $\pm$ 4.58
Cesio ( $\mu$ g/L)	5.01 - 12.90	7.66 $\pm$ 2.61
Bario ( $\mu$ g/L)	5.88 - 53.38	26.15 $\pm$ 16.43
Uranio ( $\mu$ g/L)	3.87 - 9.40	6.39 $\pm$ 1.89
Silicio (mg/L)	5.9 - 29.4	19.2 $\pm$ 7.0
Arsénico ( $\mu$ g/L)	16.69 - 39.35	22.19 $\pm$ 7.05
Fluoruro (mg/L)	1.62 - 3.92	2.70 $\pm$ 0.75



## 5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alarcón Herrera, M., Martín-Alarcon, D., Gutierrez, M., Reynoso Cuevas, L., Martín, A., Olmos Márquez, M., & Bundschuh, J. (2019). Co-occurrence, possible origin, and health-risk assessment of arsenic and fluoride in drinking water sources in Mexico: Geographical data visualization. *Science of the Total Environment*, 1-32.
- Ameur, M., Hamzaoui-Azaza, F., Cheikha, L. B., & Gueddari, M. (2019). Geochemistry of high concentrations of fluoride in groundwater at Oued Rmel aquifer (North-eastern Tunisia), and risks to human health from exposure through drinking water. *Environmental Earth Sciences*, 1-9.
- Anawar, H. M., Akai, J., Mihaljevič, M., Sikder, A. M., Ahmed, G., Tareq, S. M., & Rahman, M. M. (2011). Arsenic Contamination in Groundwater of Bangladesh: Perspectives on Geochemical, Microbial and Anthropogenic Issues. *Water*, 1050-1076.
- Arreguín, F., Chávez, R., Soto, P., & Smedley, P. L. (2012). An overview of arsenic occurrence in the groundwater of Mexico. En J. Ng, B. Noller, R. Naidu, J. Bundschuh, & P. Bhattacharya (Eds.), *Understanding the Geological and Medical Interface of Arsenic - As 2012* (págs. 91-93).
- Bianchini, G., Brombin, V., Marchina, C., Natali, C., Godebo, T. R., Rasini, A., & Salani, G. M. (2020). Origin of Fluoride and Arsenic in the Main Ethiopian Rift Waters. *Minerals*, 1-25.
- Bundschuh, J., Armienta, M. A., Morales-Simfors, N., Ayaz Alam, M., López, D. L., Delgado Quezada, V., . . . Bhattacharya, P. (2020). Arsenic in Latin America: New findings on source, mobilization and mobility in human environments in 20 countries based on decadal research 2010-2020. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 1-139.
- CNA. (2018). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Chihuahua-Sacramento (0830), Estado de Chihuahua*. Ciudad de México: Diario Oficial de la Federación.
- CNA. (2018). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero El Sauz-Encinillas (0807), Estado de Chihuahua*. Ciudad de México: Diario Oficial de la Federación.
- CNA. (2018). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Tabalaopa-Aldama (0835), Estado de Chihuahua*. Ciudad de México: Diario Oficial de la Federación.



- CONAGUA. (2016). *Acuerdo por el que se da a conocer el resultado de los estudios técnicos de aguas nacionales subterráneas del acuífero Tabalaopa-Aldama, clave 0835, en el Estado de Chihuahua, Región Hidrológico-Administrativa Río Bravo*. Mexico: Diario Oficial de la Federación.
- Gutiérrez, M., Reyes, V., Alarcón, M., & Núñez, D. (2016). Acuíferos en Chihuahua: estudios sobre sustentabilidad. *Tecnociencia Chihuahua*, 58-63.
- Huízar, R., Carrillo, J., & Juárez, F. (2016). Fluoruro en el agua subterránea: niveles, origen y control natural en la región de Tenextepango, Morelos, México. *Investigaciones Geográficas*(90), 40-58.
- INEGI. (2009). *Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Chihuahua, Chihuahua*.
- Jones, M., Credo, J., Ingram, J., Baldwin, J., Trotter, R., & Propper, C. (2020). Arsenic Concentrations in Ground and Surface Waters across Arizona Including Native Lands. *Journal of Contemporary Water Research & Education*, 44-60.
- Khair, A., Li, C., Hu, Q., Gao, X., & Wang, Y. (2014). Fluoride and Arsenic Hydrogeochemistry of Groundwater at Yuncheng Basin, Northern China. *Geochemistry International*, 868-881.
- Knappett, P., Li, Y., Hernandez, H., Rodriguez, R., Aviles, M., Deng, C., . . . Datta, S. (2020). Changing Recharge Pathways within an Intensively Pumped Aquifer with High Fluoride Concentrations in Central Mexico. *Science of the Total Environment*, 1-31.
- Mahlknecht, J., Horst, A., Hernandez-Limon, G., & Aravena, R. (2008). Groundwater geochemistry of the Chihuahua City region in the Rio Conchos Basin (northern Mexico) and implications for water resources management. *Hydrological Processes*, 4736–4751.
- Mahlknecht, J., Steinich, B., & Navarro de Leon, I. (2004). Groundwater chemistry and mass transfers in the Independence aquifer, central Mexico, by using multivariate statistics and mass-balance models. *Environmental Geology*, 24.
- National Park Service. (29 de agosto de 2020). *National Park Service*. Obtenido de <https://www.nps.gov/im/chdn/ecoregion.htm>
- NOM-127-SSA1-1994. (2000). *Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización*. Mexico: Diario Oficial de la Federación.



- Ocampo-Astudillo, A., Garrido-Hoyos, S. E., Salcedo-Sánchez, E. R., & Martínez-Morales, M. (2020). Alteration of Groundwater Hydrochemistry Due to Its Intensive Extraction in Urban Areas from Mexico. En E. M. Otazo-Sánchez, A. E. Navarro-Frómata, & V. P. Singh, *Water Availability and Management in Mexico* (págs. 77-97). Mexico: Water Science and Technology Library.
- Pérez-Martínez, I., Villanueva-Estrada, R., Cardona-Benavides, A., Rodríguez-Díaz, A., Rodríguez-Salazar, M., & Guadalupe, J. (2020). Hydrogeochemical reconnaissance of the Atotonilco el Alto-Santa Rita geothermal system in the northeastern Chapala graben in Mexico. *Geothermics*, 1-16.
- PNUD. (2019). *Informe de Desarrollo Humano Municipal 2010-2015 Transformando México desde lo local*. Ciudad de México.
- Podgorski, J. E., Eqani, S. A., Khanam, T., Ullah, R., Shen, H., & Berg, M. (2017). Extensive arsenic contamination in high-pH unconfined aquifers in the Indus Valley. *Science advances*, 1-10.
- Podgorski, J., & Michael, B. (22 de mayo de 2020). Global threat of arsenic in groundwater. *Science*, 368, 845-850.
- Ravenscroft, P., McArthur, J., & Hoque, B. (2001). Geochemical and Palaeohydrological Controls on Pollution of Groundwater by Arsenic. *Arsenic Exposure and Health Effects IV*, 25.
- Raychowdhury, N., Mukherjee, A., Bhattacharya, P., Johannesson, K., Bundschuh, J., Bejarano Sifuentes, G., . . . Storniolo, A. d. (2014). Provenance and fate of arsenic and other solutes in the Chaco-Pampean Plain of the Andean foreland, Argentina: From perspectives of hydrogeochemical modeling and regional tectonic setting. *Journal of Hydrology*, 300-316.
- Reyes-Gómez, V. M., Alarcón-Herrera, M. T., Gutiérrez, M., & Núñez López, & D. (2013). Fluoride and Arsenic in an Alluvial Aquifer System in Chihuahua, Mexico: Contaminant Levels, Potential Sources, and Co-occurrence. *Water Air Soil Pollut*, 1-15.
- SGM. (2018). *Panorama Minero del Estado de Chihuahua*. Secretaría de Economía, Subsecretaría de Minería.
- Shankar, S., Shanker, U., & Shikha. (2014). Arsenic Contamination of Groundwater: A Review of Sources, Prevalence, Health Risks, and Strategies for Mitigation. *The Scientific World Journal*, 1-18.



- Smedley, P., & Kinniburgh, D. (2002). A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. *Applied Geochemistry*, 517- 568.
- Su, C., Wang, Y., Xie, X., & Li, J. (2013). Aqueous geochemistry of high-fluoride groundwater in Datong Basin, Northern China. *Journal of Geochemical Exploration*, 79-92.
- Yadav, I. C., Devi, N., & Singh, S. (2015). Spatial and temporal variation in arsenic in the groundwater of upstream of Ganges River Basin, Nepal. *Environmental Earth Sciences*, 1265-1279.
- Yousefi, M., Ghoochani, M., & Mahvi, A. H. (2018). Health risk assessment to fluoride in drinking water of rural residents living in the Poldasht city, Northwest of Iran. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 426-430.