



Universidad Autónoma de San Luis Potosí

Facultad de Ingeniería

Centro de Investigación y Estudios de Posgrado

**Hidrogeoquímica del arsénico, fluoruro y uranio en sistemas de
flujo de agua subterránea de la región de Salinas de Hidalgo,
San Luis Potosí**

T E S I S

Que para obtener el grado de:

Maestría en Tecnología y Gestión del Agua

Presenta:

Ing. Mariana Torres Nativitas

Director de Tesis:

Dr. Antonio Cardona Benavides

Co - director:

M.C. Cristian Abraham Rivera Armendariz

San Luis Potosí, S. L. P.

Enero de 2024





Universidad Autónoma de San Luis Potosí

Facultad de Ingeniería

Centro de Investigación y Estudios de Posgrado

**Hidrogeoquímica del arsénico, fluoruro y uranio en sistemas de
flujo de agua subterránea de la región de Salinas de Hidalgo,
San Luis Potosí**

T E S I S

Que para obtener el grado de:

Maestría en Tecnología y Gestión del Agua

Presenta:

Ing. Mariana Torres Nativitas

Director de Tesis:

Dr. Antonio Cardona Benavides

Co - director:

M.C. Cristian Abraham Rivera Armendariz

Comité tutorial:

Dr. Israel Razo Soto

Dr. Héctor Hernández Mendoza

San Luis Potosí, S. L. P.

Enero de 2024





UASLP
Universidad Autónoma
de San Luis Potosí



FACULTAD DE
INGENIERÍA

18 de mayo de 2023

**ING. MARIANA TORRES NATIVITAS
P R E S E N T E.**

En atención a su solicitud de Temario, presentada por el **Dr. Antonio Cardona Benavides y el M.C. Cristian Abraham Rivera Armendáriz, Asesor y Coasesor de la Tesis** que desarrollará Usted, con el objeto de obtener el Grado de **Maestra en Tecnología y Gestión del Agua**. Me es grato comunicarle que en la sesión del H. Consejo Técnico Consultivo celebrada el día 18 de mayo del presente, fue aprobado el Temario propuesto:

TEMARIO:

“Hidrogeoquímica del arsénico, fluoruro y uranio en sistemas de flujo de agua subterránea de la región de Salinas de Hidalgo, San Luis Potosí”

1. Introducción.
 2. Caracterización hidrogeológica de la región de Salinas de Hidalgo, San Luis Potosí.
 3. Análisis hidrogeoquímico del arsénico, fluoruro y uranio en el agua subterránea.
 4. Evaluación de la calidad del agua para abastecimiento de la población.
 5. Conclusiones y recomendaciones.
- Referencias.

“MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO”

A T E N T A M E N T E

DR. EMILIO JORGE GONZÁLEZ GALVÁN
DIRECTOR.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE SAN LUIS POTOSÍ
FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCION



ANIVERSARIO DE LA
AUTONOMÍA
UASLP 2023

www.uaslp.mx

Copia. Archivo.
*etn.

Av. Manuel Nava 8
Zona Universitaria • CP 78290
San Luis Potosí, S.L.P.
tel. (444) 826 2330 al39
fax (444) 826 2336

“UASLP, más de un siglo educando con autonomía”

Agradecimientos:

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCyT) por la beca otorgada en el programa de maestría en Tecnología y Gestión del Agua dentro de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí y por el financiamiento otorgado en el proyecto **FORDECyT-PRONACES (377899) “Fuentes geogénicas y mecanismos de movilización de arsénico, fluoruro y uranio a sistemas de flujo de agua subterránea en la Sierra Madre Occidental”** Becario No. 1144068.

Al Dr. Antonio Cardona Benavides, jefe del área de Ciencias de la Tierra de la UASLP por su apoyo y orientación durante el desarrollo de este trabajo. Así como también, por brindarme la oportunidad de ser partícipe de este proyecto.

Al M.C. Cristian Abraham Rivera Armendariz, por todo su apoyo, sus consejos y paciencia. Muchas gracias por el tiempo y la atención invertidas en las sesiones a distancia.

A los doctores Israel Razo Soto y Héctor Hernández Mendoza por todas sus aportaciones que enriquecieron este trabajo y que me ayudaron a comprender mejor.

Dedicatoria:

A Dios y a mis padres. Al primero por protegerme y bendecirme, además de darme el valor que necesito, aún en los momentos más difíciles. A mi madre, por llenarme de amor, ternura, comprensión y por tenerme mucha paciencia en esta etapa de mi vida. A mi padre, amigo y mejor maestro de vida. Gracias por tan sabios consejos, sin los cuales estaría perdida.

A mis hermanos, Juan Pablo, Jared y Santiago, quienes me devuelven la alegría cuando estoy muy triste, trayendo risas y juegos a mi vida.

A Leo, por estar siempre y en todo momento a pesar de la distancia. Por su apoyo incondicional, su amistad sin reservas y su cariño.

A Cynthia y Joel, por su amistad y afecto sincero, convirtiéndose en una familia para mí estando lejos de casa.

A mi familia y amigos que me quieren y están pendientes de mi bienestar. A todos ellos gracias.

Contenido

Resumen	vi
Abstract	vii
1.Introducción. 1	
1.1. Generalidades.	3
1.1.1. Antecedentes.....	3
Trabajos previos en la región de estudio	4
1.1.2. Justificación	6
1.1.3. Hipótesis	7
1.1.4. Objetivo general	7
Objetivos específicos.....	7
1.1.5. Descripción del área de estudio.....	7
Localización y vías de acceso.....	7
Provincia Fisiográfica.....	10
Clima (BS ₁ kwe).....	10
Vegetación	10
1.2. Materiales y métodos de trabajo.....	12
1.2.1 Trabajo de campo	12
Toma de muestras y medición de parámetros de campo	12
1.2.2 Trabajo de laboratorio	14
Determinación de elementos menores, de transición y tierras raras.....	14
Determinación de elementos mayores.....	15
Medición de Cloruros	15
Medición de Nitratos	16
Medición de Sulfatos	16
Medición de Fluoruros	17
1.2.3 Trabajo de gabinete	17
2. Caracterización hidrogeológica de la región de Salinas de Hidalgo, San Luis Potosí. 18	
2.1 Geología e hidrogeología.....	18
2.1.1 Geología regional	18
2.1.2 Geología local	21
2.1.3 Geología estructural	21

2.1.4 Contexto hidrogeológico y definición del acuífero.....	24
Profundidad al nivel del agua	25
Dirección del flujo subterráneo	25
Unidades hidrogeológicas	28
3. Análisis hidrogeoquímico del arsénico, fluoruro y uranio en el agua subterránea.	29
3.1 Validación y análisis de los resultados.....	33
3.1.1. Balance de electroneutralidad	33
3.2 Análisis estadístico.....	43
3.3 Determinación de familias de agua.....	50
3.3.1 Familias de agua por ion dominante	50
3.3.2 Diagramas de Stiff.....	51
3.4 Análisis estadístico por familia de agua.....	53
3.5 Análisis de correlación.....	59
3.6 Índices de saturación.....	62
3.7 Especies acuosas estables del arsénico, fluoruro y uranio.....	65
3.8 Controles de solubilidad con respecto al arsénico, fluoruro y uranio.....	67
4. Evaluación de la calidad del agua para abastecimiento de la población.	68
4.1 Evaluación por arsénico.....	68
4.2 Evaluación por fluoruro	69
4.3 Evaluación por uranio.....	74
5. Conclusiones y recomendaciones.	78
5.1 Modelo hidrogeoquímico conceptual	78
Referencias.	81

Índice de figuras

Figura 1.1. Localización del área de estudio y principales vías de acceso (Rivera, 2021).	9
Figura 1.2. Mapa de Provincias Fisiográficas de la República Mexicana (INEGI, 2001).	11
Figura 1.3. Climograma de la estación climática Villa de Cos (SMN 32059). Elaborada con datos de CONAGUA (1988–2019).	11
Figura 1.4. Localización de los puntos de muestreo (Rivera, 2021)	13
Figura 1.6. Bureta digital utilizada para la titulación.	14
Figura 1.5. Sonda multiparamétrica YSI Professional Plus.	14
Figura 1.8. Espectrómetro de Emisión Óptica (ICP – OES) <i>iCAP 7000 DUO</i>	15
Figura 1.7. Espectrómetro de Masas (ICP – MS) <i>Thermo Scientific, modelo X, serie 2</i>	15
Figura 1.10. Cambio de color a anaranjado – rojizo.	16
Figura 1.9. Determinación de cloruros: muestras a las que se agregó cromato de potasio.	16
Figura 1.11. Equipo HACH, modelo DR/2000.	17
Figura 2.1. Terrenos tectonoestratigráficos de México (Sedlock et al., 1993). Abreviaciones: AB, Falla Agua Blanca; SM, Falla de San Marcos; TMVB, Cinturón Volcánico Trans – mexicano; CUI, Cuicateco; M, Mixteco; T, Tarahumara; Z, Zapoteco.....	19
Figura 2.2. Sección tectonoestratigráfica del Terreno Tepehuano.....	20
Figura 2.3. Mapa geológico de Salinas de Hidalgo (Rivera, 2021).	22
Figura 2.4. Columna estratigráfica del área de estudio (Elaborado con datos de Sociedad Exploradora Minera, 1998; CRM, 1999, 2000 y 2001; SGM, 2005, 2007, 2009 y 2016).	23
Figura 2.5. Acuíferos administrativos que conforman el área de estudio (CONAGUA, 2020a–g; Rivera, 2021).	26
Figura 2.6. Elevación del nivel estático (msnm) (Rivera, 2021).	27
Figura 3.1. Mapa geológico del área de estudio donde se muestran los puntos de muestreo (Rivera,2021).....	30
Figura 3.2. Usos del agua en el área de estudio.....	33

Figura 3.3. Diagrama que relaciona el porcentaje de error y la conductividad eléctrica para las muestras de agua subterránea y superficial.	34
Figura 3.4. Diagrama de Piper: determinación de las familias de agua por ion dominante.	50
Figura 3.5. Diagramas de Stiff: Distribución de las familias de agua en el área de estudio (Rivera, 2021)	52
Figura 3.6. Índice de saturación calculado con respecto a la calcita (CaCO_3).	62
Figura 3.7. Índice de saturación calculado con respecto a la dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$).....	63
Figura 3.8. Índice de saturación calculado con respecto a la calcedonia (SiO_2).	63
Figura 3.9. Índice de saturación calculado con respecto a la fluorita (CaF_2).....	64
Figura 3.10. Índice de saturación calculado con respecto al yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).....	64
Figura 3.11. Diagrama de Eh-pH para arsénico.	66
Figura 3.12. Diagrama de Eh-pH para fluoruro.....	66
Figura 3.13. Diagrama de Eh-pH para uranio.	67
Figura 4.1. Concentraciones de arsénico en el área de estudio que rebasan la NOM-127-SSA1-2021 (Rivera, 2021).....	75
Figura 4.2. Concentraciones de fluoruro en el área de estudio que rebasan la NOM-127-SSA1-2021 (Rivera, 2021).....	76
Figura 4.3. Concentraciones de uranio en el área de estudio que rebasan el límite máximo permisible de 0.01 mg/L propuesto en Alemania (Rivera, 2021).....	77
Figura 5.1. Modelo hidrogeoquímico conceptual.....	79

Índice de tablas

Tabla 2.1. Propiedades hidráulicas y geológicas de las unidades hidrogeológicas del área de estudio.	28
Tabla 3.1. Aprovechamientos hídricos en donde se recolectaron las muestras de agua.	31
Tabla 3.2. Medición de los parámetros fisicoquímicos de campo.	35
Tabla 3.3. Resultados de los análisis químicos de las muestras de agua colectadas: elementos mayores.	38
Tablas 3.4. Resultados de los análisis químicos de las muestras de agua colectadas: elementos menores y traza.	41
Tabla 3.5. Parámetros estadísticos de las muestras de agua en pozos.	48
Tabla 3.6. Parámetros estadísticos de las muestras de agua en norias.	48
Tabla 3.7. Parámetros estadísticos de las muestras de agua en bordos.	49
Tabla 3.8. Parámetros estadísticos de las muestras de agua en lagunas.	49
Tabla 3.9. Número de muestras por tipo de familia de agua en el área de Salinas de Hidalgo.	51
Tabla 3.10. Estadística básica: familia de agua Bicarbonatada sódica.	54
Tabla 3.11. Estadística básica: familia de agua Bicarbonatada mixta.	55
Tabla 3.12. Estadística básica: familia de agua Mixta sódica.	55
Tabla 3.13. Estadística básica: familia de agua Mixta - mixta.	56
Tabla 3.14. Estadística básica: familia de agua Bicarbonatada cálcica.	56
Tabla 3.15. Estadística básica: familia de agua Clorurada sódica.	57
Tabla 3.16. Estadística básica: familia de agua Sulfatada sódica.	57
Tabla 3.17. Estadística básica: familia de agua Mixta cálcica.	58
Tabla 3.18. Estadística básica: familia de agua Clorurada cálcica.	58
Tabla 3.19. Coeficiente de correlación de parámetros fisicoquímicos.	61
Tabla 4.1. Muestras que rebasan los parámetros comprendidos de especificaciones físicas, químicas y de metales y metaloides en la NOM-127-SSA1-2021.	71

Resumen

El agua subterránea constituye la principal fuente de abastecimiento en la región de Salinas de Hidalgo, San Luis Potosí. Estudios anteriores documentan concentraciones de arsénico y fluoruro que exceden los límites permisibles de 10 ug/L y 1.0 mg/L, respectivamente, establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM – 127 – SSA1 – 2021, agua para uso y consumo humano. Recientemente, se demostró en regiones áridas y semiáridas del mundo, que las altas concentraciones de arsénico vienen acompañadas de altas concentraciones de uranio. El objetivo del presente trabajo es evaluar el comportamiento hidrogeoquímico del arsénico, fluoruro y uranio en el agua subterránea de la región de Salinas de Hidalgo, San Luis Potosí, caracterizada por un clima semiárido, de baja precipitación. La geología de la zona incluye rocas marinas sedimentarias, volcánicas, conglomerado polimíctico y depósitos recientes de origen continental. La selección de los puntos de muestreo consideró trabajos previos que reportaron valores elevados de arsénico y fluoruro en el agua. La campaña de muestreo consistió en 31 pozos, 25 norias, 4 bordos, 3 lagunas, una presa y un manantial. Se determinó la alcalinidad en campo, así como los parámetros de temperatura, pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto y el potencial REDOX. En el laboratorio se determinaron elementos mayores, menores y traza mediante ICP – MS e ICP – OES. En el área los valores de concentración obtenidos fueron: As (media=0.0726 mg/L; mín=0.0013 mg/L; máx=0.6885 mg/L), F⁻ (media=1.8 mg/L; mín=0.2 mg/L; máx=8.1 mg/L) y U (media=0.0089 mg/L; mín=0.000005 mg/L; máx=0.0902 mg/L). El análisis hidrogeoquímico incluye la determinación de los tipos de agua y su asociación a las principales unidades hidrogeológicas; se obtuvo un total de nueve familias de agua, predominando la familia bicarbonatada sódica. Los controles de solubilidad del arsénico, fluoruro y uranio son la solubilidad con la fluorita, la calcita, calcedonia y dolomita. Otros factores que considerar son la evaporación y la temperatura. Las concentraciones más elevadas en el área de arsénico, fluoruro y uranio se asocian a las familias cloruradas, vinculadas a su vez con el material granular de relleno de cuenca. El 58.5%, 55.4% y 15.4% de los aprovechamientos de uso público–urbano, público–urbano–agrícola, doméstico y doméstico–pecuario, rebasan el límite máximo permisible de arsénico, fluoruro y uranio, respectivamente de acuerdo con la NOM–127–SSA1–2021 y el límite de concentración máximo establecido en Alemania.

Abstract

Groundwater is the main source of supply in the Salinas de Hidalgo region, San Luis Potosí. Previous studies document concentrations of arsenic and fluoride that exceed the permissible limits of 10 µg/L and 1.0 mg/L, respectively, established in the Official Mexican Standard NOM – 127 – SSA1 – 2021 for water for human consumption. Recently, it has been demonstrated in arid and semi-arid regions worldwide that high concentrations of arsenic are accompanied by high concentrations of uranium. The objective of this study is to evaluate the hydrogeochemical behavior of arsenic, fluoride, and uranium in the groundwater of the Salinas de Hidalgo region, San Luis Potosí, characterized by a semi-arid climate with low precipitation. The geology of the area includes sedimentary marine rocks, volcanic rocks, polymictic conglomerates, and recent deposits of continental origin. The selection of sampling points considered previous works that reported high values of arsenic and fluoride in the water. The sampling campaign included 31 wells, 25 boreholes, 4 reservoirs, 3 lagoons, a dam, and a spring. Alkalinity was determined in the field, as well as the parameters of temperature, pH, electrical conductivity, dissolved oxygen, and redox potential. In the laboratory, major, minor, and trace elements were determined using ICP-MS and ICP-OES. The concentration values obtained in the area were: As (mean=0.0726 mg/L; min=0.0013 mg/L; max=0.6885 mg/L), F- (mean=1.8 mg/L; min=0.2 mg/L; max=8.1 mg/L), and U (mean=0.0089 mg/L; min=0.000005 mg/L; max=0.0902 mg/L). Hydrogeochemical analysis includes the determination of water types and their association with the main hydrogeological units; a total of nine water families were obtained, with the bicarbonate-sodium family predominating. The solubility controls of arsenic, fluoride, and uranium include solubility with fluorite, calcite, chalcedony, and dolomite. Other factors to consider are evaporation and temperature. The highest concentrations in the area of arsenic, fluoride, and uranium are associated with chloride families, linked in turn to the granular fill material of the basin. 58.5%, 55.4%, and 15.4% of public-urban, public-urban-agricultural, domestic, and domestic-livestock uses exceed the maximum permissible limit for arsenic, fluoride, and uranium, respectively, according to NOM–127–SSA1–2021 and the maximum concentration limit established in Germany.

1. Introducción.

El agua subterránea es un recurso esencial sin el cual la vida no podría sustentarse. Proporciona el 97% del agua dulce en el planeta; no limitando su uso como agua potable, sino también como agua para irrigación y para la industria (Jakeman *et al.*, 2016). El desarrollo de la crisis hídrica a nivel global, referida en términos de calidad, es provocada por un conjunto de variables económicas, demográficas y ambientales que afecta severamente las regiones áridas y semiáridas en donde el agua subterránea es la fuente principal de suministro (Edmunds, 2009). Para satisfacer las necesidades hídricas en sus diferentes aplicaciones como: abastecimiento humano, ganadería, agricultura o industria es preciso brindar el agua con la calidad requerida (Iglesias *et al.*, 2021).

Es importante reconocer que las actividades antropogénicas, como el uso de pesticidas, herbicidas, combustibles fósiles o la minería y metalurgia (Organización Mundial de la Salud, 2023) no son las únicas que amenazan la calidad del agua subterránea sino también la contaminación por procesos naturales. En varios países del mundo como la India, Bangladesh, China, Vietnam, Taiwán, España, Portugal, Hungría, Nicaragua, Ecuador, Chile, Argentina, Perú, Brasil, Uruguay y México se han reportado concentraciones de arsénico y fluoruro de origen geogénico por encima del valor recomendado según la OMS (0.01 mg/L para arsénico y 1.5 mg/L para fluoruro) (Ormachea y Quintanilla, 2014).

A pesar de encontrarse de manera natural en el ambiente, la exposición crónica al arsénico por arriba de 0.01 mg/L inhibe la función motora e intelectual en niños, incrementa el riesgo de padecer cáncer, así como, enfermedades del corazón (Smith *et al.*, 2018; Mihajlov *et al.*, 2020). Por otro lado, las concentraciones de fluoruro por encima de lo estipulado ocasionan fluorosis dental, esquelética y paralizante (OMS, 2017; Oluwafemi *et al.*, 2021).

En México, la NOM-127-SSA1-2021, agua para uso y consumo humano establece un límite máximo de 0.01 mg/L para arsénico y de 1.0 mg/L para fluoruro. Sin embargo, el contenido natural de arsénico y fluoruro en el agua subterránea, principalmente en el centro-norte del país, se encuentra desde 0.025-0.419 mg/L (Ortega-Guerrero, 2009) y 0.001-25 mg/L (Huizar *et al.*, 2015), respectivamente. Estudios previos hallaron una correlación positiva entre arsénico y fluoruro en los estados de Sonora y Durango (Bocanegra, 2006), su co-ocurrencia en el agua subterránea se asocia generalmente a rocas volcánicas (Alarcón-Herrera *et al.*, 2020).

Previamente, estudios realizados en el norte de la República Mexicana, reportaron concentraciones de uranio de hasta 0.138 mg/L vinculados a rocas volcánicas y volcanoclásticas, en donde también

se observó una correlación positiva con el arsénico (Banning *et al.*, 2012; Reyes–Cortés *et al.*, 2012). El uranio se encuentra presente en las fuentes de agua como complejos $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2^{2-}$ y $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3^{4-}$ (Water Quality Association, 2013). La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US–EPA, por sus siglas en inglés) establece como nivel máximo de contaminación de uranio 0.03 mg/L. En tanto, las guías canadienses fijan un nivel de concentración máximo de 0.02 mg/L para el agua de consumo, dado que la exposición crónica al uranio puede afectar los riñones (Water, C.D, 2019). No obstante, en México no existe un límite fijo para las concentraciones de uranio (Banning *et al.*, 2012). La NOM–127–SSA1–2021 especifica límites permisibles en términos de radiación alfa y beta totales.

Casi toda el agua subterránea tiene su origen en la precipitación de agua de lluvia o por el derretimiento de la nieve que se infiltra a través del suelo hasta alcanzar los sistemas de flujo que viajan entre las capas que constituyen el material geológico (Freeze y Cherry, 1979). En 1963, Tóth definió un sistema de flujo subterráneo como: “Un conjunto de líneas de flujo en el que dos líneas de flujo adyacentes en un punto de la región de flujo permanecen adyacentes en toda la región”. Tal como lo señala Fagundo-Castillo *et al.*, (2014) entender cómo inciden estos sistemas de flujo en un sitio, así como su recorrido y sus características físicas y químicas (esto debido a la interacción del agua que se infiltra con el suelo) es importante ya que se trata de un elemento que forma parte de un sistema integral en donde lo que ocurra con uno de sus elementos inciden en el funcionamiento general de un ecosistema.

Para entender dichos sistemas complejos la hidrogeoquímica es una herramienta útil con la cual es posible entender a qué procesos es sometida el agua subterránea desde su origen hasta su descarga (Ramos-Leal *et al.*, 2007). En la actualidad existe una amplia variedad de técnicas hidrogeoquímicas que permiten definir las reacciones en el agua subterránea (Cardona y Carrillo, 2006; Bibiano *et al.*, 2015; Tanui *et al.*, 2020). Mediante dichas técnicas se evaluará el comportamiento hidrogeoquímico del arsénico, fluoruro y uranio en los sistemas de flujo subterráneo de la región de Salinas de Hidalgo, San Luis Potosí, en donde anteriormente se habían documentado altas concentraciones de arsénico, fluoruro y uranio (Bocanegra, 2006; Cadenas, 2021).

Dado que el papel del agua en la economía, el ecosistema y su contribución a la salud de las personas depende de factores ambientales, socioeconómicos y geográficos, evaluar el mecanismo

de movilización del arsénico, fluoruro y uranio desde la fuente hasta la descarga aportaría información valiosa para la toma de decisiones en cuanto a materia hídrica.

1.1.Generalidades.

1.1.1. Antecedentes.

Comprender los procesos que controlan la química del agua subterránea es indispensable para garantizar su uso (Appelo y Postma, 2005). Desde comienzos del siglo pasado se desarrollaron métodos y enfoques que facilitan el entendimiento hidrogeoquímico del agua subterránea (Malagón *et al.*, 2021). Sin embargo, a principios de la década de 1950 estas técnicas han mejorado con el fin de alcanzar un mayor entendimiento en cuanto a los procesos hidrogeoquímicos en los sistemas de flujo subterráneo, y a la influencia de las características geológicas, mineralógicas e hidrológicas en el flujo y química de estos sistemas (Glynn y Plummer, 2005). Algunos métodos incluyen el concepto de facies hidroquímicas (variaciones en la composición química del agua a lo largo de las líneas de flujo); reacciones de óxido-reducción; equilibrio termodinámico, entre otros (Glynn y Plummer, 2005).

En años recientes, la degradación en la calidad del agua y su contaminación por elementos como el arsénico, fluoruro o uranio son serios problemas que aquejan a la población, especialmente en regiones áridas y semiáridas con recursos hídricos escasos (Pandit *et al.*, 2022). Diversos trabajos alrededor del mundo y en México, evalúan la calidad del agua subterránea, utilizando datos hidrogeoquímicos y simulaciones de modelos de reacciones hipotéticas (Glynn y Plummer, 2005).

Mukherjee *et al.* (2009) explicaron los probables mecanismos que controlan la composición química del agua subterránea, incluyendo los efectos del clima y la geología, en la cuenca de Huhhot, Mongolia Interior, China. Utilizando datos isotópicos, se indicó que la recarga ocurre en el sistema fracturado y se ve poco afectada por evaporación. La facie dominante es Ca–Na–HCO₃–Cl con una tendencia evolutiva a lo largo del gradiente hidráulico regional. La evolución de la composición de iones mayores es dominada por la meteorización de feldespatos y el equilibrio con la gibbsita y la anortita. Se encontró que la movilización del arsénico ocurre a medida que el agua de recarga fluye a través de las rocas volcánicas fracturadas, incrementando su concentración a lo largo de la línea de flujo.

Ortega–Guerrero (2009) estudió a través de técnicas hidrogeológicas, hidrogeoquímicas e isotópicas, el origen y distribución del arsénico, fluoruro y otros elementos traza disueltos en el agua subterránea de la cuenca tributaria Lerma–Chapala, México. Al noreste de la cuenca (500

km²) las concentraciones de arsénico y fluoruro se encontraron de hasta 0.12 mg/L y 16.0 mg/L, respectivamente. Estas concentraciones se deben a la disolución de feldespatos sódicos, minerales de arsénico (arsenolita, arsenopirita) y fluorita. Los isótopos estables indican un origen meteórico local del agua subterránea en donde no ocurrió evaporación.

Mejía-González *et al.* (2014) determinaron los mecanismos que influyen en la movilización del arsénico en la Comarca Lagunera, Coahuila y Durango, México. El diagrama de Piper reveló una evolución de agua cálcica hacia agua sódica; al ocurrir el intercambio catiónico el sodio en las arcillas es desplazado por el calcio del agua. Al disminuir el calcio en el agua se promueve la disolución de la calcita, consumiendo iones de hidrógeno durante la reacción y, por lo tanto, aumentando el pH. Las concentraciones de arsénico que sobrepasan la NOM – 127 – SSA1 – 2021 se vincularon a un pH más elevado (>8.1), debido al proceso de desorción.

Onipe *et al.* (2021) reportaron concentraciones de fluoruro entre 3.92 y 4.95 mg/L en la provincia de Limpopo, Sudáfrica. Determinaron que el principal tipo de agua es sódica clorurada (Na-Cl). Se encontró que los minerales de arcilla, moscovita y clorita contribuyen mayormente al incremento de fluoruro en el agua subterránea; en tanto que, la composición química del agua es controlada por intercambio iónico. Se observó que, a menores profundidades las concentraciones de fluoruro son mayores, ya que las rocas poseen altos contenidos de sílice, a la vez que de fluoruro; la temperatura y el pH resultaron ser los factores que contribuyen a su disolución.

Pandit *et al.* (2022) registraron concentraciones de uranio entre 0.0006 – 0.26 mg/L en la región árida del oeste de Rajasthan y el norte de Gujarat, India; 30% de las muestras (n = 265) se encontró por encima del límite permisible de 0.03 mg/L (OMS). Las facies hidroquímicas (diagrama de Piper) se clasificaron con base en el contenido de Sólidos Disueltos Totales; las muestras con mayores concentraciones de uranio fueron clasificadas como agua salina, Na-Cl (SDT > 2000 mg/L) que pudo originarse por la interacción agua-roca, intrusión de agua marina, agua fósil y evaporación. Por medio de un análisis de componentes principales, se destacó que los mecanismos de liberación del uranio se deben a la interacción agua-roca a través de la meteorización de silicatos y carbonatos, y a la disolución de minerales de evaporita, calcita y dolomita. La presencia de uranio se debe a la disolución de carnotita.

Trabajos previos en la región de estudio

Bocanegra (2006), registró concentraciones de arsénico (0.025 – 0.15 mg/L) y de fluoruro (3.1 – 5.4 mg/L) en las zonas Altiplano, Centro y Media de San Luis Potosí, las cuales excedían el límite

máximo permisible según la NOM-127-SSA1-2021 (anteriormente NOM-127-SSA1-1994) en un 28.5% para arsénico y un 11.1% para fluoruro. El muestreo incluyó determinar la calidad del agua en comunidades con más de 500 habitantes para así poder evaluar el riesgo en la salud. Un total de 157 comunidades, pertenecientes a 33 municipios, fueron evaluadas: las muestras de orina revelaron que 14 de los 33 municipios (75,000 habitantes) se ven afectados ya sea por arsénico o fluoruro (61,730 afectados por fluoruro, 12,840 afectados por arsénico). De acuerdo con lo anterior, la autora señaló que el riesgo de padecer hiperpigmentación y complicaciones vasculares por arsénico es de 1 a 35 veces. Mientras que, por fluorosis dental en niños el riesgo de padecerlo es de 1 a 7 veces.

León (2020), formuló una propuesta de estrategias de gestión hídrica mediante un modelo numérico de aguas subterráneas en el acuífero de Salinas de Hidalgo, dada la problemática respecto a los incidentes de bajo rendimiento y abatimiento que inciden de manera directa en la cantidad de agua aprovechable para la población. El estudio señala que el acuífero está siendo sometido a un aprovechamiento intensivo, ya que la cantidad de agua extraída junto con la evapotranspiración es mayor a la recarga. Se plantearon tres escenarios futuros para el año 2029, siendo el más factible que exista un aumento en los caudales de bombeo, dado el incremento poblacional y las actividades agrícolas e industriales en la región; las zonas de abatimiento se registrarán en las áreas de mayor extracción para uso agrícola y en las porciones este y oeste del acuífero. De manera general, los abatimientos reflejados en los tres escenarios son de 6–8 metros en 10 años. La autora propone generar información meteorológica, geológica, hídrica e hidrogeológica más amplia, además de concientizar a la población y de crear un Comité Técnico de Aguas Subterráneas en Salinas.

Cadenas (2021), realizó una caracterización hidrogeoquímica del acuífero de Salinas de Hidalgo con el fin de determinar su calidad para consumo. Se determinó que el acuífero está constituido por rocas ígneas intrusivas y extrusivas, así como vulcanosedimentarias y sedimentarias continentales marinas. Para un total de 35 muestras (23 norias y 12 pozos) se establecieron nueve familias de agua, destacándose la Bicarbonatada Sódica en un 52%. De acuerdo con la NOM-127-SSA1-1994, los parámetros que la rebasan son aluminio, arsénico, cloruro, dureza total, hierro, fluoruro, manganeso, nitrato, sodio, sulfatos y sólidos disueltos totales. Los parámetros que más muestras rebasaron fueron el hierro (74.3%), el arsénico (31.4%) y el fluoruro (42.9%), debido a la geología del lugar y a la presencia de zonas mineralizadas.

González (2022), estableció un modelo hidrogeológico conceptual, basado en la caracterización geológica, geofísica e hidrogeológica con la cual pueda explicar el origen de la presencia de arsénico en un pozo de uso público–urbano de la comunidad de Salitral de Carrera, Villa de Ramos. Lo anterior con la finalidad de brindar información para facilitar el acceso al agua limpia y saneamiento como parte de uno de los objetivos de desarrollo sostenible. Según el modelo conceptual, los principales cuerpos que almacenan el agua subterránea son el medio granular permeable inferior y superior; las zonas de recarga las constituyen los arroyos, las zonas más permeables del suelo, las rocas volcánicas basálticas y en menor medida, los afloramientos de las secuencias mesozoicas de baja permeabilidad en los flancos de las sierras. Las lagunas que fungen como parte de la descarga local concentran elementos debido a la alta evaporación. Se estima que el posible origen del arsénico sea la interacción del agua con la matriz del acuífero.

Mex (2023), evaluó los sistemas de flujo de agua subterránea en la región centro–sur del acuífero de Salinas de Hidalgo mediante la implementación de un modelo numérico de flujo, con el fin de predecir el comportamiento de los niveles de agua subterránea para el año 2038, ya que en la actualidad presenta un déficit de volumen disponible. El autor concluye que en la región centro–sur pudieran existir abatimientos de hasta 10.5 metros bajo los niveles de extracción que se tienen actualmente. Por lo tanto, sugiere que cuando existan volúmenes disponibles para otorgar concesiones, se dé prioridad a las regiones cercanas a las entradas de flujo subterráneo, ya que son las que presentan menores abatimientos.

1.1.2. Justificación

Para mejorar la comprensión de los sistemas de agua subterránea en la zona de Salinas de Hidalgo en el estado de San Luis Potosí, debido a la escasa información regional y local relacionada con la hidrogeoquímica del arsénico, fluoruro y uranio, este estudio integra información geológica junto con datos hidrogeoquímicos para conocer los procesos que actúan en la interacción agua – roca que permite y/o limita las concentraciones de estos elementos traza en el agua subterránea, aspectos fundamentales para la planificación de los recursos hídricos. El enfoque multi – método aquí presentado ofrece un ejemplo de una región semiárida típica sometida a un estrés hídrico, siendo la metodología y los resultados de este estudio aplicables y transferibles a numerosas regiones que se enfrentan a problemas similares en México y el mundo.

1.1.3. Hipótesis

La composición química del agua subterránea y su correlación con ciertos elementos menores y traza (p.ej. arsénico, fluoruro y uranio) en la región de Salinas de Hidalgo, San Luis Potosí, México, son controlados por la interacción por la interacción de las rocas volcánicas y sedimentos de relleno de cuenca por los que circula el agua.

1.1.4. Objetivo general

Evaluar el comportamiento hidrogeoquímico del arsénico, fluoruro y uranio en el agua subterránea de la región de Salinas de Hidalgo, San Luis Potosí.

Objetivos específicos

- Cuantificar las concentraciones de arsénico, fluoruro y uranio, así como las familias de agua.
- Evaluar la relación entre los parámetros de campo (temperatura, pH, conductividad eléctrica, potencial redox y oxígeno disuelto) del agua subterránea con las concentraciones de arsénico, fluoruro y uranio.
- Relacionar las concentraciones de arsénico, fluoruro y uranio con las unidades hidrogeológicas y la dirección de flujo subterráneo.
- Identificar las zonas en las que el agua subterránea presenta concentraciones de parámetros químicos inorgánicos que rebasan los límites permisibles establecidos en la NOM-127-SSA1-2021.

1.1.5. Descripción del área de estudio

Localización y vías de acceso

La zona de estudio se ubica 100 km al noroeste de la capital de San Luis Potosí. Se encuentra entre los paralelos 23° 18' y 22° 28' de latitud norte y los meridianos 102° 16' y 101° 31' de longitud oeste. Cubre una superficie de 9679.35 km², abarcando en su totalidad los municipios de General Pánfilo Natera, Villa González Ortega (Zacatecas) y Villa de Ramos (San Luis Potosí); parcialmente los municipios de Noria de Ángeles, Luis Moya, Ojocaliente (Zacatecas), Santo Domingo y Salinas de Hidalgo (San Luis Potosí).

El acceso a los aprovechamientos hídricos del área de estudio se efectúa mediante la carretera federal no. 49, tramo San Luis Potosí-Zacatecas (Sociedad Exploradora Minera, S.A de C.V, 1998;

Consejo de Recursos Minerales, 2001; Servicio Geológico Mexicano, 2005). También cuentan con carreteras estatales y múltiples caminos de terracería y brechas que unen poblados importantes (Figura 1.1).

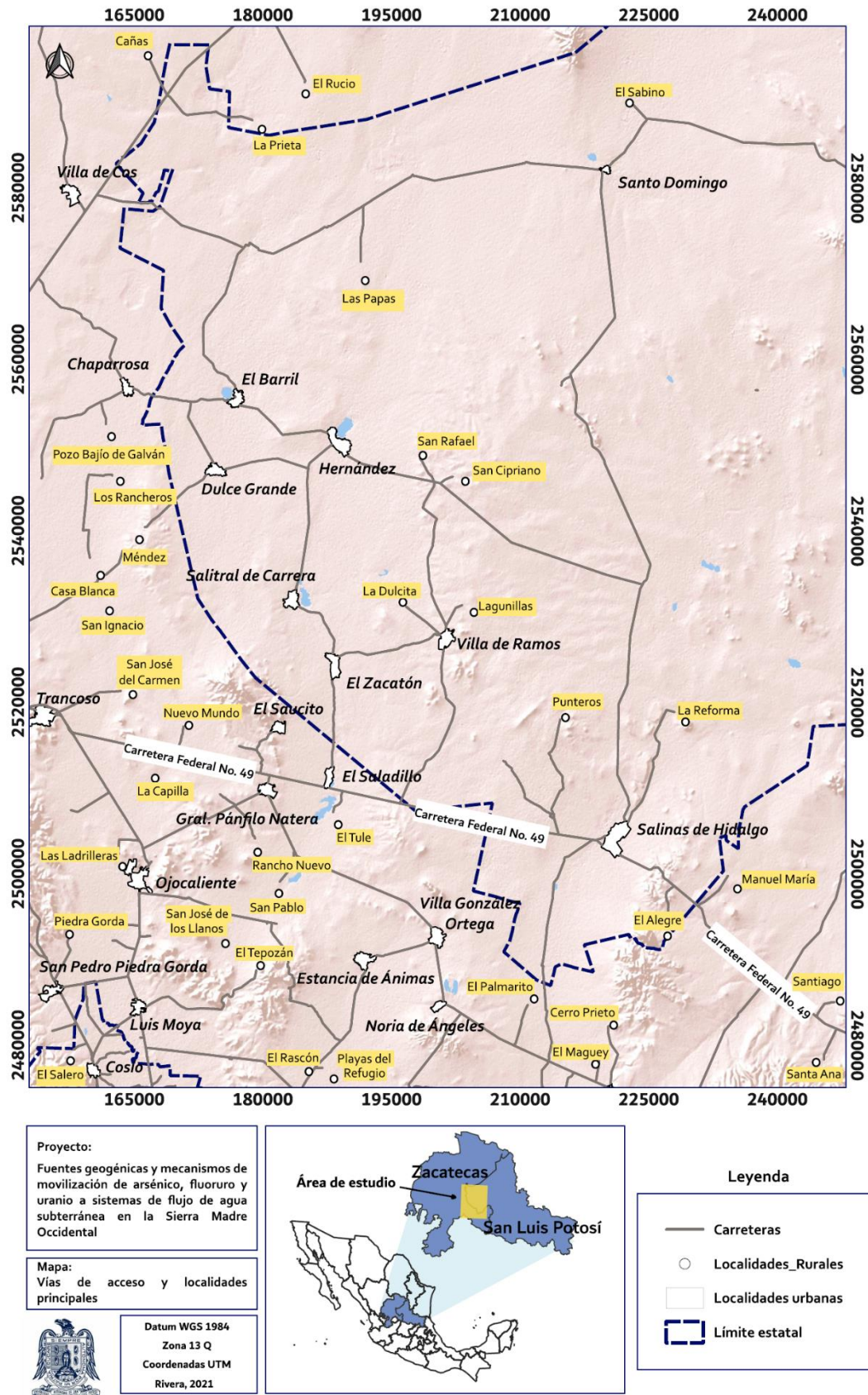


Figura 1.1. Localización del área de estudio y principales vías de acceso (Rivera, 2021).

Provincia Fisiográfica

La zona estudiada se ubica en la parte centro – oeste de la Provincia Fisiográfica denominada Mesa Central, la cual está limitada al norte y oriente con la Sierra Madre Oriental, al oeste con la Sierra Madre Occidental y al sur con el Eje Neovolcánico (Figura 1.2). Se trata de una planicie elevada localizada en la parte central de México, dividida a su vez en dos regiones: 1) la región sur, con niveles más elevados en donde se presentan montañas cubiertas en su mayor parte por rocas volcánicas cenozoicas con un estado de erosión activo, desniveles más pronunciados y rasgos estructurales (fallas normales) menos erosionados; 2) la región norte con un estado de erosión más avanzado, desniveles menores y cuencas, algunas endorreicas, continentales rellenas de sedimentos aluviales y lacustres (Nieto – Samaniego *et al.*, 2005).

Una pequeña porción del área de estudio, en el oeste, pertenece a la Sierra Madre Occidental considerado el más largo y continuo de los sistemas montañosos de México. La Sierra tiene la forma de una meseta ligeramente inclinada al oriente que ha sido dislocada por fallas y cortada por corrientes que descienden tanto al Golfo de California y el Océano Pacífico, como al Altiplano Mexicano (Morán Zenteno, 2007 como se citó en González Elizondo *et al.*, 2012). Su flanco occidental es sumamente escarpado, con desniveles de hasta 1800 m de profundidad. En contraste, las laderas de la vertiente oriental son mucho menos abruptas por la gradual diferencia de niveles en su transición hacia el Altiplano. La Sierra Madre Occidental tiene una elevación media de 2500 m, pero alcanza los 3340 m (González Elizondo *et al.*, 2012). La zona de estudio se distingue por ser una llanura interrumpida por sierras cuyas elevaciones van de los 2020 msnm a los 2730 msnm (Caballero *et al.*, 2000; SGM, 2005).

Clima (BS₁kwe)

De acuerdo con la clasificación de Köppen, modificada por Enriqueta García (1964), el clima de la región de estudio es semiárido con lluvias en verano, comprendidas entre los meses de junio y septiembre. Este clima se caracteriza por presentar una temperatura media anual de 12–18 °C, verano caliente (> 18°C), precipitaciones anuales menores a 450 mm, un porcentaje de lluvias invernales < 10.2% y una oscilación térmica de 7–14°C (Figura 1.3).

Vegetación

La vegetación en la zona es de tipo desértico, destacándose el matorral desértico micrófilo propio de los terrenos planos; esta vegetación corresponde a arbustos de hoja pequeña que incluyen la *Larrea Tridentata* (gobernadora) y *Flourensia Cernua* (hojasén). Se destacan también las cactáceas

y matorrales formados por plantas espinosas: nopaleras, pastizales ralos, mezquites y biznagas (Mora–Donjuán *et al.*, 2013).



Figura 1.2. Mapa de Provincias Fisiográficas de la República Mexicana (INEGI, 2001).

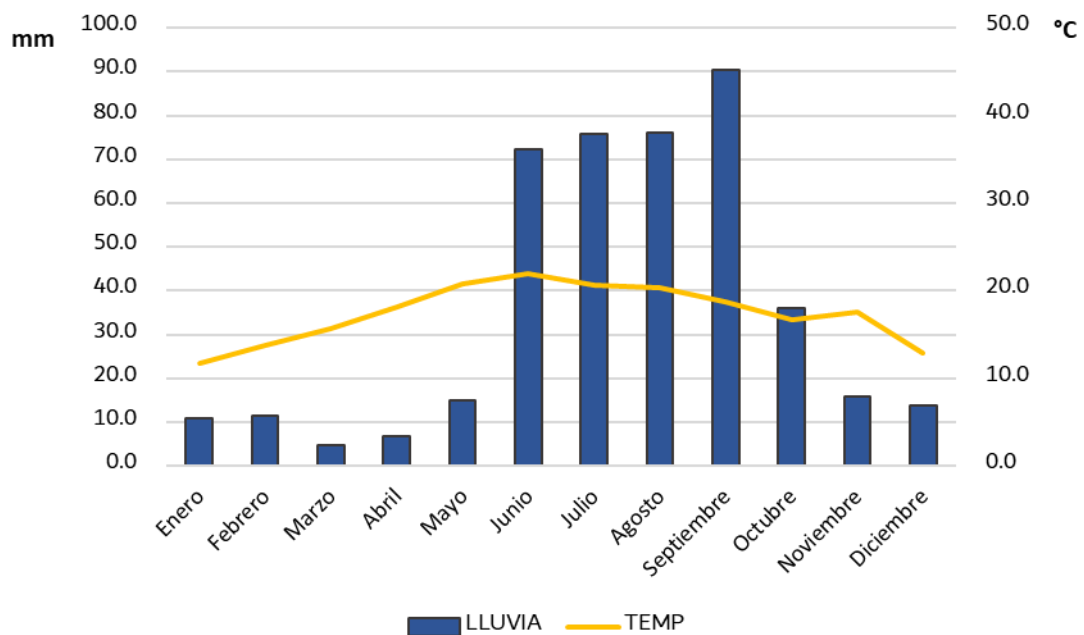


Figura 1.3. Climograma de la estación climática Villa de Cos (SMN 32059). Elaborada con datos de CONAGUA (1988–2019).

1.2. Materiales y métodos de trabajo

La planeación, recopilación e interpretación de los datos en esta investigación se realizó en cuatro etapas: a) trabajo de campo, b) trabajo de laboratorio, c) trabajo de gabinete y d) validación y análisis de los resultados.

1.2.1 Trabajo de campo

Toma de muestras y medición de parámetros de campo

La selección de los puntos de muestreo se realizó con base en la información de las regiones que documentaban altas concentraciones de arsénico, fluoruro y uranio en el área de estudio. Los puntos de muestreo validados fueron aquellos en donde se obtuvo acceso, que presentaron las mayores facilidades para adaptar el equipo de medición de parámetros de campo y que, en el caso de los pozos, se encontraban en condiciones de operación.

La toma de muestras en campo se conformó por 65 muestras de agua obtenidas en el año 2021, durante los meses de junio y julio. Los diferentes aprovechamientos hídricos muestreados incluyeron; 31 pozos, 25 norias, 4 bordos, 3 lagunas, un manantial (“Yoliátl”) y presa (“Piedras Negras”) (Figura 1.4).

Los parámetros fisicoquímicos medidos en campo: 1) temperatura, 2) pH, 3) conductividad eléctrica, 4) potencial de óxido – reducción (ORP) y 5) oxígeno disuelto se registraron mediante una sonda multiparamétrica YSI Professional Plus (Figura 1.5), exceptuando la alcalinidad de campo la cual se determinó mediante el método potenciométrico utilizando un equipo portátil (Figura 1.6).

Durante el registro de los parámetros de campo se utilizó una celda de aislamiento con la cual se limita la interacción del agua extraída de los aprovechamientos con la atmósfera, evitando así que el agua disuelva oxígeno adicional al que contiene y que se libere dióxido de carbono, previamente a la medición de los parámetros.

El equipo multiparamétrico se calibró con diferentes soluciones buffer para (pH 4.0/7.0), conductividad eléctrica (1413 $\mu\text{S}/\text{cm}$), potencial de óxido – reducción (240 mV) y oxígeno disuelto. Las muestras de agua colectadas se depositaron en botellas de polietileno de alta densidad. Previo a la toma de la muestra, las botellas se enjuagaron tres veces con la misma agua del aprovechamiento.

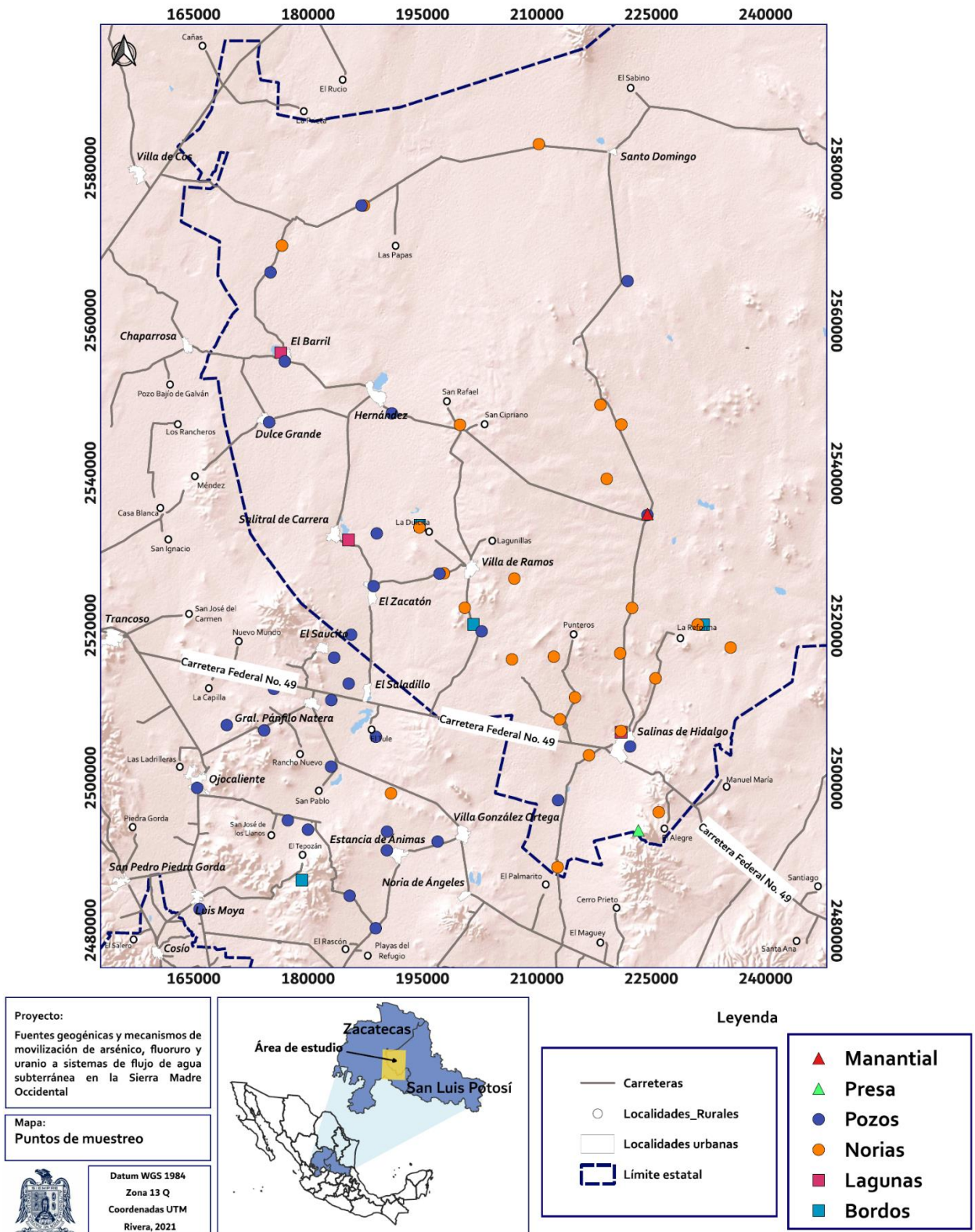


Figura 1.4. Localización de los puntos de muestreo (Rivera, 2021).



Figura 1.5. Sonda multiparamétrica YSI Professional Plus.



Figura 1.6. Bureta digital utilizada para la titulación.

Para cationes mayores (sodio, potasio, calcio y magnesio) y elementos traza (hierro, boro, arsénico, zinc, aluminio, bario, cobre, manganeso, litio, bromo, uranio, selenio, entre otros) las muestras se filtraron, pasando por una membrana de acetato de celulosa con aberturas de diámetro de $0.45\ \mu\text{m}$, mediante una jeringa adaptada al filtro. Con este proceso es posible remover la mayoría de las bacterias y partículas suspendidas. Adicionalmente, a estas muestras se agregó ácido nítrico (HNO_3) ultrapuro para disminuir el pH a 2.

Las muestras también se filtraron para nitratos, nitritos y aniones (bicarbonato, carbonato, cloruro, sulfato y fluoruro). Sin embargo, se agregó ácido sulfúrico únicamente para las primeras dos.

1.2.2 Trabajo de laboratorio

Determinación de elementos menores, de transición y tierras raras

La determinación de elementos menores (aluminio, arsénico, cadmio, cromo, hierro, litio, manganeso, uranio, zinc, entre otros), de transición (aquellos que se encuentran en los grupos 3 – 12 de la tabla periódica) y tierras raras se llevó a cabo por medio de un Espectrómetro de Masas con Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP – MS, por sus siglas en inglés) (Figura 1.7) ubicado en el Instituto de Geología UASLP.

Este método es altamente sensible y capaz de determinar, cuantitativamente, casi todos los elementos en la tabla periódica que tengan un potencial de ionización menor que el potencial de ionización del argón a concentraciones muy bajas (partes por trillón) (Mansilla *et al.*, 2022).

Consiste en transportar la muestra por medio de una bomba peristáltica a un nebulizador donde es transformada en aerosol gracias a la acción del gas argón. Este aerosol es transportado a la zona de ionización, en donde por la temperatura alcanzada por el plasma (hasta 8000 °K) se logra la extracción de un electrón de la capa exterior del átomo, produciéndose un ion con carga positiva más un electrón (Mansilla *et al.*, 2022; Harvey, s.f; Raja y Barron, s.f). Los iones positivos son separados por un filtro de masas (diferencias de la trayectoria de los iones en un campo eléctrico), produciéndose una señal eléctrica, que es proporcional a la cantidad de iones que salen del filtro de masas (Mansilla *et al.*, 2022).

Determinación de elementos mayores

Para el caso del sodio, potasio, magnesio, calcio y silicio se utilizó el equipo de Espectroscopía de Emisión Atómica con Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP – OES) (Figura 1.8) localizado en el Instituto de Geología UASLP. Mediante este método las muestras son introducidas en forma líquida, transformadas en aerosol mediante un nebulizador y excitadas por medio de un plasma de argón. Las emisiones de los átomos excitados se recogen mediante un sistema óptico basado en un policromador combinado con detectores CCD, obteniendo espectros de emisión para las líneas seleccionadas en cada elemento (CSIC, 2019).



Figura 1.7. Espectrómetro de Masas (ICP – MS) *Thermo Scientific, modelo X, serie 2.*

Medición de Cloruros

La determinación de cloruros se basa en el método de titulación con nitrato de plata utilizando como indicador cromato de potasio, de acuerdo con la NMX – AA – 073 – SCFI – 2001. La plata reacciona con los cloruros para formar un precipitado de cloruro de plata de color blanco.



Figura 1.8. Espectrómetro de Emisión Óptica (ICP – OES) *iCAP 7000 DUO.*

Al agotarse el ion cloruro empieza la precipitación del cromato. La formación del cromato de plata puede identificarse por el cambio de color a anaranjado – rojizo, que es cuando la titulación se da por terminada (Figuras 1.9 y 1.10).



Figura 1.9. Determinación de cloruros: muestras a las que se agregó cromato de potasio.

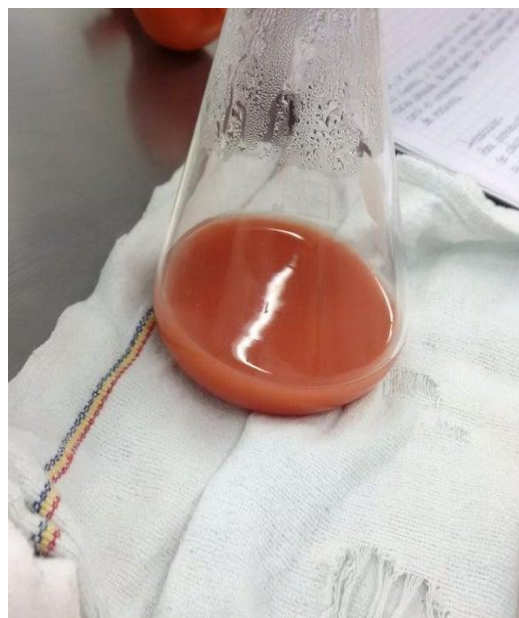


Figura 1.10. Cambio de color a anaranjado – rojizo.

Medición de Nitratos

En consonancia con la NMX – AA – 079 – SCFI – 2001, se aplicó el método de sulfato de brucina. La brucina es un complejo que reacciona con los nitratos bajo condiciones ácidas y temperatura elevada para producir un complejo de color amarillo. La intensidad del color desarrollado es función del tiempo y la temperatura; ambos factores deben ser cuidadosamente controlados. Para ejecutar las mediciones de absorbancia se utilizó el equipo HACH, modelo DR / 2000 (Figura 1.11).

Medición de Sulfatos

El ion sulfato es precipitado en medio ácido con cloruro de bario, de tal manera que se forman cristales de sulfato de bario de tamaño uniforme, produciéndose una turbidez medible y proporcional a la concentración de sulfatos (NMX – F – 518 – 1992).

Medición de Fluoruros

Uno de los métodos permitidos para la cuantificación de fluoruro es el método potenciométrico con electrodo selectivo de iones, el cual es adecuado para concentraciones de fluoruro desde 0.1 a 10 mg/L (Guevara y Deogracias, 2008). La técnica analítica de electrodo selectivo de iones es utilizada para determinar la actividad de los iones en solución acuosa midiendo el potencial eléctrico (Raja y Barron, s.f).



Figura 1.11. Equipo HACH, modelo DR/2000.

1.2.3 Trabajo de gabinete

Previamente se realizó una compilación de información referente a la zona de estudio, lo que proporcionó una visión en la comprensión de la geología, la hidrogeología, el relieve, el clima y la vegetación. Posteriormente, se seleccionaron los sitios de muestreo con base en las concentraciones de arsénico y fluoruro reportadas en trabajos previos (Bocanegra, 2006; Banning *et al.*, 2012; Cadenas, 2021). Con la finalidad de comprender las condiciones hidrogeoquímicas, se utilizaron diferentes programas con los que fue posible representar, analizar y evaluar la información generada en este estudio.

Para la obtención de los balances de electroneutralidad, porcentajes de error y diversos tipos de gráficos (diagramas de Piper, Stiff, entre otros), que facilitan el entendimiento del comportamiento

hidrogeoquímico, se utilizó el programa AquaChem 4.0. El cálculo de las especies y las reacciones hidrogeoquímicas involucradas en la evolución del agua subterránea, se realizó con la ayuda del programa PHREEQC. Este programa se aplica para la caracterización geoquímica de los solutos en aguas naturales, mediante diversos cálculos hidrogeoquímicos y las interacciones entre iones en solución y el medio geológico presente (Pérez, 2008).

2. Caracterización hidrogeológica de la región de Salinas de Hidalgo, San Luis Potosí.

2.1 Geología e hidrogeología

2.1.1 Geología regional

La zona de estudio se ubica dentro de la Mesa Central. En 1959, Raisz la definió como: “una cuenca rodeada por montañas más elevadas. Más alta y plana que la provincia Cuencas y Sierras (localizada al norte). En lugar de sierras elongadas, ésta tiene áreas poco elevadas, principalmente disectando rocas volcánicas antiguas”. Se localiza en la parte central de México y se caracteriza por amplias llanuras interrumpidas por sierras dispersas, en su mayoría de naturaleza volcánica (INEGI, 2009).

Sedlock *et al.*, (1993) proponen que la República Mexicana y el norte de Centro América se encuentran divididos en 17 terrenos tectonoestratigráficos (Figura 2.1). Según lo anterior, la zona de estudio se encuentra en la parte central del terreno Tepehuano (Figura 2.2) que abarca en su totalidad Aguascalientes, gran parte de Zacatecas y algunas porciones de los estados de Chihuahua, Coahuila, Durango, Guanajuato, Jalisco, Querétaro y San Luis Potosí.

En el extremo norte de Zacatecas, sur de Coahuila y el este de Durango, estratigráficamente la unidad más antigua es un conjunto fuertemente deformado de rocas volcánicas, calizas con fósiles paleozoicos y serpentinita silicificada (Formación Taray). La unidad está cubierta de manera discordante por rocas volcánicas y calcáreas de las Formaciones Rodeo (Jurásico) y Nazas, la cual forma parte de un arco volcánico del Triásico Tardío al Jurásico (Anderson *et al.*, 1991). En el centro-sureste de Zacatecas y el oeste de San Luis Potosí, la Formación Zacatecas del Triásico Superior consiste de afloramientos aislados de arenisca fuertemente foliada, esquistos, conglomerado y lutitas calcáreas (De Cserna, 1976; Mejía *et al.*, 1980; Ranson *et al.*, 1982; Cuevas, 1983; López, 1985; Servais *et al.*, 1986).



Figura 2.1. Terrenos tectonoestratigráficos de México (Sedlock et al., 1993). Abreviaciones: AB, Falla Agua Blanca; SM, Falla de San Marcos; TMVB, Cinturón Volcánico Trans – mexicano; CUI, Cuicateco; M, Mixteco; T, Tarahumara; Z, Zapoteco.

Se infiere que las rocas clásticas de las formaciones Valdecañas, Plateros y Chilitos se superponen a la Formación Zacatecas (Cuevas, 1983, 1985; Macdonald *et al.*, 1986; Servais *et al.*, 1986) la cual sufrió un episodio de deformación y metamorfismo en el Jurásico temprano a medio. Las rocas suprayacentes del Jurásico Superior fueron depositadas en una cuenca tras-arco (Jurásico Superior – Cretácico Inferior).

Una variedad de rocas mesozoicas surge cerca de las ciudades de Guanajuato y León. Las rocas inferiores son esquistos verdes fuertemente deformados de la Formación Arperos que se derivaron del flysch volcanoclástico, toba, chert y calizas (Servais *et al.*, 1982; Dávila y Martínez, 1987; De Cserna, 1989). Al sur y al este de León, la Formación Arperos está estructuralmente cubierta por las falladas de rocas ígneas máficas y ultramáficas (Jurásico tardío – Cretácico inferior) que, según Servais *et al.*, (1982) y Monod *et al.*, (1990) se interpretan como un complejo ofiolítico, o como los restos interrumpidos de un arco de isla oceánica, respectivamente.

Las rocas clásticas de grano fino y carbonatadas del Oxfordiano – Kimmeridgiano que surgen a lo largo del norte del terreno Tepehuano contienen megafósiles de afinidad Tetis como Boreal (Buitron, 1984; Aranda *et al.*, 1987; Salvador, 1987; Contreras *et al.*, 1988). Los nombres de las

formaciones locales incluyen Zuloaga, Novillo, Santiago y La Gloria (Imlay, 1936, 1938; Heim, 1940; Cantú, 1979).

Los estratos de plataforma del Jurásico Superior al Cretácico Superior están dominados por carbonatos y evaporitas locales, pero también incluyen esquistos intercalados y flysch derivados principalmente del arco magmático hacia el oeste, con un marcado aumento en la abundancia de rocas clásticas en el Cenomaniano Superior (Tardy y Maury, 1973; De Cserna, 1976; Cuevas, 1983; Mitre *et al.*, 1991). Las rocas deformadas durante el acortamiento del Laramide están discordantemente cubiertas por afloramientos dispersos de conglomerado no marino del Paleógeno y arenisca (Aranda-García *et al.*, 1989). El conglomerado derivado de fuentes ígneas y sedimentarias mixtas (Zacatecas) se superpone de manera disconforme a las formaciones Zacatecas y Chilitos, y está cubierto conformemente por ignimbrita de una caldera del Oligoceno (Edwards, 1955).

Las rocas magmáticas terciarias incluyen granitoides paleógenos, lava andesítica paleógena, toba e intrusivas hipabisales del “complejo volcánico inferior” (McDowell y Keizer, 1977), e ignimbritas silíceas del Terciario medio y andesitas basálticas del “supergrupo volcánico superior”. Las rocas cenozoicas tardías incluyen basaltos alcalinos del Mioceno-Plioceno y basanitas que entraron en erupción durante la extensión de la cuenca y la cordillera, rocas sedimentarias fluviales neógenas y cuaternarias y basaltos cuaternarios que contienen xenolitos de corteza y manto (Luhr *et al.*, 1990; Heinrich y Besch, 1992).

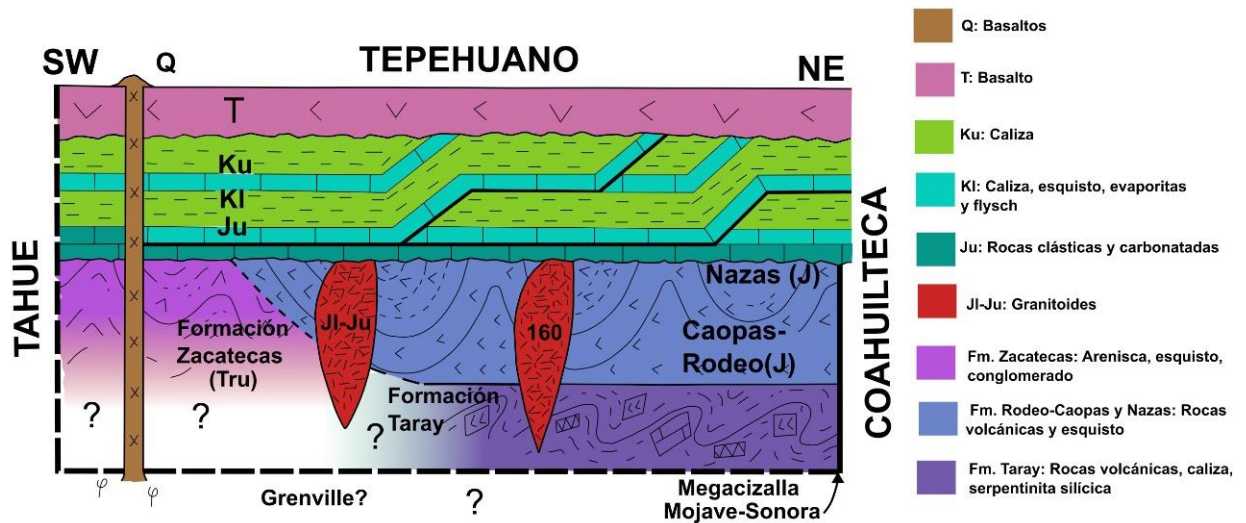


Figura 2.2. Sección tectonoestratigráfica del Terreno Tepehuano.

2.1.2 Geología local

La descripción de la geología local se realizó con base en las cartas geológico – mineras del Servicio Geológico Mexicano (SGM) a escala 1:50000 (F13 – B28, B29, B38, B59 y B69; F14 – A21, A31, A41, A51 y A61; Figura 2.3).

En la región las rocas más antiguas corresponden a las Formaciones La Ballena (TRba) y Nazas (TRna), del Triásico Superior al Jurásico Inferior constituidas por una secuencia de rocas volcánicas y clásticas con metamorfismo de bajo grado, limolitas, areniscas, conglomerados, ignimbritas y flujos andesíticos a la base; derrames dacíticos y tobas en la parte media y a la cima por andesitas y material piroclástico (SGM, 2005).

Suprayaciendo a las rocas del Triásico se deposita una secuencia vulcanosedimentaria conformada por la Formación Chilitos (Jch) y la Formación Valdecañas (Jva), litológicamente compuestas por andesitas, areniscas y rocas volcanoclásticas del Jurásico (CRM, 2000; SGM, 2009).

La secuencia vulcanosedimentaria es cubierta por una secuencia carbonatada depositada del Jurásico Superior al Cretácico Superior conformada por las Formaciones La Caja (Klc), Zuloaga (Kzu), Cupido (Kcu), Cuesta del Cura (Kcc), La Peña (Kpe), Indidura (Kin) y Caracol (Kca), estas unidades son caracterizadas por ser depositadas en ambientes de cuenca en donde las facies de mudstone a packstones son las que predominan en las rocas (CRM, 2000; SGM, 2007 y 2009).

Como cubierta discordante de las unidades anteriormente mencionadas se tiene una secuencia volcánica del Terciario constituida por brechas riolíticas, andesitas, tobas riolíticas, ignimbritas, riolitas, pórfidos dacíticos, pórfidos riolíticos y basaltos. A su vez estas rocas se encuentran cubiertas por los sedimentos de relleno de cuenca y los depósitos aluviales del Cuaternario (Figura 2.4).

2.1.3 Geología estructural

El contexto estructural está dado por estructuras que indican tres tipos de deformación: dúctil, dúctil–frágil y frágil. La primera asociada a la secuencia vulcanosedimentaria; en esta se consideran las estructuras producto de la Orogenia Laramide, la cual dio origen a los plegamientos de la región. Por la disposición en que se encuentran las unidades se puede inferir estructuras anticlinales de no muy extensa longitud (SGM, 2007 y 2016).

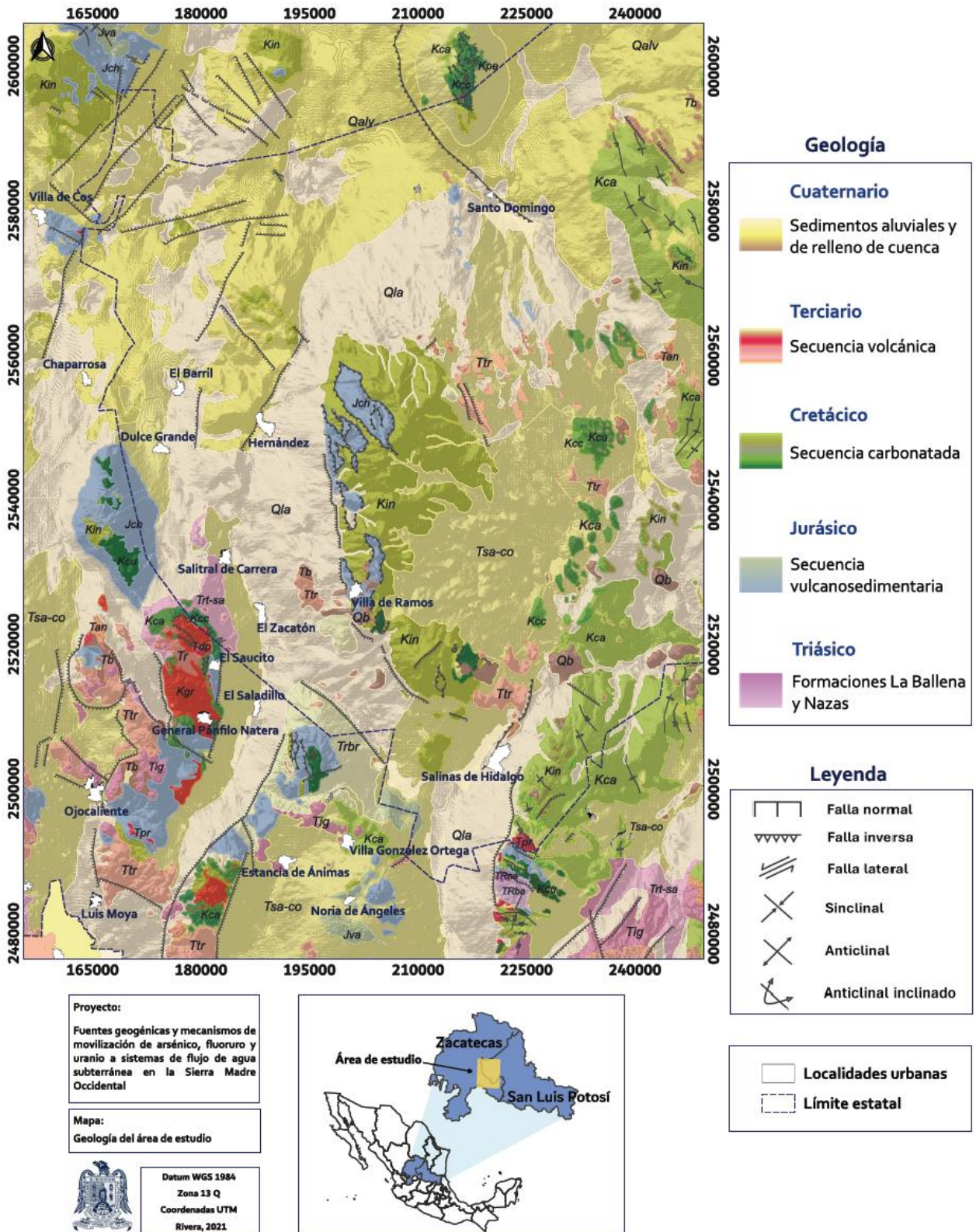


Figura 2.3. Mapa geológico de Salinas de Hidalgo (Rivera, 2021).

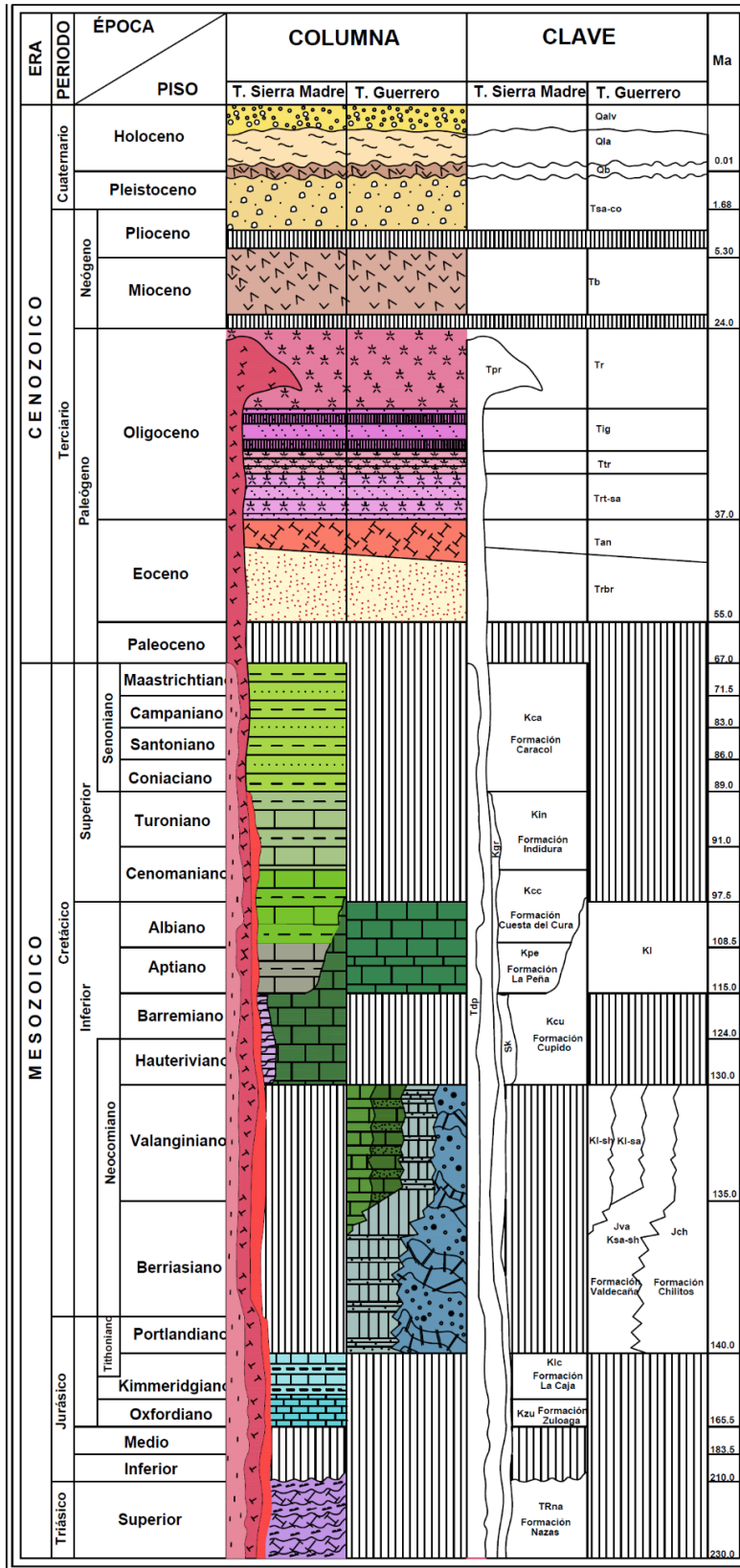


Figura 2.4. Columna estratigráfica del área de estudio (Elaborado con datos de Sociedad Exploradora Minera, 1998; CRM, 1999, 2000 y 2001; SGM, 2005, 2007, 2009 y 2016).

En la zona de estudio está representada por anticlinales y sinclinales que se localizan al sureste de Salinas de Hidalgo, este de Santo Domingo y al norte de Villa de Cos sobre las formaciones del Cretácico, Indidura y Caracol y las formaciones del Jurásico, Valdecañas y Chilitos. La segunda (dúctil–frágil) asociada a un régimen de compresión que se manifiesta con pliegues, fallas inversas de bajo ángulo y cabalgaduras, principalmente en la secuencia carbonatada del Cretácico con buenos ejemplos en las sierras de San Miguelito y El Sabino (SGM, 2005 y 2016). La deformación frágil que es post–orogénica y derivada de los esfuerzos distensivos, consiste principalmente en fallas de tipo normal, algunas de ellas producto de la reactivación de fallas inversas de bajo ángulo, y ocasionalmente fallas laterales (al sur y en las inmediaciones de El Saucito, sobre rocas de la secuencia volcánica del terciario) o fallas normales con componente lateral (SGM, 2016).

Las estructuras más importantes tienen una orientación NW–SE, representadas por fallas inversas, cabalgaduras, sinclinales y anticlinales (SGM, 2007, 2009, 2016). Las estructuras geológicas son el producto final de una serie de fenómenos desarrollados desde el Jurásico Superior y el inicio de la Formación de la Cuenca Mesozoica del Centro de México, con sus progresivos fenómenos de transgresión, subsidencia y depósito, así como su posterior deformación causada por los esfuerzos compresivos de la orogenia Laramide, asociados también a una serie de procesos netamente de compresión y distensión caracterizada, principalmente, por las fallas inversas y de cabalgadura (CRM, 2000; SGM, 2009).

2.1.4 Contexto hidrogeológico y definición del acuífero

De acuerdo con la clasificación de la CONAGUA, los acuíferos administrativos que conforman parcial o totalmente la zona de estudio son: Chupaderos (Clave 3226), La Blanca (Clave 3228) y Loreto (Clave 3229) en el estado de Zacatecas, así como el Barril (Clave 2402), Salinas de Hidalgo (Clave 2403) y Santo Domingo (Clave 2404) en San Luis Potosí (Figura 2.5).

En las porciones noroeste, noreste, centro y este del área los medios por los que se mueve el agua subterránea que se capta para diferentes usos, están conformados por un medio fracturado que incluye tobas arenosas y conglomerados poco cementados del Terciario, una secuencia de rocas volcánicas de composición riolítica (tobas ácidas, riolitas e ignimbritas) y rocas sedimentarias (calizas, lutitas y areniscas) que representan el medio fracturado con permeabilidad secundaria, además de depósitos granulares de origen aluvial y fluvial de granulometría variada, conglomerados polimícticos y depósitos lacustres de relleno de cuenca del Cuaternario (medio granular), que en conjunto constituyen el principal acuífero de esta zona (CONAGUA, 2020a,c).

Al sureste, el agua subterránea se desplaza principalmente a través de un medio granular, representado por materiales aluviales del Reciente, en donde su comportamiento es de tipo libre. Lateralmente está delimitado hacia las partes más altas, constituidos por basaltos y riolitas, así como por Formaciones sedimentarias marinas que se encuentran fracturadas permitiendo la circulación del agua, de manera que funcionan como zonas de recarga lateral (CONAGUA, 2020b).

La recarga total que reciben ocurre por tres procesos naturales principales: por infiltración de agua de lluvia y por infiltración de los escurrimientos, que en conjunto se consideran como recarga vertical. El flujo horizontal se presenta a través de una fracción del volumen de lluvias que se precipitan en las zonas topográficamente más altas y que se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través de los piedemonte, para posteriormente recargar el acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona de explotación. Se considera también, de manera incidental, a la infiltración de los excedentes del agua destinada al uso agrícola, el agua residual de las descargas urbanas y el agua de las pérdidas en las redes de distribución (CONAGUA, 2020a-g).

Profundidad al nivel del agua

Los valores de profundidad al nivel estático en aprovechamientos de agua subterránea se presentan entre 10 – 140 m; los niveles someros (10 m y menores) se localizan en la porción sureste, cerca del poblado de Salinas de Hidalgo (CONAGUA, 2020b). La región norte y centro – este, registró valores entre 15 y 60 m. Los valores más profundos, correspondientes a un rango de 100 – 140 m, se ubican en el centro – oeste y suroeste del área de estudio en las inmediaciones de Chaparrosa y Noria de Ángeles (CONAGUA, 2020e,g).

Dirección del flujo subterráneo

De acuerdo con la información disponible, la configuración de la elevación del nivel estático en aprovechamientos de agua indica valores que varían de 2200 a 1880 msnm (Figura 2.6). Los mayores valores (2200 a 2040 msnm) se identifican en las porciones al este de Santo Domingo, norte–noroeste de Salinas de Hidalgo y sureste del mismo, disminuyendo paulatinamente (2020 a 1880 msnm) en las regiones noroeste, centro–oeste y suroeste.

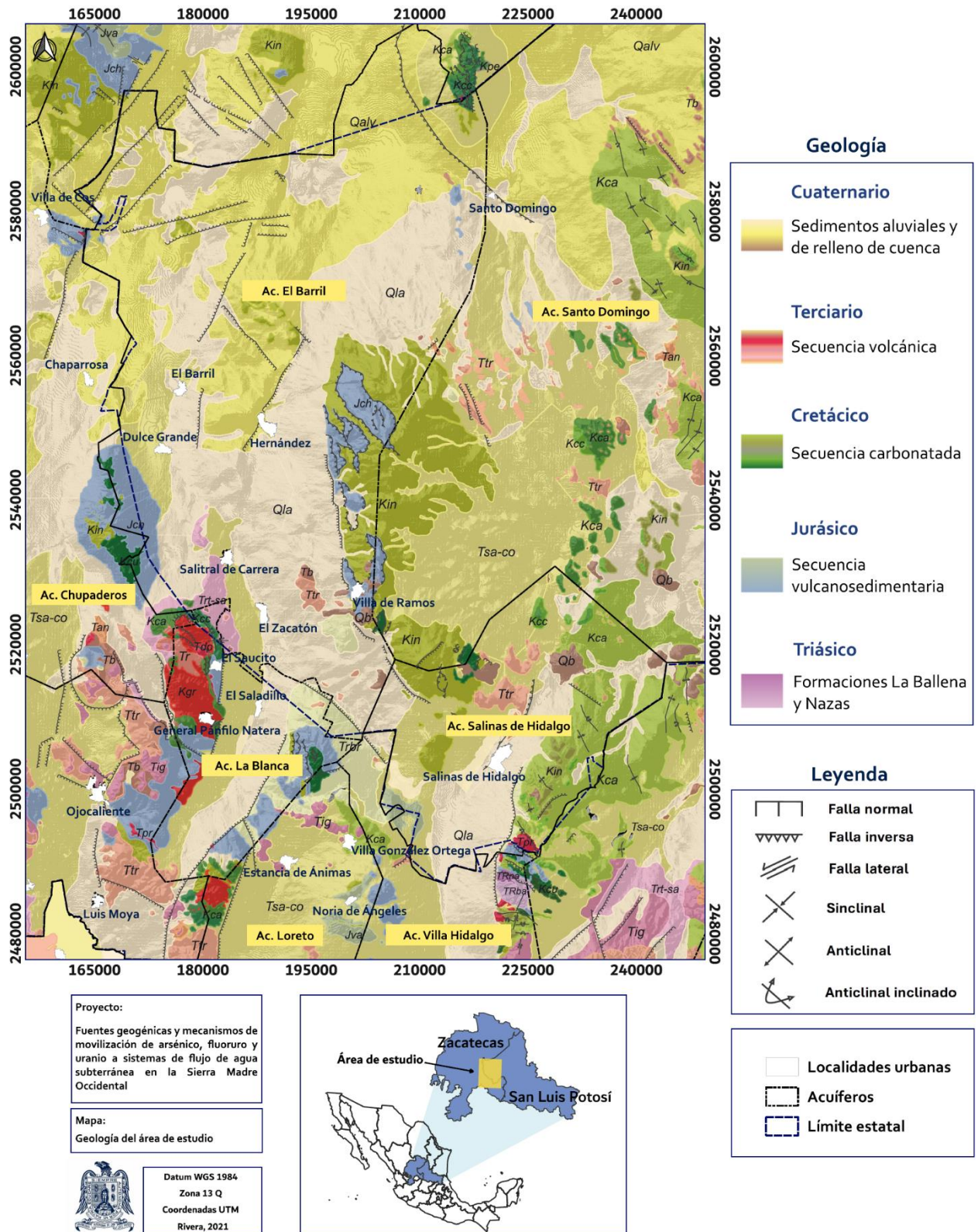


Figura 2.5. Acuíferos administrativos que conforman el área de estudio (CONAGUA, 2020a–g; Rivera, 2021).

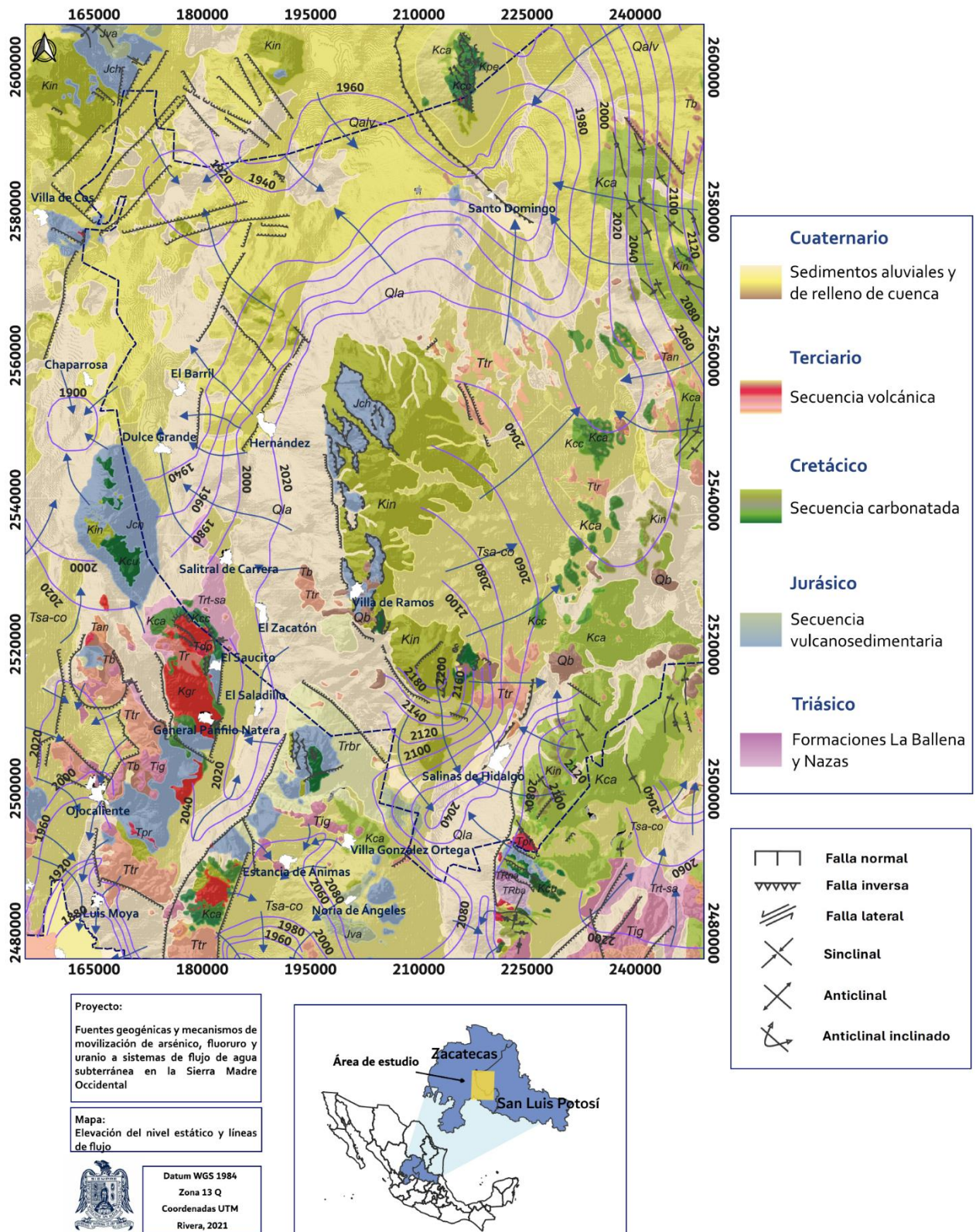


Figura 2.6. Elevación del nivel estático (msnm) (Rivera, 2021).

Unidades hidrogeológicas

Se establecieron seis unidades hidrogeológicas, de acuerdo con sus propiedades hidráulicas y tomando en cuenta la geología del subsuelo (CONAGUA, 2020a–g; León, 2020). Las unidades 4a y 4b corresponden al medio fracturado. Le sobreyace las unidades 3a y 3b con conductividades horizontales y verticales: K_x (7.25×10^{-4} m/s); K_y (7.25×10^{-4} m/s); K_z (7.25×10^{-5} m/s), coeficiente de almacenamiento (0.0007), rendimiento específico (0.18) y porosidad total de 0.35. La unidad hidrogeológica 2, presenta conductividades de (K_x , 5.15×10^{-4} m/s; K_y , 5.15×10^{-4} m/s; K_z , 5.15×10^{-3} m/s), coeficiente de almacenamiento (0.0007), rendimiento específico (0.17) y porosidad de 0.35. La unidad 1 corresponde al medio granular y posee conductividades de (K_x , 5.82×10^{-3} m/s; K_y , 5.82×10^{-3} m/s; K_z , 5.82×10^{-4} m/s), coeficiente de almacenamiento (0.0007), rendimiento específico (0.27) y porosidad total de 0.45.

Tabla 2.1. Propiedades hidráulicas y geológicas de las unidades hidrogeológicas del área de estudio.

Unidad Geológica	Unidad Hidrogeológica	Medio	Acuífero
Qs	1	Granular	Libre granular
Tsv	2	Fracturado	Libre fracturado
Cc	3a	Fracturado: Formaciones Caracol, Indidura, La Peña y La Caja	Acuitardo
	3b	Fracturado: Cuesta del Cura, Cupido y Zuloaga	Kárstico-Fracturado
TRJvs	4a	Fracturado	Acuitardo
	4b	Fracturado	Acuitardo (Basamento hidrogeológico)

3. Análisis hidrogeoquímico del arsénico, fluoruro y uranio en el agua subterránea.

Las muestras de agua subterránea colectadas incluyen pozos (n=31) y norias (n=25). Además de bordos (n=4), lagunas (n=3), presa (n=1) y manantial (n=1). Lo que suma un total de 65 muestras de agua subterránea y superficial (Figura 3.1 y Tabla 3.1).

El 83.9% de los pozos es de uso público-urbano; 9.7% público-urbano-agrícola y 6.5% agrícola. Por su parte, las norias registran un uso (público-urbano-agrícola, 32%; agrícola, 28%; público-urbano, 12%; agropecuario y doméstico-pecuario, ambos del 8% y doméstico, pecuario e industrial, cada uno del 4%). Las lagunas tienen uso agrícola-pecuario-servicios, agropecuario e industrial con un mismo porcentaje de uso del 33.3%. Los bordos son únicamente de uso agropecuario. La presa es de uso público-urbano-agrícola y el manantial de uso cultural.

De acuerdo con el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA), en México se tienen identificados 13 usos del agua; de los cuales 12 están clasificados como consuntivos: agrícola, acuacultura, pecuario, termoeléctricas, comercio, doméstico, industrial, agroindustrial, servicio, múltiples, otros y público-urbano (CONAGUA, 2020h). Por lo tanto, según lo anterior el 98.5% de las muestras son de uso consuntivo, con excepción del manantial el cual es de uso cultural (Figura 3.2).

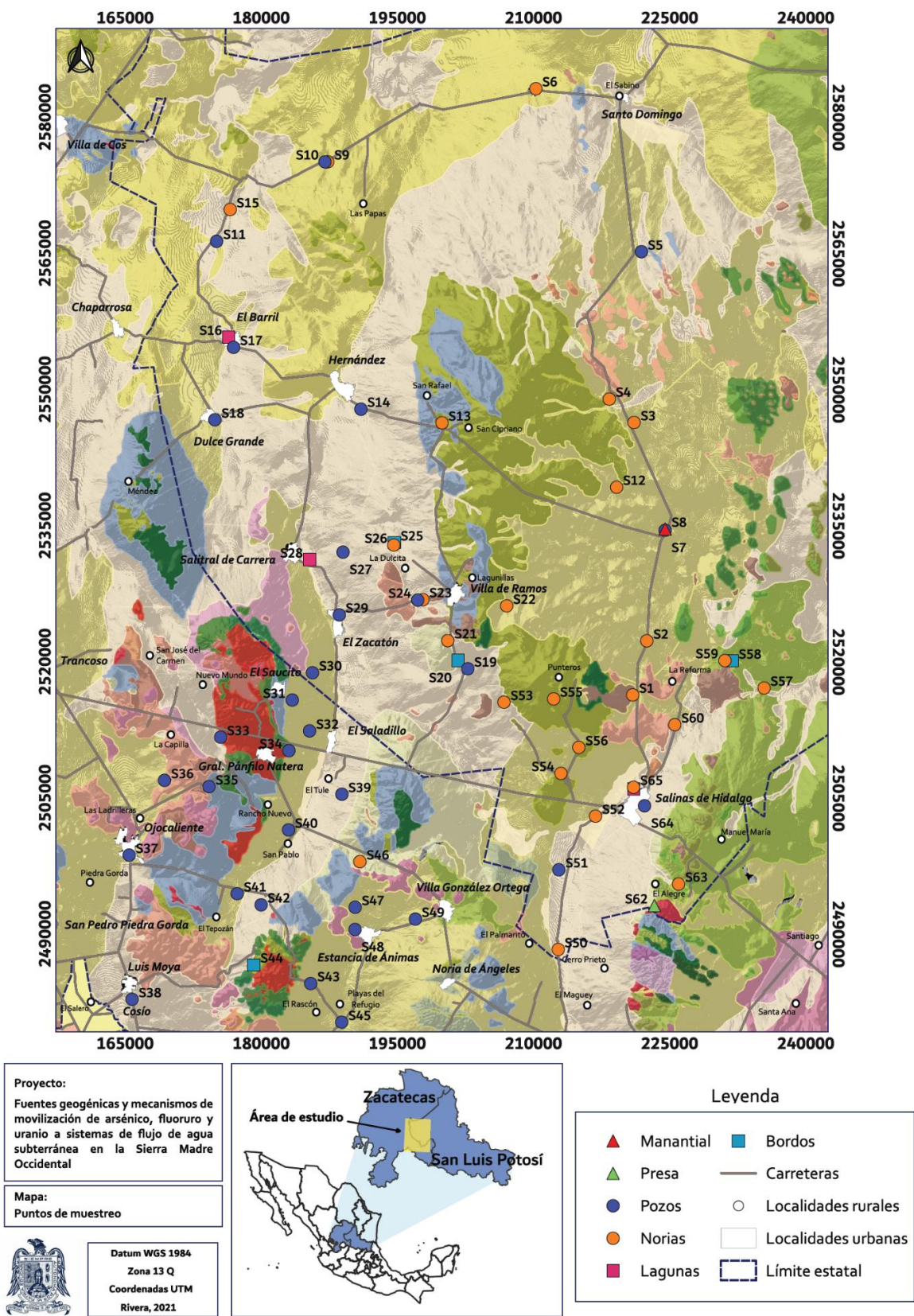


Figura 3.1. Mapa geológico del área de estudio donde se muestran los puntos de muestreo (Rivera, 2021).

Tabla 3.1. Aprovechamientos hídricos en donde se recolectaron las muestras de agua.

ID	Toma de muestra	Tipo de aprovechamiento	Localidad	Uso	UTM_X	UTM_Y
					m	m
S1	30/06/2021	Noria	Salinas	Doméstico	220935	2516358
S2	30/06/2021	Noria	Salinas	Pecuario	222485	2522316
S3	30/06/2021	Noria	Villa de Ramos	Agropecuario	221084	2546379
S4	30/06/2021	Noria	Villa de Ramos	Doméstico-pecuario	218348	2548957
S5	30/06/2021	Pozo	Santo Domingo	Público-urbano	221901	2565193
S6	30/06/2021	Noria	Santo Domingo	Agropecuario	210270	2583155
S7	02/07/2021	Pozo	Villa de Ramos	Público-urbano	224504	2534500
S8	02/07/2021	Manantial	Villa de Ramos	Cultural (ceremonial)	224511	2534645
S9	02/07/2021	Noria	Santo Domingo	Público-urbano-agrícola	801255	2575100
S10	02/07/2021	Pozo	Santo Domingo	Público-urbano	800938	2575094
S11	02/07/2021	Pozo	Santo Domingo	Público-urbano	789371	2566337
S12	03/07/2021	Noria	Villa de Ramos	Agrícola	219163	2539246
S13	03/07/2021	Noria	Villa de Ramos	Agrícola	199928	2546338
S14	03/07/2021	Pozo	Villa de Ramos	Agrícola	806038	2547844
S15	03/07/2021	Noria	Santo Domingo	Público-urbano	790722	2569845
S16	03/07/2021	Laguna	Villa de Ramos	Agrícola-pecuario-servicios	791113	2555793
S17	03/07/2021	Pozo	Villa de Ramos	Público-urbano	791689	2554657
S18	03/07/2021	Pozo	Villa de Ramos	Público-urbano	789968	2546673
S19	21/07/2021	Pozo	Villa de Ramos	Público-urbano	202766	2519243
S20	21/07/2021	Bordo	Villa de Ramos	Agropecuario	201688	2520171
S21	21/07/2021	Noria	Villa de Ramos	Público-urbano-agrícola	200556	2522335
S22	21/07/2021	Noria	Villa de Ramos	Agrícola	207054	2526165
S23	21/07/2021	Noria	Villa de Ramos	Agrícola	197824	2526855
S24	21/07/2021	Pozo	Villa de Ramos	Público-urbano	197247	2526806
S25	21/07/2021	Bordo	Villa de Ramos	Agropecuario	194656	2533150
S26	21/07/2021	Noria	Villa de Ramos	Público-urbano	194608	2532873
S27	21/07/2021	Pozo	Villa de Ramos	Público-urbano	804704	2532089
S28	21/07/2021	Laguna	Villa de Ramos	Agropecuario	801017	2531259
S29	22/07/2021	Pozo	Villa de Ramos	Público-urbano	804569	2525173
S30	22/07/2021	Pozo	Villa de Ramos	Agrícola	801861	2518800
S31	22/07/2021	Pozo	General Pánfilo Natera	Público-urbano	799768	2515792
S32	22/07/2021	Pozo	General Pánfilo Natera	Público-urbano	801807	2512394
S33	23/07/2021	Pozo	General Pánfilo Natera	Público-urbano	792026	2511697
S34	23/07/2021	Pozo	General Pánfilo Natera	Público-urbano-agrícola	799616	2510218
S35	23/07/2021	Pozo	General Pánfilo Natera	Público-urbano-agrícola	790963	2506253
S36	23/07/2021	Pozo	Ojocaliente	Público-urbano	786033	2506943
S37	23/07/2021	Pozo	Ojocaliente	Público-urbano	782466	2498708

Tabla 3.1. Aprovechamientos hídricos en donde se recolectaron las muestras de agua.

ID	Toma de muestra	Tipo de aprovechamiento	Localidad	Uso	UTM_X	UTM_Y
					m	m
S38	23/07/2021	Pozo	Luis Moya	Público-urbano	783433	2482813
S39	26/07/2021	Pozo	General Pánfilo Natera	Público-urbano	805656	2505414
S40	26/07/2021	Pozo	General Pánfilo Natera	Público-urbano	799955	2501490
S41	26/07/2021	Pozo	Ojocaliente	Público-urbano	794564	2494455
S42	26/07/2021	Pozo	Ojocaliente	Público-urbano	797246	2493228
S43	26/07/2021	Pozo	Ojocaliente	Público-urbano	803042	2484555
S44	26/07/2021	Bordo	Ojocaliente	Agropecuario	796689	2486608
S45	26/07/2021	Pozo	Noria de Ángeles	Público-urbano	806643	2480297
S46	27/07/2021	Noria	Villa González Ortega	Público-urbano-agrícola	807938	2497990
S47	27/07/2021	Pozo	Villa González Ortega	Público-urbano	807642	2492964
S48	27/07/2021	Pozo	Villa González Ortega	Público-urbano	807696	2490512
S49	27/07/2021	Pozo	Villa González Ortega	Público-urbano	196990	2491663
S50	27/07/2021	Noria	Salinas	Público-urbano-agrícola	212729	2488311
S51	27/07/2021	Pozo	Salinas	Público-urbano-agrícola	212797	2497091
S52	27/07/2021	Noria	Salinas	Agrícola	216839	2502995
S53	27/07/2021	Noria	Salinas	Público-urbano	206744	2515565
S54	27/07/2021	Noria	Salinas	Agrícola	213024	2507710
S55	28/07/2021	Noria	Salinas	Agrícola	212226	2515917
S56	28/07/2021	Noria	Salinas	Público-urbano-agrícola	214996	2510579
S57	28/07/2021	Noria	Salinas	Público-urbano-agrícola	235414	2517116
S58	28/07/2021	Bordo	Salinas	Agropecuario	231882	2520119
S59	28/07/2021	Noria	Salinas	Público-urbano-agrícola	231097	2520141
S60	28/07/2021	Noria	Salinas	Público-urbano-agrícola	225569	2513079
S61	28/07/2021	Laguna	Salinas	Industrial	221048	2506014
S62	29/07/2021	Presa	Salinas	Público-urbano-agrícola	223320	2493148
S63	29/07/2021	Noria	Salinas	Agropecuario	225987	2495518
S64	29/07/2021	Pozo	Salinas	Público-urbano	222240	2504140
S65	30/07/2021	Noria	Salinas	Industrial	221030	2506183

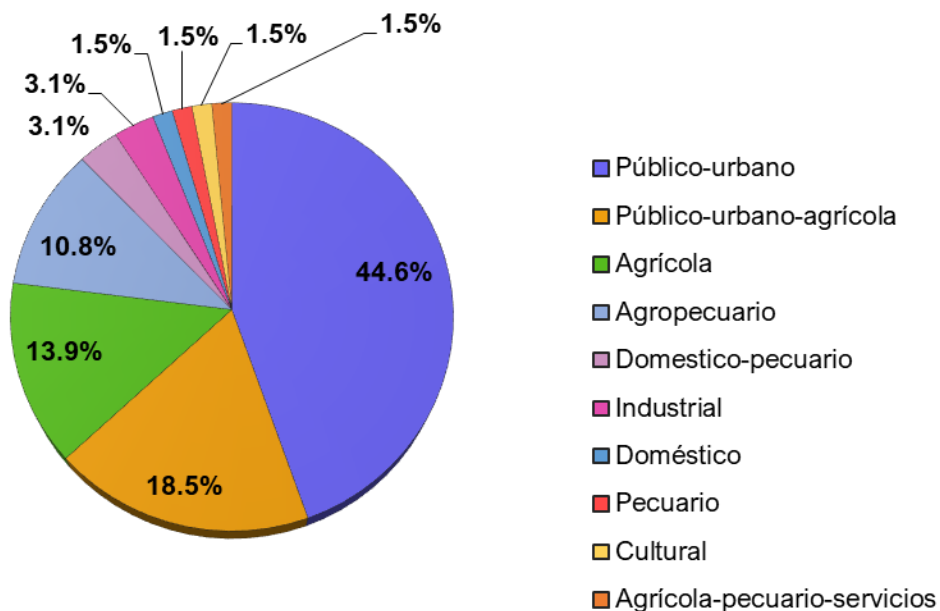


Figura 3.2. Usos del agua en el área de estudio.

3.1 Validación y análisis de los resultados

3.1.1. Balance de electroneutralidad

Una vez obtenidos los resultados de los análisis de laboratorio, fue necesario verificar la condición de electroneutralidad. La exactitud de los análisis para iones mayores puede estimarse mediante un balance de electroneutralidad, ya que la suma de las cargas positivas y negativas en el agua deben ser iguales. Lo anterior se representa mediante la siguiente fórmula (ec. 3.1).

$$\% \text{ Error} = \frac{(\sum \text{cationes} + \sum \text{aniones})}{(\sum \text{cationes} - \sum \text{aniones})} \times 100 \quad (\text{ec. 3.1})$$

De acuerdo con Freeze y Cherry (1979), los análisis se consideran correctos si presenta un porcentaje de error entre $\pm 5\%$. De las muestras analizadas el 91% se encuentra dentro del rango mencionado anteriormente, cuatro de las muestras obtuvieron un porcentaje mayor a 6 aunque menor a 14%. Dos muestras presentaron valores negativos de -6.6 y -7.6% (Figura 3.3).

En las tablas 3.2, 3.3 y 3.4 se presentan los parámetros medidos en campo, así como los resultados de elementos mayores, menores y traza determinados en laboratorio.

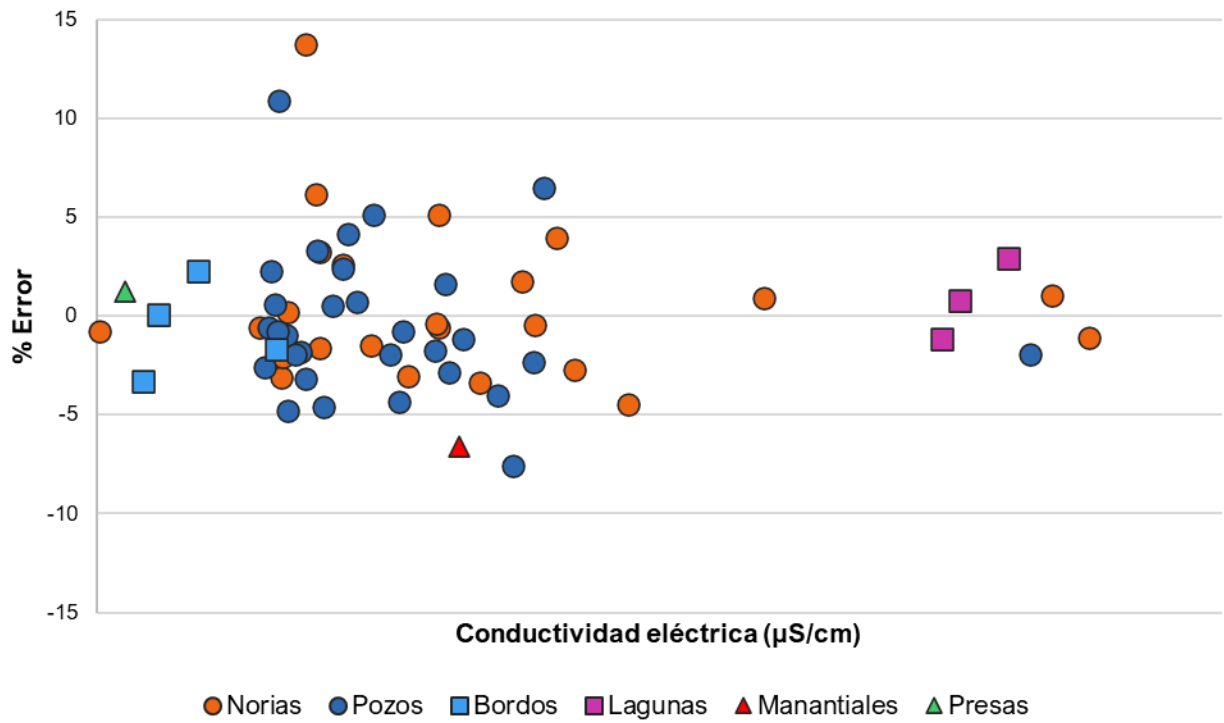


Figura 3.3. Diagrama que relaciona el porcentaje de error y la conductividad eléctrica para las muestras de agua subterránea y superficial.

Tabla 3.2. Medición de los parámetros fisicoquímicos de campo.

ID	T	pH	Potencial REDOX (ORP)	Eh	pe	Conductividad eléctrica	Oxígeno Disuelto	Oxígeno Disuelto	Alcalinidad Total	HCO ₃	CO ₃
	°C		mV	mV		µS/cm	%	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
S1	18.30	7.79	72.2	296.6	5.1	432.2	46.9	4.4	169.62	205.60	9.6
S2	16.60	8.2	77.3	301.8	5.2	911	50.8	4.94	208.03	249.35	14.4
S3	19.60	7.81	71.6	295.8	5.1	905	24.6	2.25	311.70	377.25	0.0
S4	18.00	7.23	86	310.4	5.4	2646	11.2	1.05	247.56	301.16	0.0
S5	20.60	7.91	91.2	315.3	5.4	804	83.5	7.49	244.50	295.30	9.6
S6	20.50	7.85	89.4	313.6	5.4	1274	52.5	4.72	239.15	289.02	0.0
S7	19.10	7.92	76.5	300.8	5.2	939	47.7	4.41	265.32	317.41	9.6
S8	17.50	7.74	89.3	313.8	5.4	965	36.7	3.5	287.07	347.85	0.0
S9	18.00	7.34	87.2	311.6	5.4	555	40.9	3.87	244.90	297.90	0.0
S10	26.60	7.21	91.1	314.6	5.3	2488	46.6	3.92	348.63	423.95	0.0
S11	22.90	7.92	90.7	314.6	5.4	975	53.9	4.6	241.18	290.98	14.4
S12	21.90	8.4	68.5	292.5	5.0	830	56.8	4.97	250.83	296.73	19.2
S13	18.90	7.93	79.4	303.7	5.2	731	42.1	3.87	162.25	195.98	0.0
S14	25.00	7.58	90.8	314.5	5.3	1165	80.5	6.63	185.00	224.40	0.0
S15	18.20	7.93	81.1	305.5	5.3	508	58.4	5.49	195.92	236.77	14.4
S16	26.80	8.96	87.9	311.4	5.2	2254	126.2	9.99	350.38	373.05	24.0
S17	24.20	7.59	83.8	307.6	5.2	929	86.6	7.25	213.28	258.74	0.0
S18	22.50	7.82	84.6	308.6	5.3	1193	63.9	5.5	219.30	353.50	24.0
S19	20.00	7.86	203.1	427.3	7.3	1108	25.6	2.36	287.03	346.93	9.6
S20	18.30	10.34	206.1	430.5	7.4	121.3	92.7	8.69	62.22	22.55	14.4
S21	17.30	7.91	212.7	437.2	7.6	584	51.4	4.93	180.73	218.52	9.6
S22	14.80	8.34	220.8	445.5	7.8	1778	32.6	3.26	480.48	571.42	57.6
S23	15.70	8.01	226.2	450.8	7.9	1169	55.1	5.42	218.06	262.86	9.6

Tabla 3.2. Medición de los parámetros fisicoquímicos de campo.

ID	T	pH	Potencial REDOX (ORP)	Eh	pe	Conductividad eléctrica	Oxígeno Disuelto	Oxígeno Disuelto	Alcalinidad Total	HCO ₃	CO ₃
	°C		mV	mV		µS/cm	%	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
S24	22.40	8.03	218.7	442.7	7.5	694	47.1	4.08	256.28	308.52	14.4
S25	22.80	9.43	220.3	444.2	7.6	268	95.8	8.27	125.07	117.05	19.2
S26	18.50	7.45	218.5	442.9	7.7	2546	28.7	2.66	344.76	418.76	14.4
S27	24.60	7.96	201	424.7	7.2	737	62.2	5.31	237.27	285.98	14.4
S28	18.80	9.36	209	433.3	7.5	2430	91.6	8.64	435.62	405.46	100.8
S29	22.90	7.84	219	442.9	7.5	817	36.2	3.09	252.52	305.23	9.6
S30	24.50	7.51	209	432.8	7.3	474.9	48.8	4.11	169.88	206.35	0.0
S31	26.40	7.33	224.2	447.8	7.5	504	75.3	6.05	181.55	220.78	0.0
S32	27.40	7.43	222.1	445.6	7.5	543	51.4	4.07	190.57	231.53	0.0
S33	28.20	7.87	212.4	435.8	7.3	456.1	84.9	6.61	143.85	173.70	0.0
S34	29.60	7.96	215.6	438.8	7.3	603	2.2	0.16	125.35	150.92	9.6
S35	24.70	7.64	222.6	446.3	7.6	507	85.8	7.11	199.97	242.50	0.0
S36	31.60	8.11	202.7	425.7	7.0	485.1	54.1	3.94	111.90	133.93	9.6
S37	27.00	7.56	204.3	427.8	7.2	529	69.7	5.52	169.95	206.23	0.0
S38	27.00	7.56	200	423.5	7.1	555	61.4	4.98	188.77	229.08	0.0
S39	24.90	8.01	214.3	438.0	7.4	901	19.2	1.55	239.20	287.78	19.2
S40	25.10	7.67	217.9	441.6	7.5	627	72	5.93	249.40	302.33	19.2
S41	22.30	7.81	229.5	453.5	7.7	448.6	96.6	8.39	173.18	209.60	9.6
S42	24.40	7.61	219.1	442.9	7.5	482	84.1	7.02	178.28	216.32	9.6
S43	29.00	7.35	227.4	450.7	7.5	780	46.6	3.57	276.78	336.40	4.8
S44	18.80	8.36	219.9	444.2	7.7	162.5	61.7	5.67	89.92	107.22	0.0
S45	25.50	7.4	215.3	439.0	7.4	654	78.2	6.41	217.00	258.73	14.4
S46	16.00	7.93	238.3	462.9	8.1	593	2.7	0.26	348.12	420.88	0.0

Tabla 3.2. Medición de los parámetros fisicoquímicos de campo.

ID	T	pH	Potencial REDOX (ORP)	Eh	pe	Conductividad eléctrica	Oxígeno Disuelto	Oxígeno Disuelto	Alcalinidad Total	HCO ₃	CO ₃
	°C		mV	mV		µS/cm	%	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
S47	21.90	8.09	231.4	455.4	7.8	464.3	66.9	5.86	141.90	170.58	19.2
S48	23.90	7.63	210.4	434.2	7.4	586	81.3	6.86	158.22	191.92	9.6
S49	24.80	7.62	233	456.7	7.7	1069	63	5.2	181.93	220.58	9.6
S50	19.80	7.86	219.5	443.7	7.6	594	71.9	6.58	195.08	235.95	9.6
S51	23.10	7.69	222.4	446.3	7.6	668	27.3	4.9	193.53	234.60	9.6
S52	22.80	7.64	218.6	442.5	7.5	911	55.3	4.74	182.45	221.25	4.8
S53	14.20	8.2	198.7	423.5	7.4	1133	49.1	5.02	266.37	319.42	24.0
S54	15.20	7.61	212.7	437.4	7.6	489.7	18.2	1.87	130.75	158.78	0.0
S55	17.20	7.67	125.6	350.1	6.1	495.9	8.7	0.82	265.18	321.76	0.0
S56	18.50	7.42	217.2	441.6	7.6	1021	52.5	4.75	148.75	180.83	0.0
S57	18.30	7.79	224.1	448.5	7.8	7.91	52.9	4.97	335.00	406.35	28.8
S58	26.10	10.15	234.1	457.7	7.7	476.8	67.7	5.53	145.75	61.45	67.2
S59	17.00	7.92	216.2	440.7	7.7	1225	53.1	5.1	321.08	387.78	33.6
S60	21.20	8.09	213.7	437.8	7.5	657	58.4	5.17	182.00	218.78	14.4
S61	18.10	8.16	223.4	447.8	7.7	2302	30.3	2.83	198.02	236.90	0.0
S62	16.10	6.72	225.1	449.7	7.8	74.1	38	3.73	5.37	6.57	0.0
S63	18.80	7.75	238.5	462.8	8.0	1416	59	5.47	279.88	338.90	14.4
S64	24.10	6.94	217.1	440.9	7.5	8651	33.1	2.72	267.48	325.57	0.0
S65	19.20	8.5	212.3	436.6	7.5	41061	89.2	6.55	213.88	240.52	100.8

Tabla 3.3. Resultados de los análisis químicos de las muestras de agua colectadas: elementos mayores.

ID	pH_lab	CE_lab	STD	Alcalinidad Total_lab	Dureza Total	HCO ₃ _lab	Cl	SO ₄	N_NO ₃	NO ₃	F	Na	K	Ca	Mg	Si
		mmhos/cm	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
S1	8.17	477	198	168	175.89	185.44	27.99	25.00	4.40	19.48	0.42	20.91	9.41	39.93	18.50	16.73
S2	8.53	1037	439	208	266.29	224.48	101.98	145.00	3.50	15.49	2.31	88.81	25.43	58.15	29.41	16.23
S3	8.21	963	388	292	383.50	356.24	91.98	45.00	4.90	21.69	1.78	33.73	13.68	89.99	38.56	7.38
S4	7.84	2808	1119	248	550.19	302.56	211.95	600.00	13.90	61.54	1.95	235.60	93.64	131.03	54.16	16.17
S5	8.35	844	354	244	55.35	278.16	33.99	97.50	6.50	28.78	3.40	147.42	10.78	19.23	1.78	11.84
S6	8.35	1341	563	232	176.95	283.04	109.98	240.00	3.70	16.38	2.60	192.98	19.40	42.30	17.32	25.07
S7	8.37	1016	427	268	130.01	307.44	55.99	165.00	2.60	11.51	2.23	165.21	8.73	36.66	9.34	10.67
S8	8.26	1073	452	248	109.69	302.56	59.99	160.00	1.30	5.76	2.43	166.77	5.67	28.31	9.47	10.69
S9	8.06	615	230	244	230.93	297.68	12.00	17.50	6.60	29.22	2.03	15.33	15.14	65.32	16.47	29.57
S10	7.90	2453	971	352	246.83	429.44	59.99	675.00	5.30	23.46	2.65	383.36	18.39	84.10	8.95	30.12
S11	8.43	953	397	236	179.84	258.64	53.99	185.00	1.60	7.08	1.56	132.83	15.06	51.32	12.55	25.30
S12	8.65	857	358	252	93.29	268.40	39.99	105.00	3.00	13.28	3.02	141.36	5.41	32.43	2.99	12.71
S13	8.30	791	332	160	276.42	195.20	47.99	142.50	3.70	16.38	0.80	40.17	7.08	77.07	20.39	4.47
S14	8.32	1099	466	184	277.81	224.48	87.98	250.00	3.10	13.72	0.58	115.22	12.58	57.38	32.67	25.23
S15	8.46	568	236	196	114.95	209.84	18.00	65.00	1.30	5.76	1.12	74.52	9.35	31.53	8.80	25.70
S16	8.62	1734	801	348	191.12	375.76	175.96	400.00	0.10	0.44	1.82	325.66	37.72	52.44	14.62	5.52
S17	8.44	897	344	216	147.18	263.52	57.99	127.50	3.90	17.27	1.47	118.04	23.63	41.56	10.54	24.68
S18	8.51	1185	490	292	183.47	307.44	59.99	195.00	5.10	22.58	1.10	162.93	30.83	37.72	21.68	22.45
S19	7.12	1091	535	216	351.43	244	141.97	220.00	0.90	3.98	1.42	110.65	25.78	64.92	45.97	10.03
S20	7.24	125.30	61	60	64.70	43.92	22.00	7.00	0.80	3.54	0.21	10.58	7.87	22.22	2.24	1.60
S21	7.45	612	300	212	258.67	239.12	39.99	32.50	12.00	53.12	0.79	37.21	11.83	43.93	36.18	21.26
S22	7.34	1980	970	524	409.19	522.16	183.96	400.00	4.30	19.04	1.63	342.14	30.24	60.03	62.97	13.05
S23	7.49	1275	625	212	464.09	239.12	217.95	120.00	23.00	101.82	0.35	104.50	27.90	83.65	61.98	25.51
S24	7.63	651	319	284	201.41	317.20	49.99	45.00	4.10	18.15	0.33	78.57	15.88	36.67	26.68	20.23
S25	7.77	263.80	129	128	113.54	117.12	29.99	12.00	0.60	2.66	0.20	22.07	21.55	37.61	4.77	4.83
S26	7.39	2487	1218	300	920.69	336.72	341.92	550.00	17.50	77.47	1.19	226.53	56.47	136.81	140.62	24.33
S27	7.87	684	335	268	75.17	297.68	37.99	65.00	4.20	18.59	1.47	143.63	21.71	20.44	5.86	41.26

Tabla 3.3. Resultados de los análisis químicos de las muestras de agua colectadas: elementos mayores.

ID	pH_lab	CE_lab	STD	Alcalinidad Total_lab	Dureza Total	HCO ₃ _lab	Cl	SO ₄	N_NO ₃	NO ₃	F	Na	K	Ca	Mg	Si
		mmhos/cm	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
S28	8.64	2862	1402	556	37.08	473.36	667.85	145.00	10.40	46.04	8.10	679.53	97.19	7.40	4.52	42.05
S29	7.80	760	372	260	86.99	297.68	43.99	139.92	4.60	20.36	2.75	167.85	18.13	22.43	7.52	39.09
S30	7.58	432	211	192	192.26	234.24	25.99	41.30	2.50	11.07	1.97	29.41	7.40	64.16	7.78	14.47
S31	7.35	436	214	196	199.26	239.12	23.99	40.20	2.60	11.51	1.90	25.67	8.24	68.48	6.86	32.37
S32	7.52	459	225	192	166.17	234.24	25.99	52.50	1.90	8.41	2.28	46.97	11.27	54.70	7.18	40.90
S33	7.82	382	187	156	101.05	190.32	25.99	23.70	4.30	19.04	2.60	49.96	11.56	25.63	9.00	24.17
S34	7.65	490	240	128	59.38	136.64	31.99	94.75	3.70	16.38	5.38	92.22	8.14	22.29	0.91	32.26
S35	7.65	454	223	192	133.13	234.24	29.99	35.80	3.30	14.61	1.52	50.41	19.49	36.78	10.03	14.54
S36	7.88	378	185	172	116.08	190.32	23.99	31.50	3.10	13.72	3.19	54.67	6.69	37.85	5.24	11.37
S37	7.61	450	221	180	131.20	219.60	23.99	36.70	3.20	14.17	3.89	50.27	8.94	42.43	6.13	10.84
S38	7.64	482	236	188	104.25	229.36	27.99	45.10	3.20	14.17	2.91	70.04	13.50	37.48	2.59	20.08
S39	7.86	842	413	244	73.65	258.64	51.99	131.50	3.30	14.61	2.54	170.90	4.40	17.10	7.52	9.91
S40	7.67	587	288	264	170.58	283.04	27.99	37.50	1.90	8.41	1.27	65.35	20.79	36.44	19.33	43.22
S41	7.83	446	218	172	172.68	190.32	33.99	22.30	5.80	25.68	0.82	29.84	12.51	44.28	15.09	28.01
S42	7.87	456	224	188	135.57	209.84	25.99	33.90	3.10	13.72	0.94	46.84	16.70	36.86	10.57	31.24
S43	7.85	666	326	276	155.46	326.96	27.99	62.00	0.80	3.54	2.02	92.72	10.20	53.27	5.45	22.58
S44	7.70	177.90	87	88	89.22	107.36	18.00	2.50	1.30	5.76	0.36	10.99	8.04	29.04	4.06	2.77
S45	7.57	603	296	244	148.60	268.40	31.99	54.00	2.60	11.51	1.48	80.71	16.38	47.62	7.21	26.58
S46	7.91	676	331	360	86.00	439.20	23.99	11.00	1.30	5.76	2.45	147.22	17.11	22.67	7.14	18.54
S47	7.92	464	227	144	117.63	136.64	31.99	37.20	3.40	15.05	1.53	49.48	21.00	33.91	8.00	24.27
S48	7.87	558	274	184	132.56	204.96	37.99	61.00	3.80	16.82	1.48	70.84	19.38	41.40	7.09	24.23
S49	7.67	989	485	180	201.30	200.08	165.96	199.00	6.50	28.78	2.16	172.37	20.77	59.55	12.77	20.90
S50	7.97	613	300	196	119.20	219.60	39.99	59.50	6.50	28.78	1.49	86.13	17.64	36.44	6.85	39.88
S51	7.71	669	313	232	132.38	263.52	41.99	65.00	3.10	13.72	1.52	89.68	27.26	35.14	10.84	37.38
S52	7.70	878	430	196	196.24	229.36	99.98	111.00	3.40	15.05	1.27	123.52	26.80	52.98	15.53	35.26
S53	7.82	1333	653	300	273.15	317.20	163.96	178.50	3.70	16.38	3.40	194.41	24.17	60.86	29.43	15.03
S54	7.48	561	275	132	207.22	161.04	105.98	48.50	1.00	4.43	0.42	40.19	15.80	60.01	13.94	10.86

Tabla 3.3. Resultados de los análisis químicos de las muestras de agua colectadas: elementos mayores.

ID	pH_lab	CE_lab	STD	Alcalinidad Total_lab	Dureza Total	HCO ₃ _lab	Cl	SO ₄	N_NO ₃	NO ₃	F	Na	K	Ca	Mg	Si
		mmhos/cm	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
S55	7.54	542	266	268	234.33	326.96	31.99	9.50	0.60	2.66	0.45	25.64	13.91	76.01	10.81	21.66
S56	7.40	1081	530	148	423.85	180.56	233.95	59.00	4.90	21.69	0.49	34.26	19.59	126.15	26.43	23.40
S57	7.81	846	414	336	206.70	351.36	43.99	61.00	5.60	24.79	1.91	99.34	41.08	43.14	24.04	31.42
S58	9.23	417	205	148	59.67	43.92	43.99	32.10	2.20	9.74	0.62	68.16	25.73	20.79	1.89	5.37
S59	7.79	1344	658	392	270.28	409.92	123.97	173.00	8.80	38.96	1.85	214.10	23.02	66.69	25.20	20.14
S60	7.87	655	321	216	97.27	234.24	45.99	84.00	3.20	14.17	1.49	116.65	11.42	34.95	2.43	9.29
S61	7.85	2486	1210	224	203.35	273.28	589.87	215.00	1.90	8.41	0.63	438.69	94.97	60.58	12.65	14.15
S62	6.72	82.30	40	8	15.67	9.76	14.00	28.04	4.80	21.25	0.67	23.26	4.80	4.75	0.93	14.37
S63	7.65	1507	738	268	514.55	297.68	297.93	287.50	2.30	10.18	3.11	177.15	23.68	98.05	65.50	19.42
S64	7.20	8260	4045	296	996.08	361.12	2449.45	397.50	4.00	17.71	1.73	1503.35	99.82	325.27	44.65	25.24
S65	8.73	23480	11751	328	122.10	195.20	8148.16	2180.00	2.40	10.62	1.43	6084.97	869.06	39.65	5.61	5.88

Tablas 3.4. Resultados de los análisis químicos de las muestras de agua colectadas: elementos menores y traza.

ID	B	Li	Fe	As	Br	Rb	Sr	Mo	Ba	U
	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L
S1	72.82	13.64	52.97	20.42	237.95	9.85	1046.50	0.78	19830	<0.01
S2	706.75	146.15	40.00	49.41	695.45	27.32	2467	8.40	28280	3.13
S3	383.90	38.05	27.35	6.95	1574	5.99	4458.50	5.18	37070	7.23
S4	1513.00	61.54	28.35	8.85	1693	36.69	5686	5.33	20195	31.15
S5	822.35	74.82	22.38	108.45	309.5	16.02	50.86	6.34	1675	11.67
S6	2778.50	226.85	23.69	67.87	1190.5	22.36	2507	15.98	8429	8.50
S7	1228.50	83.45	18.22	46.90	477.2	11.25	170.95	16.90	2598.50	13.71
S8	1295.00	83.62	45.46	39.11	571.15	11.19	182.55	16.46	4743	11.73
S9	441.75	216.75	21.20	18.98	169.6	4.89	1915	<0.01	159850	8.60
S10	7545.50	876.20	37.37	314.45	685.6	31.17	2372.50	23.18	11140	12.02
S11	1781.50	261.70	40.58	92.69	501.7	10.84	748.60	4.48	25430	8.33
S12	1411.50	51.53	962.35	18.19	361.95	10.53	166.80	18.60	1903	8.90
S13	350.05	57.22	31.37	11.88	523.1	1.47	787.25	3.71	12880	0.10
S14	957.20	124.80	21.73	42.03	796.45	2.95	1304.50	5.47	16205	3.19
S15	840.60	101.75	23.73	83.80	167.5	15.69	405.35	2.63	10335	3.36
S16	2386.00	196.60	390.90	234.60	1570.5	5.94	1352	12.58	63420	22.86
S17	1180.00	271.75	23.12	172.95	614.3	3.81	884.40	5.33	31995	5.08
S18	2053.00	345.85	38.84	104.85	640.45	4.07	1209.50	9.37	22555	1.88
S19	814.25	173.10	<0.01	1.31	1080.5	17.52	2344	7.41	52.87	1.65
S20	57.04	2.63	<0.01	1.99	33.355	2.13	256.40	<0.01	38.79	<0.01
S21	98.02	46.41	<0.01	34.40	269.3	8.92	829.10	2.63	124.70	0.75
S22	1486.00	222.90	<0.01	92.91	2042	22.69	3579.50	30.90	58.97	7.51
S23	297.20	22.57	<0.01	30.01	2588.5	5.14	1440.50	1.72	163.50	0.94
S24	370.20	139.10	41.84	29.45	333.1	18.03	995.90	9.47	77.68	0.18
S25	89.00	4.96	17.43	7.18	135.5	4.50	581.10	0.59	92.63	0.08
S26	1240.50	187.10	<0.01	35.98	2673.5	15.77	7095	16.55	67.25	12.55
S27	661.95	223.50	<0.01	170.95	307.85	19.19	384	13.97	52.32	7.76
S28	2488.00	61.38	4228.50	305.50	6011	20.62	154.25	42.99	56.18	10.59
S29	967.30	172.65	13.80	62.59	480.15	13.22	535.05	13.33	56.46	12.00
S30	174.65	41.94	93.26	39.50	150.15	6.68	657.20	6.32	103.60	3.66
S31	186.30	45.38	<0.01	25.50	161.8	3.67	535.30	6.49	106	3.76
S32	331.45	94.52	3.92	41.03	143.75	4.41	1120	5.46	112.65	7.02
S33	206.85	16.87	7.44	33.50	188.1	25.05	264.20	2.33	21.37	5.34
S34	594.60	72.97	<0.01	215.85	267.55	7.92	383.05	17.61	70.84	1.14
S35	259.50	63.84	2.15	129.15	239.5	22.49	903.85	0.66	110.95	5.40
S36	191.15	137.40	<0.01	59.13	188.80	45.5	378	0.18	17.18	6.44
S37	239.10	196.55	<0.01	138.35	232.20	71.605	501.80	0.40	27.09	8.02

Tablas 3.4. Resultados de los análisis químicos de las muestras de agua colectadas: elementos menores y traza.

ID	B	Li	Fe	As	Br	Rb	Sr	Mo	Ba	U
	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L
S38	515.45	354.75	62.23	134.85	225.10	64.725	174.65	3.27	17.59	4.33
S39	1491.00	105.70	<0.01	47.29	627	0.558	768.70	12.20	43.32	8.60
S40	663.60	158.35	<0.01	20.06	172.10	5.194	800.15	3.74	112.05	2.45
S41	147.70	26.72	<0.01	10.21	339.75	8.4855	510.75	0.26	134.35	0.52
S42	233.95	63.34	41.47	115.85	161.05	8.09	632.85	2.19	102.70	5.13
S43	1572.00	449.20	49.17	215.35	139.35	60.015	752.70	19.49	68.13	1.48
S44	64.09	0.46	20.09	43.72	80.19	<0.01	148.70	0.08	85.17	<0.01
S45	763.65	234.70	<0.01	81.37	300.50	66.485	588.35	3.96	53.78	2.31
S46	451.05	40.06	172.60	52.36	254.05	3.7145	788.80	4.20	208.55	11.76
S47	262.45	32.72	<0.01	15.07	265.20	21.385	558.35	2.07	76.94	2.31
S48	460.60	41.57	<0.01	21.01	350.75	29.115	563.45	5.63	33.79	3.15
S49	1121.50	75.27	<0.01	11.95	852.90	16.67	951.05	21.66	55.46	7.31
S50	535.75	83.38	<0.01	6.84	440.75	15.98	402.70	6.97	52.30	9.40
S51	762.40	118.35	<0.01	29.90	372.45	22.44	665.05	7.64	58.80	5.61
S52	962.20	145.40	347.15	22.42	1165	21.94	1475	7.27	66.23	7.27
S53	1469.00	220.90	<0.01	28.69	2049.50	6.341	2289	28.06	87.99	5.95
S54	262.05	26.92	<0.01	2.644	806.45	5.583	892.25	0.14	104.35	1.08
S55	136.45	12.98	60.03	1.928	396.85	2.164	487.30	<0.01	186.80	<0.01
S56	197.50	50.27	0.13	3.536	2503.50	4.722	1449	0.73	100.79	0.34
S57	1815.50	222.55	3.72	43.015	364.75	8.371	1587.50	8.42	73.57	8.85
S58	821.05	14.54	185.45	25.9	279.20	4.8695	166.55	14.30	46.43	1.09
S59	2601.00	411.25	<0.01	26.94	1791	23.88	549.80	3.30	29.96	43.47
S60	2732.00	271.45	19.65	22.29	469.20	9.0485	218.50	7.18	22.79	10.42
S61	4128.50	309.95	840.25	93.825	9441	38.245	2079	249.25	46.65	27.19
S62	167.80	18.52	273.00	7.811	103.30	9.0915	19.75	<0.01	6.67	9.97
S63	739.05	155.55	32.41	3.023	1266	4.6205	4108.50	14.12	56.88	11.23
S64	2729.00	984.35	90.63	43.13	21210	125.35	8429.50	14.42	57.65	39.66
S65	12225.00	1486.00	3.20	688.45	157350	302.4	3403	2129	63.19	90.16

3.2 Análisis estadístico

En el presente apartado se describen los valores máximos, mínimos, desviaciones estándar y promedios en el área de estudio (Tablas 3.5–3.8).

- Temperatura

La temperatura promedio en la región de Salinas de Hidalgo es de 21.6°C, con un rango entre la mínima (14.2°C, noria S53) y la máxima (31.6°C, pozo S36) de 17.4°C. La temperatura promedio de los pozos se encuentra 3.1°C arriba de la media en el área; con una mínima de 19.1°C y una máxima de 31.6°C. El resto de los aprovechamientos obtuvieron una temperatura media por debajo de la media general, siendo el manantial el que presentó la temperatura más baja (16.1°C). Los bordos y lagunas obtuvieron promedios similares (21.5°C y 21.2°C, respectivamente) con valores mínimos (18.3 y 18.1°C) y máximos (26.1 y 26.8°C) cercanos.

- pH

El valor de pH (7.9) en el área se considera básico con un mínimo de 6.7 (S62, presa) y un máximo de 10.3 (S20, bordo). También se considera básico el pH de las norias (7.9); su rango va desde 7.2 (considerado neutro) hasta 8.5 (ligeramente alcalino). Los pozos presentaron un pH medianamente básico (7.7) y su rango se encuentra desde 6.9 (neutro) hasta 8.1 (básico). Igualmente, el manantial presentó un pH medianamente básico (7.7). Las lagunas registraron un pH ligeramente alcalino (8.8); con un rango de 8.2–9.4 (básico–alcalino). Los aprovechamientos con valores de pH que van de 8.4 (básico) hasta alcanzar 10.3 (fuertemente alcalino) son los bordos, que consideran un pH alcalino (9.6). El valor de pH más bajo, 6.7, se considera neutro y lo registró la presa (AEFA, s.f).

- Conductividad eléctrica y Sólidos Disueltos Totales

El valor promedio de conductividad eléctrica en el área fue igual a 1621 $\mu\text{S}/\text{cm}$, se registró una mínima de 7.9 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (S57, noria) y una máxima de 41,061 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (S65, noria). De manera general, las lagunas fueron los aprovechamientos que obtuvieron altas conductividades eléctricas, con un rango corto de 2254 a 2430 $\mu\text{S}/\text{cm}$, el promedio fue de 2328.7 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Las norias obtuvieron una media de 2578.9 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y un amplio rango de 7.9–41,061 $\mu\text{S}/\text{cm}$. La conductividad eléctrica promedio de los pozos es de 1027 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (mínima, 448.6 $\mu\text{S}/\text{cm}$; máxima, 8651 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Por su parte, los bordos presentaron una conductividad promedio de 257.2 $\mu\text{S}/\text{cm}$ con una mínima de 121.3 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y una máxima de 476.8 $\mu\text{S}/\text{cm}$. El manantial registró una conductividad de 965 $\mu\text{S}/\text{cm}$, en tanto que la presa registró una de 74.1 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Existe una relación de la conductividad eléctrica con los *Sólidos Disueltos Totales*, siendo comprendidos en más de un 90% por iones mayores: Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} (Kehew, 2000). Tomando esto en cuenta y considerando los valores promedio obtenidos por los iones mayores, las mismas muestras que obtuvieron un valor por encima de los 2000 $\mu S/cm$ registraron también concentraciones de sodio, magnesio, calcio, cloruro, bicarbonato y sulfato mayores al promedio en el área de estudio. Especialmente las muestras S64 (Na: 1503.4 mg/L; Mg:44.7 mg/L; Ca: 325.3 mg/L, Cl: 2449.5 mg/L, HCO_3^- : 325.6 mg/L y SO_4^{2-} : 397.5 mg/L) y S65 (Na: 6084.9 mg/L; Mg:5.6 mg/L; Ca: 39.7 mg/L, Cl: 8148.2 mg/L, HCO_3^- : 240.5 mg/L y SO_4^{2-} : 2180 mg/L).

- Potencial REDOX

El potencial REDOX en el área de estudio es de 179.1 mV, donde los valores mínimo de 68.5 mV y máximo de 238.5 mV pertenecen a las norias. De manera descendente, la presa registró un valor de 225.1 mV. Los bordos obtuvieron un promedio de 220.1 mV, con un corto rango de 206.1 a 234.1 mV. El promedio del potencial en los pozos fue de 187.13 mV (mínimo, 76.5mV; máximo, 233mV). Las lagunas obtuvieron en promedio un valor de 173.4 mV, y su rango fue de 87.9–223.4 mV. Por su parte, las norias obtuvieron un potencial REDOX promedio de 165.1 mV. Finalmente, el manantial presentó una media de 89.3 mV.

- Oxígeno disuelto

En promedio la cantidad de oxígeno disuelto es de 4.9 mg/L, la mínima (S34, pozo) fue de 0.2 mg/L, en tanto la máxima (S16, laguna) fue de 10.0 mg/L. Por tipo de aprovechamiento, las lagunas fueron las que obtuvieron la media más alta con un valor de 7.2 mg/L, la mínima fue de 2.8 mg/L y la máxima de 10.0 mg/L. Con un valor promedio cercano al anterior, los bordos obtuvieron 7.0 mg/L (mínima, 5.5 mg/L; máxima, 8.7 mg/L). Los pozos registraron una media de 5.0 mg/L; su rango va desde 0.2 a 8.4 mg/L. En promedio, las norias obtuvieron 4.1 mg/L con un mínimo de 0.3 mg/L y un máximo de 6.6 mg/L. Los resultados de oxígeno disuelto para la presa y el manantial fueron de 3.7 y 3.5, respectivamente.

- Sodio

La media fue de 234.0 mg/L con valor mínimo (S20, bordo) y máximo (S65, noria) de 10.6 y 6085.0 mg/L. Las lagunas y norias se encuentran por encima de la media de sodio en el área, siendo sus promedios 481.3 y 355.9 mg/L, respectivamente. Los rangos de los grupos mencionados anteriormente son de 325.7–679.5 mg/L en lagunas y 15.3–6085.0 mg/L en norias. El manantial presentó un resultado de 166.8 mg/L. Los pozos obtuvieron un promedio de 147.3 mg/L (mínimo,

25.7 mg/L; máximo, 1503.4 mg/L). Los valores de sodio más bajos los obtuvieron los bordos, 28.0 mg/L (mínimo, 10.6 mg/L; máximo, 68.2 mg/L) y la presa, 23.3 mg/L.

- Potasio

El promedio de potasio en la región de Salinas de Hidalgo es de 35.4 mg/L, la mínima es igual a 4.4 mg/L (S39, pozo) y la máxima es de 869.1 mg/L (S65, noria). El promedio más alto por tipo de aprovechamiento lo obtuvieron las lagunas 76.6 mg/L (mínimo, 37.7 mg/L; máximo, 97.2 mg/L). Las norias, con un promedio de 57.1 mg/L, obtuvieron un valor mínimo de 5.4 mg/L y un máximo de 869.1 mg/L. Los pozos presentaron un promedio de 18.3 mg/L (mínimo, 4.4 mg/L; máximo, 99.8 mg/L). Por otro lado, los bordos registraron una media de 15.8 mg/L, mínima de 7.9 mg/L y máxima de 25.7 mg/L. El manantial registró un valor de 5.7 mg/L y la presa de 4.8 mg/L.

- Calcio

La media de calcio en el área de estudio fue de 53.3 mg/L, la mínima de 4.7 mg/L y la máxima de 325.3 mg/L fueron obtenidas por las muestras S62 y S64, respectivamente. Las norias fueron las únicas en obtener un promedio (64.4 mg/L) por arriba del general del área, los valores mínimo y máximo fueron de 22.7 y 136.8 mg/L. Los pozos obtuvieron un promedio cercano al general, que fue de 51.4 mg/L, con una mínima de 17.1 mg/L y una máxima de 325.3 mg/L. Las lagunas registraron un promedio de 40.1 mg/L (mínima, 7.4 mg/L; máxima, 60.6 mg/L). El manantial y los bordos obtuvieron promedios cercanos: 28.3 y 27.4 mg/L. La presa obtuvo un valor de 4.8 mg/L.

- Magnesio

El promedio en el área fue de 18.2 mg/L, la mínima de 0.9 mg/L y la máxima de 140.6 mg/L. El promedio en norias fue de 29.6 mg/L; mínima de 2.4 mg/L y máxima de 140.6 mg/L. En pozos el promedio fue de 12.5 mg/L; mínima de 0.9 mg/L y máxima de 46.0 mg/L. Las lagunas obtuvieron un promedio de 10.6 mg/L; mínima de 4.5 mg/L y máxima de 14.6 mg/L. El manantial obtuvo un resultado de 9.5 mg/L. En bordos el promedio fue de 3.2 mg/L (mínima, 1.9 mg/L; máxima, 4.8 mg/L). El valor más bajo de magnesio lo obtuvo la presa, 0.9 mg/L.

- Nitrógeno de nitrato

En el área de estudio, el promedio fue de 4.3 mg/L, la mínima fue de 0.1 mg/L (S16, laguna) y la máxima de 23.0 mg/L (S23, noria). Los únicos aprovechamientos en rebasar dicho valor son las norias, 5.8 mg/L (mínima, 0.6 mg/L; máxima, 23.0 mg/L) y la presa (4.8 mg/L). Las lagunas obtuvieron un promedio de 4.1 mg/L, la mínima fue de 0.1 mg/L y la máxima de 10.4 mg/L.

Los pozos obtuvieron un resultado promedio de 3.5 mg/L (mínima, 0.8 mg/L; máximo, 6.5 mg/L). Los valores más bajos fueron obtenidos por el manantial (1.3 mg/L) y por los bordos, 1.2 mg/L (mínimo, 0.6 mg/L; máximo, 2.2 mg/L).

- Bicarbonatos

El promedio en el área de estudio fue de 261.7 mg/L con un valor mínimo de 6.6 mg/L y un valor máximo de 571.4 mg/L. El valor más alto lo registró el manantial (347.9 mg/L). Las lagunas registraron un promedio de 338.5 mg/L (mínimo, 236.9 mg/L; máximo, 405.5 mg/L). El promedio en norias fue de 294.9 mg/L, con una mínima de 158.8 mg/L y una máxima de 571.4 mg/L. Los pozos obtuvieron un promedio de 256.8 mg/L (mínima, 133.9 mg/L; máxima, 423.9 mg/L). Los bordos registraron una media de 77.1 mg/L, una mínima de 22.6 mg/L y una máxima de 117.1 mg/L. El valor más bajo fue de 6.6 mg/L (presa).

- Sulfatos

El promedio fue de 160.3 mg/L, la mínima en el área fue de 2.5 mg/L y la máxima de 2180.0 mg/L. El promedio más alto por tipo de aprovechamiento lo obtuvieron las lagunas (253.3 mg/L) con una mínima de 145 mg/L y una máxima de 400.0 mg/L. Las norias registraron un promedio de 230.0 mg/L (mínima, 9.5 mg/L; máxima, 2180.0 mg/L). El manantial obtuvo el mismo resultado que el promedio en el área (160.0 mg/L). Los pozos presentaron un promedio igual a 118.3 mg/L, en tanto la mínima fue de 22.3 y la máxima de 675.0 mg/L. El valor que la presa obtuvo fue de 28.0 mg/L. Finalmente los bordos registraron un resultado de 13.4 mg/L (mínima, 2.5 mg/L; máxima, 32.1 mg/L).

- Cloruros

El promedio es igual a 250.4 mg/L con un rango muy amplio separa al valor mínimo (12.0 mg/L) del máximo (8148.2 mg/L). Las lagunas obtuvieron un promedio igual a 477.9 mg/L, un mínimo de 176.0 mg/L y un máximo de 667.8 mg/L. Las norias registraron la concentración de cloruros máxima en el área (muestra S65), su promedio fue de 432.3 mg/L. El rango de concentración de cloruros en pozos va desde 24.0 mg/L a 2449.5 mg/L, este tipo de aprovechamientos obtuvo un promedio de 124.2 mg/L. El valor promedio de cloruros en el manantial fue de 60 mg/L. El promedio de cloruros en los bordos fue de 28.5 mg/L (mínimo, 18.0 mg/L; máximo, 44.0 mg/L). La presa obtuvo un promedio de 14.0 mg/L.

- Fluoruros

El promedio de fluoruros en el área es de 1.8 mg/L, la mínima registrada es de 0.2 mg/L (S20, bordo) y la máxima es de 8.1 mg/L (S28, laguna). Los aprovechamientos que exhiben el mayor promedio fueron las lagunas (3.5 mg/L) con un rango entre la mínima (0.6 mg/L) y la máxima (8.1 mg/L) de 7.5 mg/L. El manantial obtuvo un resultado de 2.4 mg/L. Los pozos obtuvieron un promedio de 2.0 mg/L (mínima, 0.3 mg/L; máxima, 5.4 mg/L). Las norias presentaron un promedio de 1.6 mg/L, la mínima fue de 0.4 mg/L y la máxima de 3.4 mg/L. La presa obtuvo un resultado de 0.7 mg/L. La media en los bordos fue de 0.4 mg/L (mínima, 0.2 mg/L; máxima, 0.6 mg/L).

- Arsénico

En el área de estudio, el promedio de arsénico fue de 0.0726 mg/L, se obtuvo una mínima de 0.0013 mg/L y una máxima de 0.6885 mg/L. El promedio más alto por tipo de aprovechamiento, fueron las lagunas (0.2113 mg/L). El valor mínimo fue de 0.09382 mg/L y el valor máximo 0.3055 mg/L. Los pozos presentaron una media de 0.08305 mg/L (mínimo, 0.0013 mg/L; máximo, 0.31445 mg/L). El promedio de arsénico en norias fue de 0.05527 mg/L (mínimo, 0.001928 mg/L; máximo, 0.6885 mg/L). El manantial obtuvo un resultado de 0.0391 mg/L. Los bordos obtuvieron un promedio de 0.0197 mg/L (mínimo, 0.00199 mg/L; máximo, 0.04371 mg/L). Finalmente, la concentración obtenida por la presa fue de 0.0078 mg/L.

- Uranio

El uranio promedio fue de 0.0089 mg/L, y las concentraciones van desde la mínima (0.000005 mg/L) hasta la máxima (0.0902 mg/L). Las lagunas obtuvieron una concentración promedio de 0.02021 mg/L (mínima, 0.0106 mg/L; máxima, 0.0272 mg/L). Las norias obtuvieron un promedio de 0.0117 mg/L (mínima, 0.000005 mg/L; máxima, 0.0902 mg/L). El manantial obtuvo un resultado promedio de 0.0117 mg/L, mientras que la presa obtuvo 0.01 mg/L. Los pozos registraron un valor promedio de 0.0065 mg/L (mínima, 0.0001 mg/L; máxima, 0.0397 mg/L).

Tabla 3.5. Parámetros estadísticos de las muestras de agua en pozos.

Pozos					
Parámetro	Unidad	Mínima	Máxima	Media	Desviación estándar
T	°C	19.1	31.6	24.7	2.8
pH		6.9	8.1	7.7	0.3
ORP	mV	76.5	233	187.1	55.7
Cond	μS/cm	448.6	8651	1027	1467.7
O.D	mg/L	0.16	8.4	5.0	1.9
HCO ₃		133.9	423.9	256.8	66.2
Cl		24.0	2449.5	124.2	432.8
SO ₄		22.3	675	118.3	134.0
N-NO ₃		0.8	6.5	3.5	1.4
F		0.3	5.4	2	1.03
Na		25.7	1503.4	147.3	261.2
K		4.4	99.8	18.3	16.5
Ca		17.1	325.3	51.4	53.2
Mg		0.9	46.0	12.5	11.1
As		μg/L	1.3	314.5	83.1
U	0.2		39.7	6.5	7.1

Tabla 3.6. Parámetros estadísticos de las muestras de agua en norias.

Norias					
Parámetro	Unidad	Mínima	Máxima	Media	Desviación estándar
T	°C	14.2	22.8	18.2	2.1
pH		7.2	8.5	7.9	0.3
ORP	mV	68.5	238.5	165.1	68.8
Cond	μS/cm	7.9	41061	2578.9	8040.6
O.D	mg/L	0.3	6.6	4.1	1.7
HCO ₃		158.8	571.4	294.9	95.3
Cl		12.0	8148.2	432.2	1610.1
SO ₄		9.5	2180	230	436.0
N-NO ₃		0.6	23	5.8	5.4
F		0.4	3.4	1.6	0.9
Na		15.3	6085.0	355.9	1196.5
K		5.4	869.1	57.1	170.1
Ca		22.7	136.8	64.4	31.8
Mg		2.4	140.6	29.6	29.8
As		μg/L	1.9	688.5	55.3
U	0.0		90.2	11.7	19.0

Tabla 3.7. Parámetros estadísticos de las muestras de agua en bordos.

Bordos					
Parámetro	Unidad	Mínima	Máxima	Media	Desviación estándar
T	°C	18.3	26.1	21.5	3.7
pH		8.4	10.3	9.6	0.9
ORP	mV	206.1	234.1	220.1	11.4
Cond	μS/cm	121.3	476.8	257.2	158.9
O.D	mg/L	5.5	8.7	7.0	1.7
HCO ₃		22.6	117.1	77.1	43.7
Cl		18.0	44.0	28.5	11.5
SO ₄		2.5	32.1	13.4	13.1
N-NO ₃		0.6	2.2	1.2	0.7
F		0.2	0.6	0.3	0.2
Na		10.6	68.2	28.0	27.3
K		7.9	25.7	15.8	9.2
Ca		20.8	37.6	27.4	7.7
Mg		1.9	4.8	3.2	1.4
As		μg/L	2.0	43.7	19.7
U	0.0		1.1	0.3	0.5

Tabla 3.8. Parámetros estadísticos de las muestras de agua en lagunas.

Lagunas					
Parámetro	Unidad	Mínima	Máxima	Media	Desviación estándar
T	°C	18.1	26.8	21.2	4.8
pH		8.2	9.4	8.8	0.6
ORP	mV	87.9	223.4	173.4	74.4
Cond	μS/cm	2254	2430	2328.7	91.0
O.D	mg/L	2.8	10.0	7.2	3.8
HCO ₃		236.9	405.5	338.5	89.4
Cl		176.0	667.8	477.9	264.4
SO ₄		145	400	253.3	131.8
N-NO ₃		0.1	10.4	4.1	5.5
F		0.6	8.1	3.5	4.01
Na		325.7	679.5	481.3	180.7
K		37.7	97.2	76.6	33.7
Ca		7.4	60.6	40.1	28.6
Mg		4.5	14.6	10.6	5.4
As		μg/L	93.8	305.5	211.3
U	10.6		27.2	20.2	8.6

3.3 Determinación de familias de agua

Es importante presentar los datos de los análisis químicos de una manera sencilla y eficaz. Por lo tanto, estos se han representado de manera visual.

3.3.1 Familias de agua por ion dominante

El diagrama de Piper es una representación gráfica conveniente de un gran número de datos. Desarrollado por Piper en 1944, consiste en dos triángulos: el triángulo derecho agrupa los aniones (HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- y CO_3^{2-}) y el triángulo izquierdo agrupa los cationes (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+); lo que permite la visualización de la tendencia de la composición de las muestras. Ambos triángulos representan las concentraciones como porcentaje en meq/L. La proyección hacia arriba de estos dos puntos a lo largo de líneas paralelas a los lados del diagrama se cruza en un punto en el cuadrante del diamante, representando algún tipo de agua (Clark, 2015; Figura 3.4).

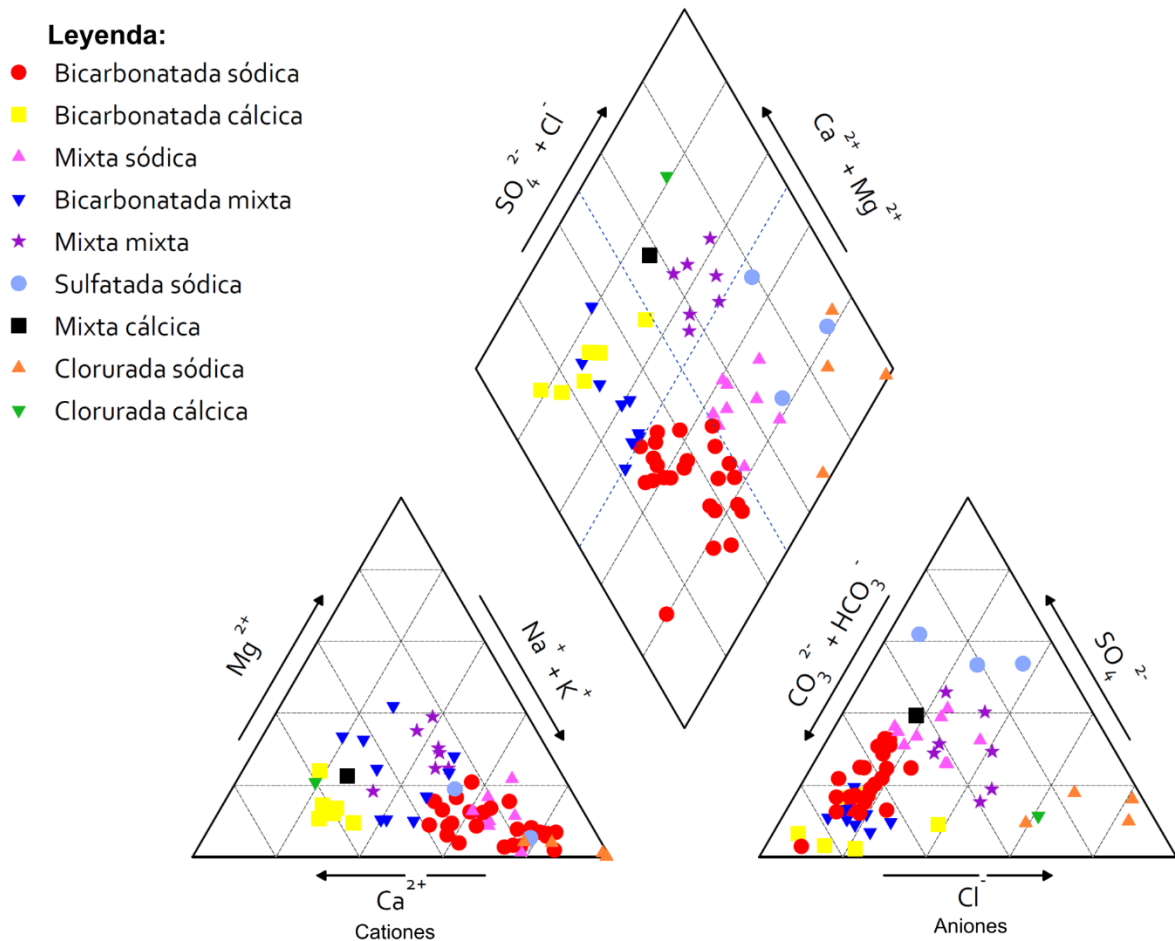


Figura 3.4. Diagrama de Piper: determinación de las familias de agua por ion dominante.

Se determinaron nueve familias de agua de las cuales predominan las bicarbonatadas sódicas ($\text{HCO}_3\text{-Na}$) en un 36.9%. El 15.4% del total de las muestras pertenecen a la familia de agua bicarbonatada mixta. La familia de agua mixta sódica tiene una presencia del 13.9%, seguida de la familia mixta-mixta con un 10.8%. El 9.2% de las muestras pertenece a la familia bicarbonatada cálcica ($\text{HCO}_3\text{-Ca}$). La familia clorurada sódica (Cl-Na) representa el 6.2%, en tanto la familia sulfatada sódica ($\text{SO}_4\text{-Na}$) representa el 4.6%. El 3% restante lo conforman las familias mixta cálcica (1.5%) y clorurada cálcica (1.5%) (Tabla 3.9).

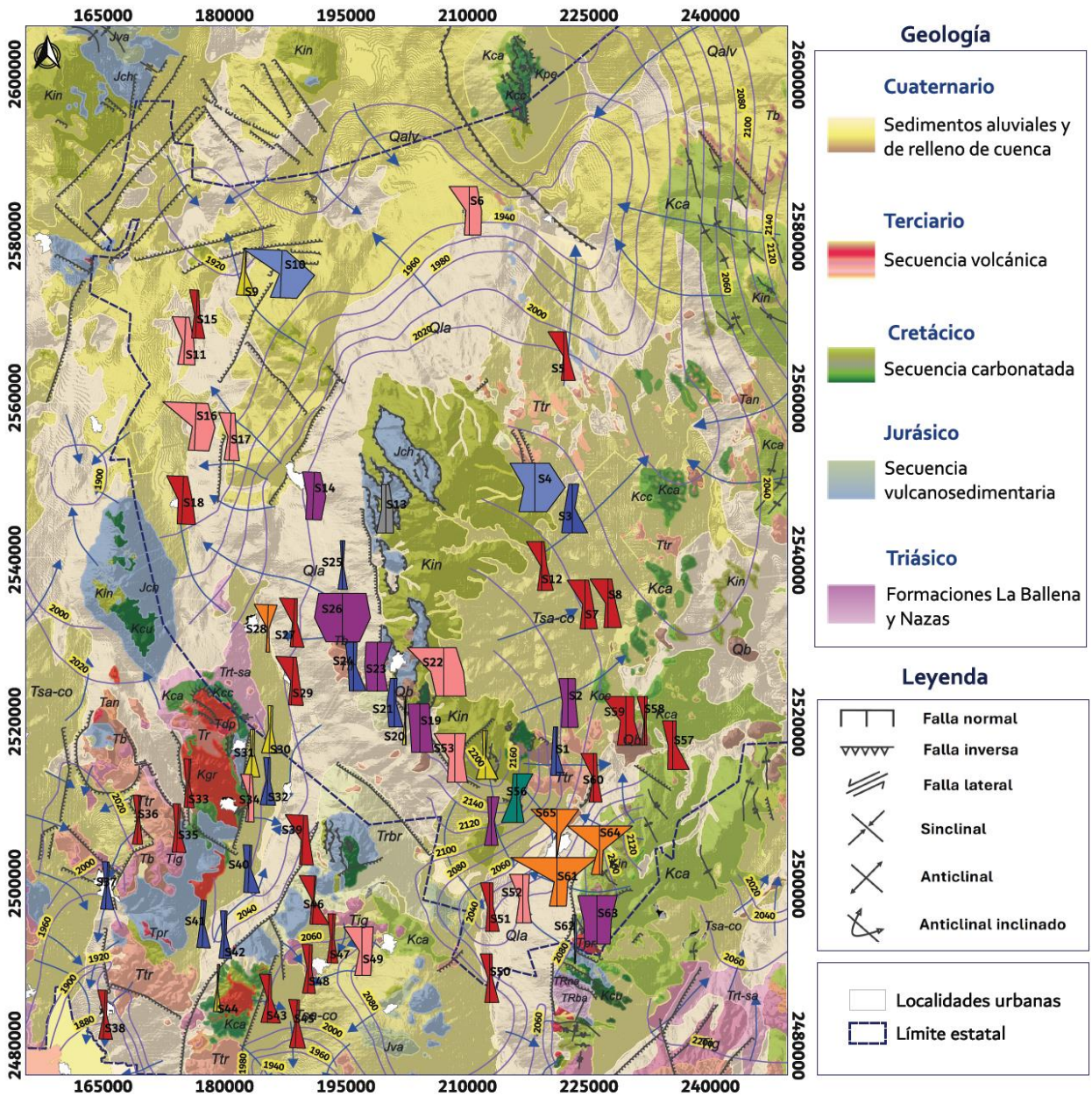
Tabla 3.9. Número de muestras por tipo de familia de agua en el área de Salinas de Hidalgo.

Familia de agua	Muestras	No. De muestras
$\text{HCO}_3\text{-Na}$	S5, S7, S8, S12, S15, S18, S27, S29, S33, S35, S36, S38, S39, S43, S45-S48, S50, S51, S57-S60	24
$\text{HCO}_3\text{-Ca}$	S9, S20, S30, S31, S44, S55	6
$\text{HCO}_3\text{-mixta}$	S1, S3, S21, S24, S25, S32, S37, S40, S41, S42	10
Mixta-mixta	S2, S14, S19, S23, S26, S54, S63	7
Mixta-Ca	S13	1
Mixta-Na	S6, S11, S16, S17, S22, S34, S49, S52, S53	9
$\text{SO}_4\text{-Na}$	S4, S10, S62	3
Cl-Ca	S56	1
Cl-Na	S28, S61, S64, S65	4

3.3.2 Diagramas de Stiff

El diagrama de Stiff es una representación gráfica del análisis químico de forma poligonal en función de las concentraciones de los iones dominantes. Consiste en tomar sobre semirrectas paralelas igualmente espaciadas y cortadas por una normal, segmentos proporcionales a los meq/L de cada ion y unir los extremos dando así un polígono representativo (Pérez, 2008).

En la figura 3.5 se observa que los aprovechamientos pertenecientes a la familia de agua Bicarbonatada Sódica ($\text{HCO}_3\text{-Na}$) tienen mayor presencia en el área y generalmente se ubican en las partes topográficamente más altas. Se relacionan principalmente con rocas volcánicas (porción oeste). También se encuentran asociadas con rocas sedimentarias (porción este).



Proyecto:
Fuentes geogénicas y mecanismos de movilización de arsénico, fluoruro y uranio a sistemas de flujo de agua subterránea en la Sierra Madre Occidental

Mapa:
Diagramas de Stiff: Distribución de las familias de agua

Datum WGS 1984
Zona 13 Q
Coordenadas UTM
Rivera, 2021

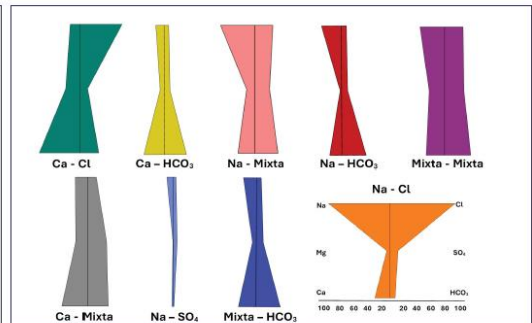


Figura 3.5. Diagramas de Stiff: Distribución de las familias de agua en el área de estudio (Rivera, 2021).

Las familias de agua bicarbonatada mixta, mixta–mixta, mixta sódica y mixta cálcica se encuentran mayormente asociadas a sedimentos y rocas sedimentarias. Se ubican en las porciones centro–oeste. Las muestras clasificadas como agua sulfatada sódica ($\text{SO}_4\text{–Na}$) se vinculan a sedimentos y rocas volcánicas y sedimentarias.

Se observan dos familias de agua en donde predomina el ion cloruro: clorurada cálcica (Cl–Ca) y clorurada sódica (Cl–Na). Ambas familias se ubican en la porción sureste y se vinculan con sedimentos de relleno de cuenca.

3.4 Análisis estadístico por familia de agua

Los resultados de campo y laboratorio fueron objeto de un análisis estadístico por tipo de familia de agua (Tablas 3.10 – 3.18) que consistió en mínimos, máximos, desviaciones estándar y promedios de los parámetros más relevantes. De acuerdo con los objetivos del presente estudio, en el área se tienen tres familias de agua que presentaron una concentración de arsénico, fluoruro y uranio por encima del promedio general.

Los valores de arsénico presentaron un rango de concentraciones promedio que van desde 0.0035 mg/L (clorurada cálcica) hasta los 0.2827 mg/L (clorurada sódica). Las familias de agua con las concentraciones promedio por arriba de la media general fueron aquellas que presentan el sodio como catión dominante. En orden ascendente estas fueron: 1) mixta sódica (media = 0.1044 mg/L; mínimo = 0.01195 mg/L; máximo = 0.2346 mg/L), 2) sulfatada sódica (media = 0.1104 mg/L; mínimo = 0.0078 mg/L; máximo = 0.3145 mg/L) y 3) clorurada sódica (media = 0.2827 mg/L; mínimo = 0.0431 mg/L; máximo = 0.6885 mg/L).

Por su parte, las concentraciones promedio de fluoruro obtuvieron un rango de 2.5 mg/L entre la mínima (0.5 mg/L, familia clorurada cálcica) y la máxima (3.0 mg/L, clorurada sódica). Las familias de agua con concentraciones promedio arriba o igual a la media general, fueron: bicarbonatada sódica (media = 2.0 mg/L; mínima = 0.6 mg/L; máxima = 3.4 mg/L), sulfatada sódica (media = 2.0 mg/L; mínima = 0.7 mg/L; máxima = 2.7 mg/L), mixta sódica (media = 2.4 mg/L; mínima = 1.3 mg/L; máxima = 5.4 mg/L) y clorurada sódica (media = 3.0 mg/L; mínima = 0.6 mg/L; máxima = 8.1 mg/L).

En la mayoría de las familias de agua, las concentraciones promedio se encuentran debajo de la concentración promedio en la región de Salinas de Hidalgo. Las únicas familias que rebasaron dicho valor fueron: la sulfatada sódica (media = 0.0177 mg/L; mínima = 0.01 mg/L; máxima =

0.0311 mg/L) y la clorurada sódica (media 0.0419 mg/L; mínima = 0.0106 mg/L; máxima = 0.0902 mg/L).

De acuerdo con lo anterior, las familias de agua que presentaron las concentraciones más elevadas en el área (aquellas por encima del promedio general) se caracterizan por una temperatura entre los 20 y los 22 °C. Un pH que va de un mínimo de 6.7 (neutro) en la familia sulfatada sódica, a un máximo de 9.4 (alcalino) en la familia clorurada sódica. También se caracterizan por altas conductividades eléctricas hasta de 41061 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Tabla 3.10. Estadística básica: familia de agua Bicarbonatada sódica.

Bicarbonatada Sódica ($\text{HCO}_3^- - \text{Na}$)						
Parámetro	Unidad	Mínima	Máxima	Media	Desviación Estándar	
T	°C	16.0	31.6	22.7	4.0	
pH		7.4	10.2	7.9	0.5	
ORP	mV	68.5	238.3	184.0	61.1	
Cond	$\mu\text{S}/\text{cm}$	7.9	1225.0	683.5	260.0	
O.D	mg/L	0.3	7.5	5.0	1.7	
HCO_3^-		61.5	420.9	267.9	87.0	
Cl		18.1	124.0	41.8	20.9	
SO_4^-		11.0	195.0	81.7	52.4	
N- NO_3^-		0.8	8.8	3.6	1.9	
F		0.6	3.4	2.0	0.7	
Na		49.5	214.1	111.7	48.5	
K		4.4	41.1	16.5	9.0	
Ca		17.1	66.7	34.2	11.5	
Mg		1.8	25.2	8.7	6.4	
As		$\mu\text{g}/\text{L}$	6.8	215.4	65.8	53.5
U			1.1	43.5	8.4	8.4

Tabla 3.11. Estadística básica: familia de agua Bicarbonatada mixta.

Bicarbonatada Mixta					
Parámetro	Unidad	Mínima	Máxima	Media	Desviación Estándar
T	°C	17.3	27.4	22.7	3.5
pH		7.4	9.4	7.9	0.6
ORP	mV	71.6	229.5	188.8	62.0
Cond	μS/cm	268.0	905.0	551.3	170.8
O.D	mg/L	2.3	8.4	5.5	2.0
HCO ₃		117.1	377.3	239.3	72.2
Cl		24.0	92.0	37.8	20.6
SO ₄		12.0	52.5	34.2	12.1
N-NO ₃		0.6	12	4.19	3.2
F		0.2	3.9	1.3	1.1
Na		20.9	78.6	43.2	18.5
K		8.9	21.6	14.3	4.4
Ca		36.4	90.0	46.3	16.3
Mg		4.8	38.6	18.3	12.1
As		μg/L	6.9	138.4	42.4
U	0.005		8.0	3.1	3.3

Tabla 3.12. Estadística básica: familia de agua Mixta sódica.

Mixta Sódica					
Parámetro	Unidad	Mínima	Máxima	Media	Desviación Estándar
T	°C	14.2	29.6	22.3	5.1
pH		7.6	9.0	8.0	0.4
ORP	mV	83.8	233.0	159.8	68.8
Cond	μS/cm	603.0	2254.0	1214.0	504.3
O.D	mg/L	0.16	9.99	5.0	2.7
HCO ₃		150.9	571.4	299.5	120.4
Cl		32.0	184.0	116.0	58.7
SO ₄		94.75	400.0	215.1	114.3
N-NO ₃		0.1	6.5	3.4	1.8
F		1.3	5.4	2.4	1.3
Na		92.2	342.1	188.2	89.6
K		8.1	37.7	22.9	8.6
Ca		22.3	60.9	49.3	12.3
Mg		0.9	63.0	19.6	17.9
As		μg/L	11.95	234.6	104.4
U	1.1		22.9	8.2	5.9

Tabla 3.13. Estadística básica: familia de agua Mixta - mixta.

Mixta - Mixta					
Parámetro	Unidad	Mínima	Máxima	Media	Desviación Estándar
T	°C	15.2	25.0	18.5	3.3
pH		7.5	8.2	7.8	0.3
ORP	mV	77.3	238.5	181.0	67.3
Cond	μS/cm	489.7	2546.0	1257.8	636.9
O.D	mg/L	1.9	6.6	4.2	1.9
HCO ₃		158.8	418.8	285.7	87.6
Cl		88.0	341.9	185.1	102.4
SO ₄		48.5	550.0	231.6	162.5
N-NO ₃		0.9	23.0	7.3	9.0
F		0.4	3.1	1.3	1.0
Na		40.2	226.5	123.3	60.9
K		12.6	56.5	26.8	14.2
Ca		57.4	136.8	79.9	29.4
Mg		13.9	140.6	55.7	41.6
As		μg/L	1.3	49.4	23.5
U	0.9		12.5	4.8	4.9

Tabla 3.14. Estadística básica: familia de agua Bicarbonatada cálcica.

Bicarbonatada Cálcica (HCO ₃ - Ca)					
Parámetro	Unidad	Mínima	Máxima	Media	Desviación Estándar
T	°C	17.2	26.4	20.5	3.9
pH		7.3	10.3	8.1	1.2
ORP	mV	87.2	224.2	178.7	57.7
Cond	μS/cm	121.3	555.0	385.6	191.0
O.D	mg/L	0.8	8.7	4.9	2.6
HCO ₃		22.6	321.8	196.1	113.9
Cl		12.0	32.0	22.3	6.9
SO ₄		2.5	41.3	19.7	17.0
N-NO ₃		0.6	6.6	2.4	2.2
F		0.2	2.0	1.2	0.9
Na		10.6	29.4	19.6	8.3
K		7.4	15.1	10.1	3.5
Ca		22.2	76.0	54.2	22.6
Mg		2.2	16.5	8.0	5.1
As		μg/L	1.9	43.7	21.9
U	0.0		8.6	2.7	3.4

Tabla 3.15. Estadística básica: familia de agua Clorurada sódica.

Clorurada Sódica (Cl - Na)						
Parámetro	Unidad	Mínima	Máxima	Media	Desviación Estándar	
T	°C	18.1	24.1	20.1	2.7	
pH		6.9	9.4	8.2	1.0	
ORP	mV	209.0	223.4	215.5	6.3	
Cond	μS/cm	2302.0	41061.0	13611.0	18538.4	
O.D	mg/L	2.7	8.6	5.2	2.9	
HCO ₃		236.9	405.5	302.1	80.2	
Cl		589.9	8148.2	2963.8	3561.3	
SO ₄		145.0	2180.0	734.4	969.6	
N-NO ₃		1.9	10.4	4.7	3.9	
F		0.6	8.1	3.0	3.4	
Na		438.7	6085.0	2176.6	2645.1	
K		95.0	869.1	290.3	385.9	
Ca		7.4	325.3	108.2	146.3	
Mg		4.5	44.7	16.9	18.9	
As		μg/L	43.1	688.5	282.7	293.4
U			10.6	90.2	41.9	34.3

Tabla 3.16. Estadística básica: familia de agua Sulfatada sódica.

Sulfatada Sódica (SO ₄ - Na)						
Parámetro	Unidad	Mínima	Máxima	Media	Desviación Estándar	
T	°C	16.1	26.6	20.2	5.6	
pH		6.7	7.2	7.1	0.3	
ORP	mV	86.0	225.1	134.1	78.9	
Cond	μS/cm	74.1	2646.0	1736.0	1441.4	
O.D	mg/L	1.1	3.9	2.9	1.6	
HCO ₃		6.6	424.0	243.9	214.5	
Cl		14.0	212.0	95.3	103.6	
SO ₄		28.0	675.0	434.3	353.9	
N-NO ₃		4.8	13.9	8.0	5.1	
F		0.7	2.7	1.8	1.0	
Na		23.3	383.4	214.1	181.0	
K		4.8	93.6	38.9	47.9	
Ca		4.7	131.0	73.3	63.8	
Mg		0.9	54.2	21.3	28.7	
As		μg/L	7.8	314.5	110.4	176.7
U			10.0	31.1	17.7	11.7

Tabla 3.17. Estadística básica: familia de agua Mixta cálcica.

Mixta Cálcica		
Parámetro	Unidad	Valor
T	°C	18.9
pH		7.9
ORP	mV	79.4
Cond	μS/cm	731.0
O.D	mg/L	3.9
HCO ₃		196.0
Cl		48.0
SO ₄		142.5
N-NO ₃		3.7
F		0.8
Na		40.2
K		7.1
Ca		77.1
Mg		20.4
As	μg/L	11.9
U		0.1

Tabla 3.18. Estadística básica: familia de agua Clorurada cálcica.

Clorurada Cálcica (Cl - Ca)		
Parámetro	Unidad	Valor
T	°C	18.5
pH		7.4
ORP	mV	217.2
Cond	μS/cm	1021.0
O.D	mg/L	4.8
HCO ₃		180.8
Cl		233.9
SO ₄		59.0
N-NO ₃		4.9
F		0.5
Na		34.3
K		19.6
Ca		126.2
Mg		26.4
As	μg/L	3.5
U		0.3

3.5 Análisis de correlación

El coeficiente r de Pearson es una medida estadística que indica la relación lineal entre dos variables (Castañeda, 1996). La fórmula para calcular el coeficiente r de Pearson es la siguiente (ec. 3.2).

$$r = \frac{N \sum xy - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{[N \sum x^2 - (\sum x)^2][N \sum y^2 - (\sum y)^2]}} \quad (\text{ec. 3.2})$$

donde:

r = coeficiente de correlación de Pearson.

N = número total de muestras.

x = valor crudo en la variable X.

y = valor crudo en la variable Y.

El valor del índice de correlación de Pearson está entre -1 y +1. La interpretación del coeficiente depende de su valor (Coeficiente de correlación de Pearson, 2023):

- $r = -1$: las dos variables tienen una correlación perfecta negativa, por lo que se puede trazar una recta con pendiente negativa en la que se encuentren todos los puntos.
- $-1 < r < 0$: la correlación entre las dos variables es negativa, por lo tanto, cuando una variable aumenta la otra disminuye. Cuanto más cerca esté el valor de -1 significa que más relacionadas negativamente están las variables.
- $r = 0$: la correlación entre las dos variables es muy débil, de hecho, la relación lineal entre ellas es nula. Sin embargo, no significa que las variables sean independientes, ya que podrían tener una relación no lineal.
- $0 < r < 1$: la correlación entre las dos variables es positiva, cuanto más cerca esté el valor de +1 más fuerte es la relación entre las variables. En este caso, una variable tiende a incrementar su valor cuando la otra también aumenta.
- $r = 1$: las dos variables tienen una correlación perfecta positiva, es decir, tienen una relación lineal positiva.

Con los resultados de iones principales y otros elementos se realizó una matriz de correlación con la cual se identificaron los parámetros que influyen en las concentraciones de arsénico, fluoruro y uranio.

En la tabla 3.19 se resaltaron los coeficientes de correlación que fueron significativos ($p < 0.05$): en azul los coeficientes con respecto al arsénico, en rosa los coeficientes con respecto al fluoruro y en amarillo aquellos con respecto al uranio.

Dentro de la correlación de arsénico con diversos parámetros se destaca: conductividad eléctrica ($r = 0.75$; $p = 0.02$), carbonato ($r = 0.55$; $p = 0.000004$), potasio ($r = 0.75$; $p = 0.0002$), sulfato ($r = 0.74$; $p = 0.003$), boro ($r = 0.79$; $p = 0.000002$), litio ($r = 0.71$; $p = 0.00003$), vanadio ($r = 0.59$; $p = 0.03$), rubidio ($r = 0.72$; $p = 0.000004$) y uranio ($r = 0.61$; $p = 0.000001$).

Los coeficientes de correlación significativos con respecto al uranio fueron: conductividad eléctrica ($r = 0.84$; $p = 0.01$), sodio ($r = 0.85$; $p = 0.02$), potasio ($r = 0.83$; $p = 0.03$), sulfato ($r = 0.84$; $p = 0.00005$), boro ($r = 0.80$; $p = 0.000001$), litio ($r = 0.77$; $p = 0.0000002$) y rubidio ($r = 0.80$; $p = 0.0009$).

En cuanto al fluoruro, el coeficiente de correlación significativo fue titanio ($r = 0.55$; $p = 0.049$).

Tabla 3.19. Coeficiente de correlación de parámetros fisicoquímicos.

	T (°C)	pH	ORP	Cond	O.D	HCO ₃	CO ₃	Na	K	Ca	Mg	Cl	SO ₄	F	B	Li	V	As	Br	Rb	Mo	U	Al	Ti	Fe	Sr	
Temp	1																										
pH	-0.08	1																									
ORP	0.13	0.07	1																								
Cond	-0.07	0.08	0.05	1																							
O.D	0.19	0.41	0.02	0.07	1																						
HCO ₃	-0.22	-0.19	-0.22	0.06	-0.24	1																					
CO ₃	-0.14	0.58	0.17	0.55	0.30	0.20	1																				
Na	-0.07	0.10	0.07	1	0.08	0.08	0.58	1																			
K	-0.11	0.13	0.08	0.99	0.09	0.04	0.59	0.98	1																		
Ca	-0.08	-0.36	-0.02	0.15	-0.28	0.25	-0.21	0.14	0.07	1																	
Mg	-0.36	-0.19	0.02	0.02	-0.25	0.45	0	-0.01	0.01	0.55	1																
Cl	-0.09	0.08	0.10	0.99	0.06	0.03	0.54	0.99	0.98	0.21	0.02	1															
SO ₄	-0.10	0.02	-0.07	0.92	0	0.24	0.51	0.91	0.91	0.22	0.22	0.89	1														
F	0.22	0.04	-0.03	0	-0.03	0.30	0.30	0.04	0	-0.13	-0.15	0	0.03	1													
B	-0.03	0.06	-0.09	0.81	0.03	0.28	0.50	0.83	0.80	0.11	-0.03	0.79	0.88	0.12	1												
Li	0.10	-0.14	-0.01	0.78	-0.02	0.29	0.34	0.80	0.73	0.38	0.04	0.78	0.79	0.06	0.87	1											
V	0.15	-0.01	-0.32	0.27	0.11	0.39	0.26	0.29	0.24	-0.07	-0.12	0.22	0.43	0.37	0.63	0.47	1										
As	0.21	0.12	-0.04	0.75	0.20	0.19	0.55	0.76	0.75	-0.13	-0.20	0.71	0.74	0.33	0.79	0.71	0.59	1									
Br	-0.09	0.10	0.08	0.99	0.08	0	0.55	0.99	0.99	0.07	-0.03	0.99	0.89	-0.02	0.79	0.74	0.22	0.74	1								
Rb	0.10	-0.05	0.13	0.91	0.04	0.03	0.43	0.91	0.88	0.23	-0.05	0.91	0.81	0.07	0.74	0.83	0.20	0.72	0.90	1							
Mo	-0.09	0.13	0.08	0.97	0.09	-0.01	0.55	0.97	0.99	-0.04	-0.07	0.96	0.88	-0.03	0.79	0.70	0.23	0.75	0.99	0.86	1						
U	-0.13	-0.01	0.01	0.84	-0.02	0.22	0.44	0.85	0.83	0.28	0.07	0.84	0.84	0.10	0.80	0.77	0.30	0.61	0.81	0.80	0.79	1					
Al	-0.09	0.33	0.07	0.02	0.24	0.16	0.55	0.07	0.08	-0.15	-0.10	0.05	0	0.59	0.11	-0.06	0.21	0.29	0.02	-0.01	0.01	0.04	1				
Ti	-0.07	0.28	0.14	0.03	0.21	0.18	0.53	0.09	0.10	-0.11	-0.11	0.07	0	0.55	0.15	-0.01	0.22	0.30	0.03	0.01	0.03	0.08	0.98	1			
Fe	-0.09	0.32	0.02	0.01	0.21	0.17	0.52	0.07	0.07	-0.14	-0.12	0.05	-0.01	0.59	0.13	-0.06	0.21	0.26	0.01	-0.01	0.01	0.06	0.97	0.96	1		
Sr	-0.22	-0.25	-0.06	0.32	-0.32	0.42	0.02	0.31	0.28	0.82	0.76	0.35	0.47	-0.04	0.30	0.44	0.04	0.05	0.25	0.33	0.17	0.42	-0.10	-0.08	-0.10	1	

3.6 Índices de saturación

Una forma de calcular el grado de saturación de una solución con respecto a un mineral es mediante la comparación del producto de solubilidad K con el producto análogo de las actividades (Producto de Actividad Iónica, PAI) (Appelo y Postma, 2005). Que en escala logarítmica recibe el nombre de Índice de Saturación (IS) (ec. 3.3):

$$IS = \log\left(\frac{PAI}{K}\right) \quad (\text{ec. 3.3})$$

Si se obtiene un Índice de Saturación (IS) = 0, significa que la solución está en equilibrio con el mineral; cuando el IS < 0, entonces el agua subterránea se encuentra subsaturada con respecto al mineral. Mientras tanto, si el IS > 0, la solución se encuentra sobresaturada. Con esta información es posible definir si el agua subterránea disuelve los minerales presentes en las rocas por donde fluye, o si por el contrario se precipitan (Kehew, 2000).

Las muestras se encuentran en equilibrio o sobresaturadas con respecto a la calcita (CaCO_3), dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) y calcedonia (SiO_2); mientras que se encuentran subsaturadas o en equilibrio con respecto a la fluorita (CaF_2) y el yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) (Figuras 3.6 – 3.10). Lo anterior es mayormente visible en familias de agua sódica mixta, sódica clorurada y sódica bicarbonatada asociadas a rocas sedimentarias que contienen minerales como la calcita o el cuarzo.

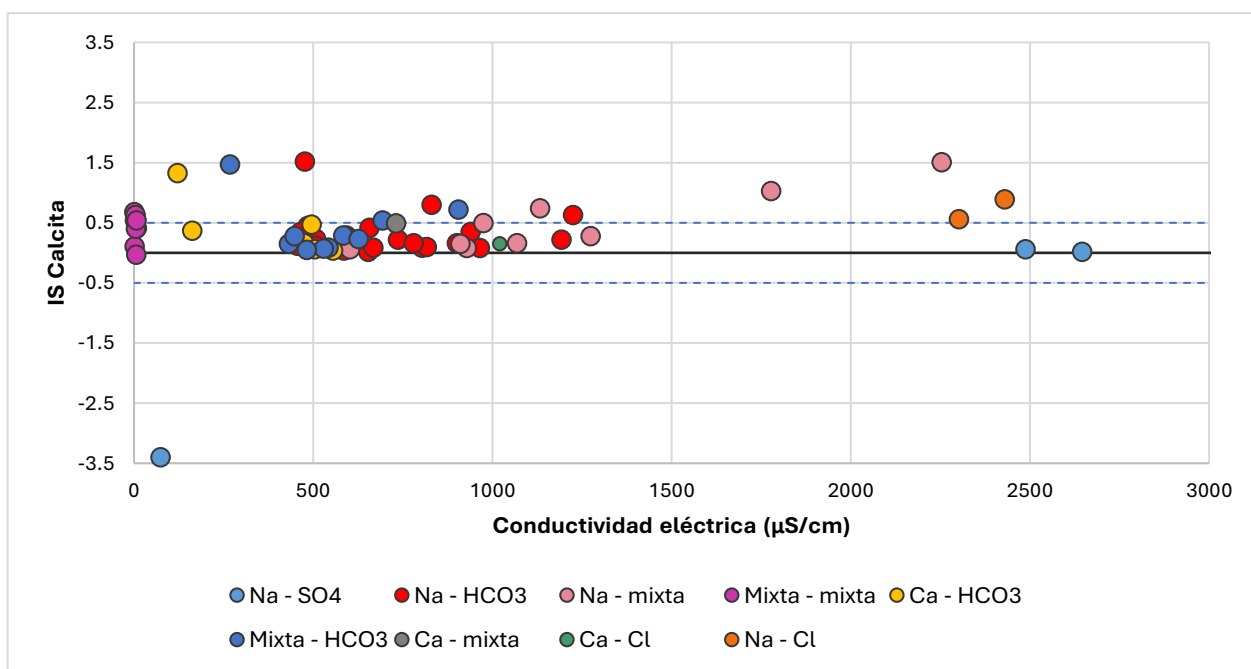


Figura 3.6. Índice de saturación calculado con respecto a la calcita (CaCO_3).

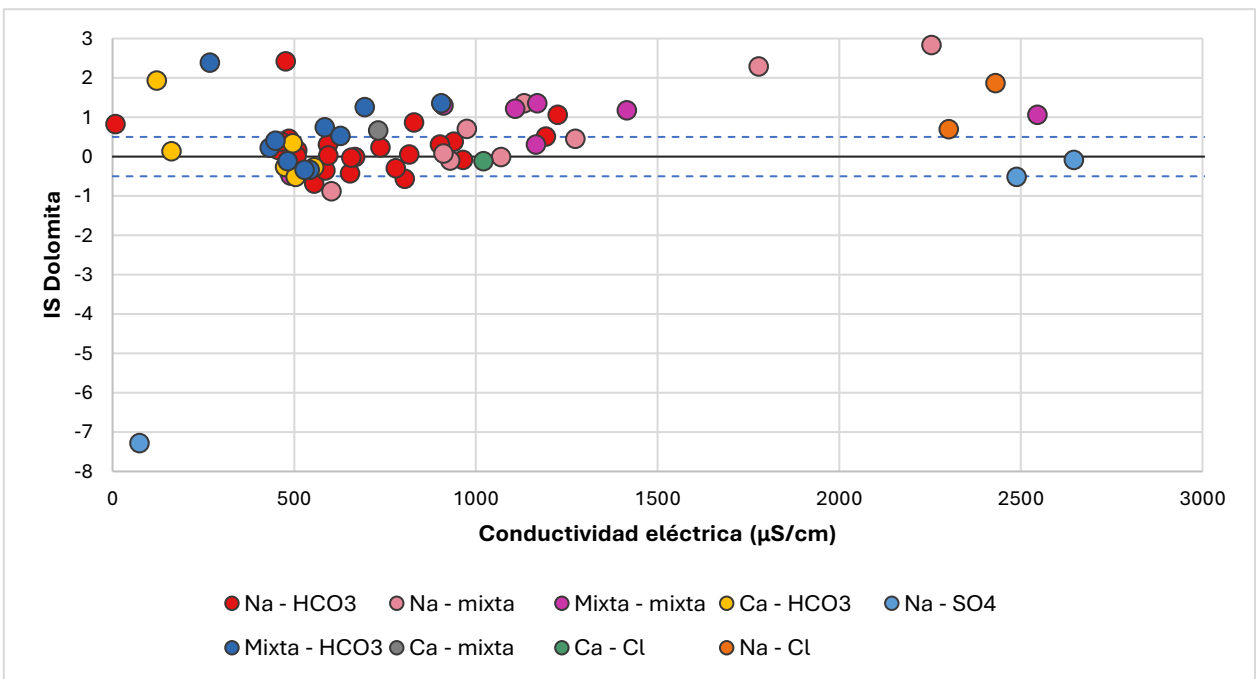


Figura 3.7. Índice de saturación calculado con respecto a la dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$).

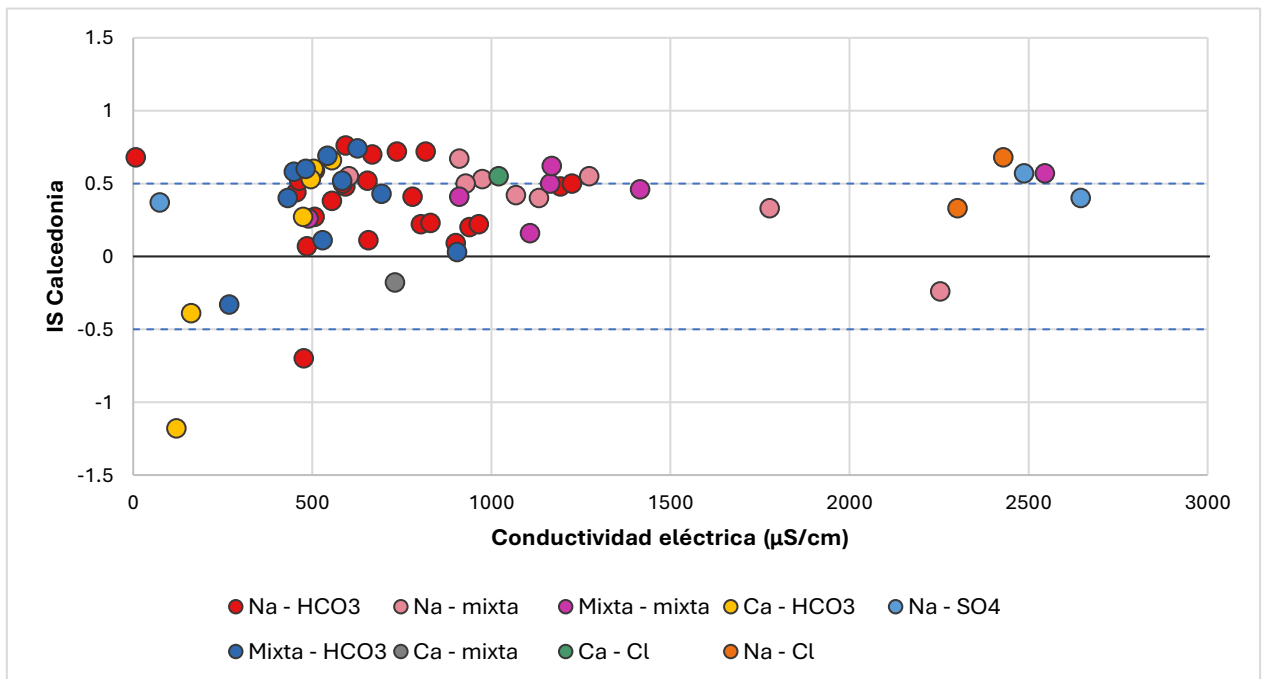


Figura 3.8. Índice de saturación calculado con respecto a la calcedonia (SiO_2).

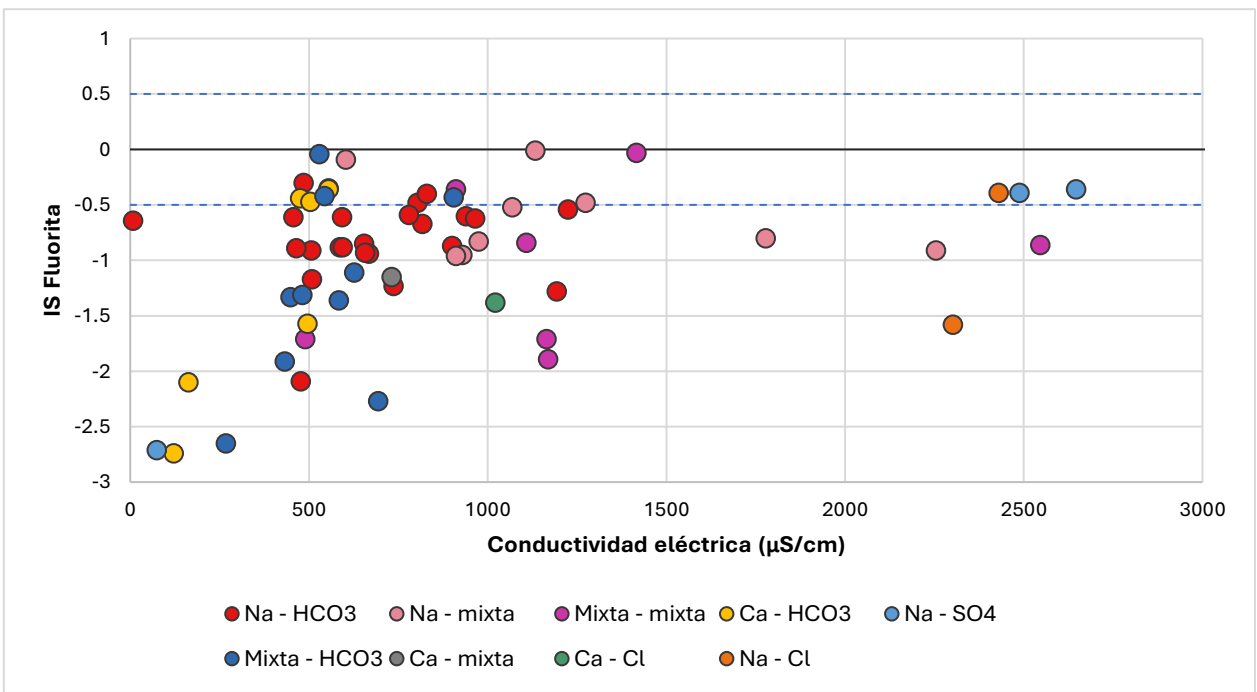


Figura 3.9. Índice de saturación calculado con respecto a la fluorita (CaF₂).

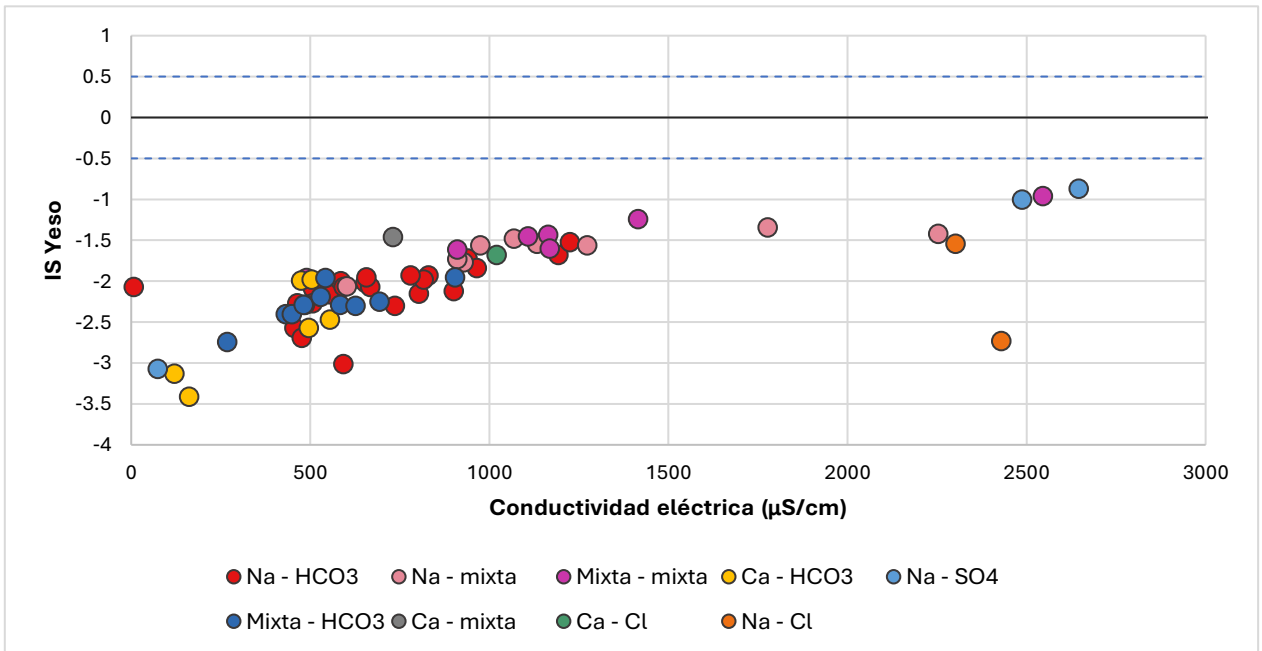


Figura 3.10. Índice de saturación calculado con respecto al yeso (CaSO₄ · 2H₂O).

3.7 Especies acuosas estables del arsénico, fluoruro y uranio.

Los diagramas de Eh-pH o diagramas Redox son gráficas útiles que sirven para representar la estabilidad de las especies disueltas en el agua, en función del Eh (o pe) y del pH (Freeze y Cherry, 1979; Appelo y Postma, 2005).

De manera general, los valores de pH se sitúan entre 6.7 (neutro) y 10.3 (fuertemente alcalino). Mientras que el Eh se encuentran entre los 296.6 y 436.6 mV, posteriormente convertidos a pe (ec. 3.4).

$$pe = \frac{Eh * F}{2.303RT} \quad (\text{ec. 3.4})$$

en donde:

- Eh (mV).
- F (23061 cal/V), cte de Faraday.
- R (1.987 cal/mol·K), cte. de gas ideal.
- °K.

Las figuras 3.11, 3.12 y 3.13 señalan el ambiente en el que se encuentran el arsénico, fluoruro y uranio, respectivamente. En el caso del arsénico, el total de las muestras se ubica en la zona correspondiente al arseniato (H_2AsO_4^- y HAsO_4^{2-}), además de señalar un ambiente oxidante. En cuanto al fluoruro, se observa que las muestras se ubican en la zona correspondiente al fluoruro y bicarbonatos, además de señalar también un ambiente oxidante. el Para el uranio, las muestras indican que se encuentran en un ambiente oxidante, lo que podría favorecer la movilización del uranio a través de la formación de complejos de carbonato aniónico soluble, como $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2^{2-}$ (Stanley y Wilkin, 2019). Los aprovechamientos se ubican en los campos de $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2^{2-}$ y $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3^{4-}$, lo que refleja la disponibilidad de iones CO_3^{2-} y por lo tanto aumentan las especies de carbonato de uranio (Pandit *et al.*, 2022).

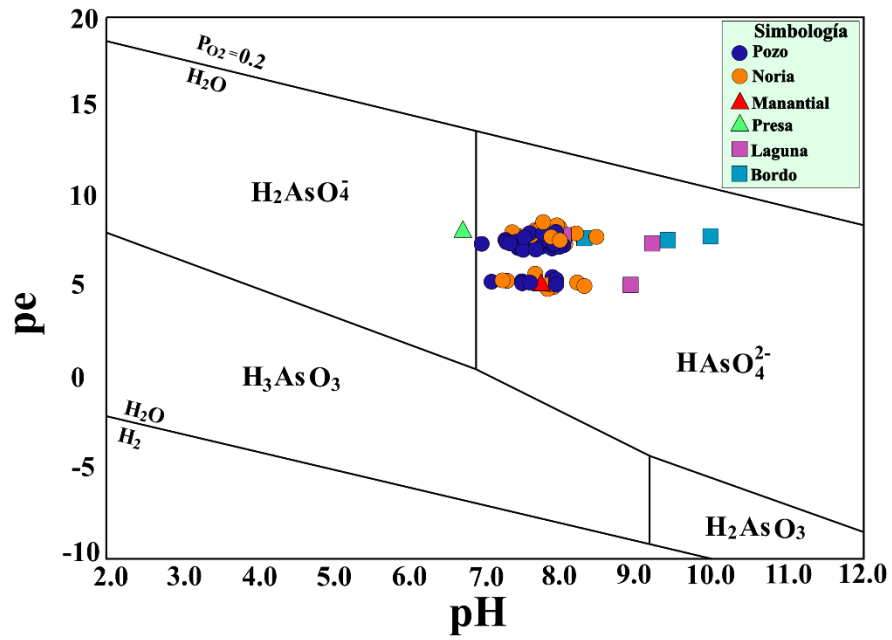


Figura 3.11. Diagrama de Eh-pH para arsénico.

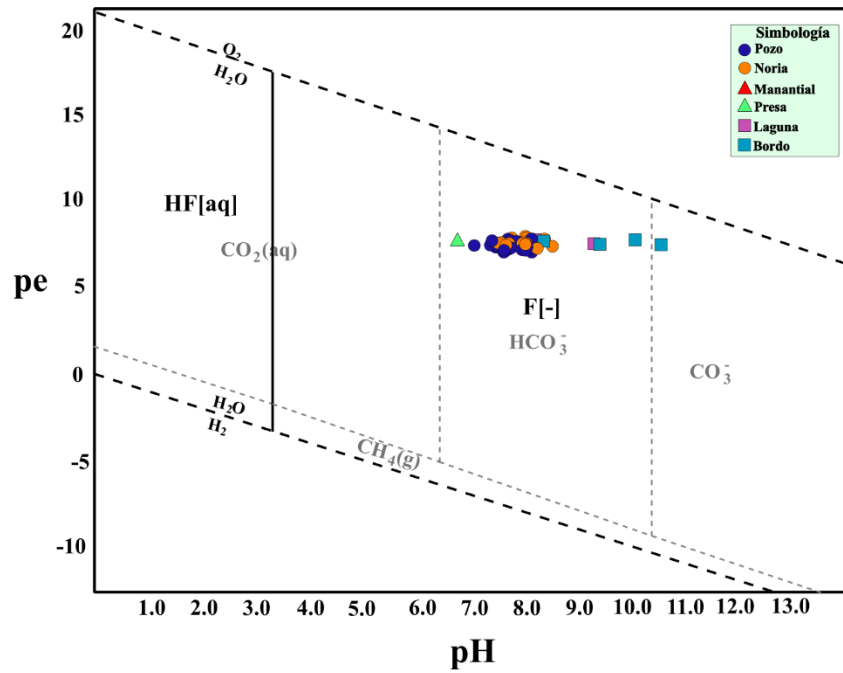


Figura 3.12. Diagrama de Eh-pH para fluoruro.

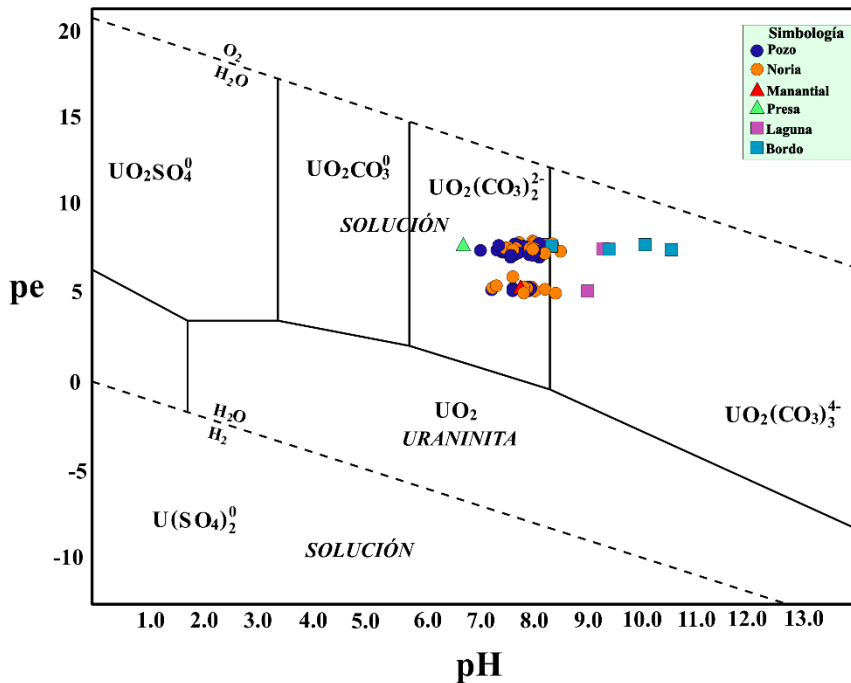


Figura 3.13. Diagrama de Eh-pH para uranio.

3.8 Controles de solubilidad con respecto al arsénico, fluoruro y uranio

De acuerdo con el medio hidrogeológico y las familias de agua, las mayores concentraciones de arsénico promedio se asocian a las familias de agua mixta sódica, sulfatada sódica y clorurada sódica, ligadas a su vez con el medio granular compuesto por arenas, limos y arcillas que contienen óxidos de hierro y silicatos. Además del arsénico, especies ricas en oxígeno como carbonato, bicarbonato y sulfato pueden encontrarse presentes en un ambiente oxidante, estos pueden competir con el arsénico por sitios de adsorción en los óxidos de hierro, por lo que, de ser abundantes podrían desplazar al arsénico de los sitios de adsorción, favoreciendo su liberación (Fernández, 2020).

Por otra parte, la presencia de fluoruro en el agua es controlada por la solubilidad de la fluorita; donde el calcio es controlado por la solubilidad de la calcita, la dolomita y la fluorita. Cuando el agua se encuentra saturada con respecto a los minerales anteriormente mencionados, implica que el calcio precipite como carbonato, disminuyendo su concentración. La baja concentración de calcio favorece el incremento de fluoruro en el agua (Espino, 2023). Las concentraciones por arriba de 2.0 mg/L (promedio en el área) se encuentran en las familias de agua bicarbonatada sódica, sulfatada sódica, mixta sódica y clorurada sódica, vinculada en el caso de la primera al medio

fracturado (unidad 3a) que presenta minerales de calcita, dolomita, yeso y cuarzo, asociadas comúnmente a la actividad hidrotermal y a la fluorita (Maldonado, 2023).

Como en el caso del arsénico, el uranio puede competir por sitios de adsorción en los óxidos de hierro, las arcillas (montmorillonita), los feldespatos o los minerales de titanio, presentes en las rocas sedimentarias del medio fracturado (unidad 3a). Las familias de agua que obtuvieron los promedios más altos de uranio (por encima del promedio de 0.0089 mg/L) fueron sulfatada sódica y clorurada sódica vinculadas con los sedimentos de relleno de cuenca, por lo que se sugiere que la temperatura juega un papel fundamental en la liberación y movilización del uranio a través del medio fracturado.

Las aguas con temperaturas más altas contienen las concentraciones más elevadas de iones y elementos traza, lo que puede observarse en la relación directa del uranio y el arsénico con litio, rubidio, boro, vanadio, sulfato, sodio, potasio y esto a su vez, con la conductividad eléctrica.

4. Evaluación de la calidad del agua para abastecimiento de la población.

Las concentraciones de arsénico y fluoruro se compararon con la norma oficial mexicana NOM-127-SSA1-2021, para uso y consumo humano de agua. Para el caso del uranio, las concentraciones se compararon con el límite máximo permitido en Alemania de 0.01 mg/L. De esta manera es posible definir el porcentaje de aprovechamientos hídricos que sobrepasan los estándares nacionales e internacionales de calidad del agua.

En la tabla 4.1 se presentan los valores de los parámetros comprendidos dentro de las especificaciones físicas, químicas y de metales y metaloides en la NOM-127-SSA1-2021 (se considera también el límite máximo permitido en Alemania) de cada una de las muestras. Únicamente se reportan los parámetros que obtuvieron valores superiores al límite de detección. Las concentraciones de Cd, Co, Pb Ni, Cr, Hg y Mn no representan problemas de calidad en el agua para la zona de estudio.

4.1 Evaluación por arsénico

El arsénico (As) es un metaloide que se encuentra de manera natural en el ambiente. Se trata de un elemento geogénico derivado de la meteorización de más de 200 minerales, así como de la actividad volcánica e hidrotermal (Jarquín, 2019). Es altamente reactivo; se encuentra formando oxianiones de arsenito (As^{3+}) y arseniato (As^{5+}). Su disponibilidad y movilidad en el ambiente depende del pH, la concentración del oxígeno, el contenido de materia orgánica y la presencia de

carbonatos, óxidos e hidróxidos de metales (Rivera, 2016). Representa un riesgo a la salud dado su alto grado de toxicidad y carcinogenicidad (Mandal y Suzuki, 2002). Junto a otros elementos como el mercurio (Hg) o el cadmio (Cd), reciben el nombre de Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT) (Baccini y Roberts, 1996; Gonzáles – Mendoza, 2008).

El 83.1 % (54 muestras) se encuentra por encima del límite permitido por la norma mexicana (0.01 mg/L). Estas muestras de agua manifestaron también valores de concentración de Li (0.0005–1.486 mg/L), B (0.0641–12.225 mg/L) y Sr (0.0509–8.4295 mg/L), indicando un largo recorrido del agua subterránea, lo que explicaría que las concentraciones de As se deben a procesos de interacción agua – roca y/o proceso de evaporación en zonas de descarga.

Se observó que un mayor número de aprovechamientos se ubica en sedimentos, que a su vez registraron las concentraciones más altas de arsénico, principalmente dentro de las familias de agua mixta sódica, sulfatada sódica y clorurada sódica. Estas concentraciones podrían estar relacionadas con procesos de evaporación en zonas de descarga de flujos regionales (p.ej. El Barril), así como fuentes geogénicas derivadas de sedimentos ricos en líticos volcánicos presentes en el material de relleno de la zona de estudio (Anawar *et al.*, 2011).

De las muestras de agua que sobrepasaron la norma mexicana (58.5%) 73.7% es de uso público–urbano, 23.7% de uso público–urbano–agrícola y 1.5% de uso doméstico. Esto es mayormente observable en las porciones centro–suroeste del área de estudio (Figura 4.1), donde las concentraciones de arsénico se encuentran relacionadas con la interacción agua–roca en un medio fracturado/ rocas volcánicas con valores que pueden alcanzar concentraciones de hasta 0.1384 mg/L en el agua subterránea.

4.2 Evaluación por fluoruro

El fluoruro se encuentra en el agua como ion F^- . Está presente en minerales como fluorita (CaF_2) y apatita ($Ca_5(Cl, F, OH)(PO_4)_3$). La meteorización de estos puede liberar el fluoruro (Fetter, 2018). También puede formar complejos en el agua con un número de cationes, incluyendo el aluminio, berilio y el hierro férrico (Hem, 1985).

La NOM–127–SSA1–2021 considera un límite 1.0 mg/L para el fluoruro. El 73.9% del total de las muestras rebasa dicho parámetro, registrándose un rango de concentración de fluoruro de entre 1.0 y 8.1 mg/L, en agua en contacto con sedimentos y rocas volcánicas (Figura 4.2). Del porcentaje que rebasa el límite máximo permisible de fluoruro, el 55.4% (36 muestras) es de uso: público–

urbano (26 muestras, 72.2%), público–urbano–agrícola (9 muestras, 25%) y doméstico–pecuario (2.8%).

Tabla 4.1. Muestras que rebasan los parámetros comprendidos de especificaciones físicas, químicas y de metales y metaloides en la NOM-127-SSA1-2021.

Muestra	Uso	pH	S.D.T	Dureza total	Nitrógeno de nitrato	Fluoruros	Sulfatos	Aluminio	Arsénico	Bario	Hierro	Selenio	Uranio
			mg/L							µg/L			
S1	Doméstico	7.79	198	175.89	4.40	0.42	25.00	0.05	20.42	19830	52.97	5.991	<0.01
S2	Pecuario	8.2	439	266.29	3.50	2.31	145.00	0.05	49.405	28280	40.00	15.835	3.13
S3	Agropecuario	7.81	388	383.50	4.90	1.78	45.00	0.05	6.9495	37070	27.35	2.438	7.23
S4	Doméstico-pecuario	7.23	1119	550.19	13.90	1.95	600.00	0.05	8.8455	20195	28.35	12.23	31.15
S5	Público-urbano	7.91	354	55.35	6.50	3.40	97.50	0.05	108.45	1675	22.38	4.6965	11.67
S6	Agropecuario	7.85	563	176.95	3.70	2.60	240.00	0.05	67.87	8429	23.69	8.2055	8.50
S7	Público-urbano	7.92	427	130.01	2.60	2.23	165.00	0.05	46.9	2598.50	18.22	25.025	13.71
S8	Cultural (ceremonial)	7.74	452	109.69	1.30	2.43	160.00	0.05	39.11	4743	45.46	17.785	11.73
S9	Público-urbano-agrícola	7.34	230	230.93	6.60	2.03	17.50	0.05	18.975	159850	21.20	2.7005	8.60
S10	Público-urbano	7.21	971	246.83	5.30	2.65	675.00	0.05	314.45	11140	37.37	8.5955	12.02
S11	Público-urbano	7.92	397	179.84	1.60	1.56	185.00	0.05	92.685	25430	40.58	9.165	8.33
S12	Agrícola	8.4	358	93.29	3.00	3.02	105.00	0.05	18.19	1903	962.35	12.965	8.90
S13	Agrícola	7.93	332	276.42	3.70	0.80	142.50	0.05	11.88	12880	31.37	19.715	0.10
S14	Agrícola	7.58	466	277.81	3.10	0.58	250.00	0.05	42.025	16205	21.73	16.545	3.19
S15	Público-urbano	7.93	236	114.95	1.30	1.12	65.00	0.05	83.795	10335	23.73	5.5595	3.36
S16	Agrícola-pecuario-servicios	8.96	801	191.12	0.10	1.82	400.00	520.3	234.6	63420	390.90	5.897	22.86
S17	Público-urbano	7.59	344	147.18	3.90	1.47	127.50	0.05	172.95	31995	23.12	10.5	5.08
S18	Público-urbano	7.82	490	183.47	5.10	1.10	195.00	0.05	104.85	22555	38.84	8.4735	1.88
S19	Público-urbano	7.86	535	351.43	0.90	1.42	220.00	0.05	1.314	52.87	<0.01	3.2585	1.65
S20	Agropecuario	10.34	61	64.70	0.80	0.21	7.00	5.573	1.99	38.79	<0.01	<0.01	<0.01
S21	Público-urbano-agrícola	7.91	300	258.67	12.00	0.79	32.50	0.05	34.395	124.70	<0.01	1.4215	0.75
S22	Agrícola	8.34	970	409.19	4.30	1.63	400.00	0.05	92.905	58.97	<0.01	8.063	7.51
S23	Agrícola	8.01	625	464.09	23.00	0.35	120.00	0.483	30.01	163.50	<0.01	22.79	0.94
S24	Público-urbano	8.03	319	201.41	4.10	0.33	45.00	0.05	29.45	77.68	41.84	6.03	0.18
S25	Agropecuario	9.43	129	113.54	0.60	0.20	12.00	49.875	7.18	92.63	17.43	<0.01	0.08

Tabla 4.1. Muestras que rebasan los parámetros comprendidos de especificaciones físicas, químicas y de metales y metaloides en la NOM-127-SSA1-2021.

Muestra	Uso	pH	S.D.T	Dureza total	Nitrógeno de nitrato	Fluoruros	Sulfatos	Aluminio	Arsénico	Bario	Hierro	Selenio	Uranio
			mg/L						µg/L				
S26	Público-urbano	7.45	1218	920.69	17.50	1.19	550.00	0.05	35.98	67.25	<0.01	8.651	12.55
S27	Público-urbano	7.96	335	75.17	4.20	1.47	65.00	0.05	170.95	52.32	<0.01	1.857	7.76
S28	Agropecuario	9.36	1402	37.08	10.40	8.10	145.00	6802	305.5	56.18	4228.50	2.688	10.59
S29	Público-urbano	7.84	372	86.99	4.60	2.75	139.92	0.05	62.59	56.46	13.80	2.4275	12.00
S30	Agrícola	7.51	211	192.26	2.50	1.97	41.30	0.05	39.495	103.60	93.26	0.581	3.66
S31	Público-urbano	7.33	214	199.26	2.60	1.90	40.20	0.05	25.5	106	<0.01	0.3835	3.76
S32	Público-urbano	7.43	225	166.17	1.90	2.28	52.50	0.05	41.025	112.65	3.92	0.2075	7.02
S33	Público-urbano	7.87	187	101.05	4.30	2.60	23.70	0.05	33.495	21.37	7.44	<0.01	5.34
S34	Público-urbano-agrícola	7.96	240	59.38	3.70	5.38	94.75	0.05	215.85	70.84	<0.01	0.5015	1.14
S35	Público-urbano-agrícola	7.64	223	133.13	3.30	1.52	35.80	0.05	129.15	110.95	2.15	0.8845	5.40
S36	Público-urbano	8.11	185	116.08	3.10	3.19	31.50	0.05	59.125	17.18	<0.01	<0.01	6.44
S37	Público-urbano	7.56	221	131.20	3.20	3.89	36.70	0.05	138.35	27.09	<0.01	0.3805	8.02
S38	Público-urbano	7.56	236	104.25	3.20	2.91	45.10	8.661	134.85	17.59	62.23	0.119	4.33
S39	Público-urbano	8.01	413	73.65	3.30	2.54	131.50	0.05	47.285	43.32	<0.01	2.1965	8.60
S40	Público-urbano	7.67	288	170.58	1.90	1.27	37.50	0.05	20.055	112.05	<0.01	0.6065	2.45
S41	Público-urbano	7.81	218	172.68	5.80	0.82	22.30	0.05	10.21	134.35	<0.01	1.486	0.52
S42	Público-urbano	7.61	224	135.57	3.10	0.94	33.90	9.28	115.85	102.70	41.47	0.364	5.13
S43	Público-urbano	7.35	326	155.46	0.80	2.02	62.00	8.3425	215.35	68.13	49.17	2.1775	1.48
S44	Agropecuario	8.36	87	89.22	1.30	0.36	2.50	6.447	43.715	85.17	20.09	<0.01	<0.01
S45	Público-urbano	7.4	296	148.60	2.60	1.48	54.00	0.05	81.37	53.78	<0.01	0.883	2.31
S46	Público-urbano-agrícola	7.93	331	86.00	1.30	2.45	11.00	205.3	52.355	208.55	172.60	<0.01	11.76
S47	Público-urbano	8.09	227	117.63	3.40	1.53	37.20	0.05	15.07	76.94	<0.01	1.289	2.31
S48	Público-urbano	7.63	274	132.56	3.80	1.48	61.00	0.05	21.01	33.79	<0.01	0.5785	3.15
S49	Público-urbano	7.62	485	201.30	6.50	2.16	199.00	0.05	11.95	55.46	<0.01	2.374	7.31
S50	Público-urbano-agrícola	7.86	300	119.20	6.50	1.49	59.50	0.05	6.844	52.30	<0.01	0.616	9.40

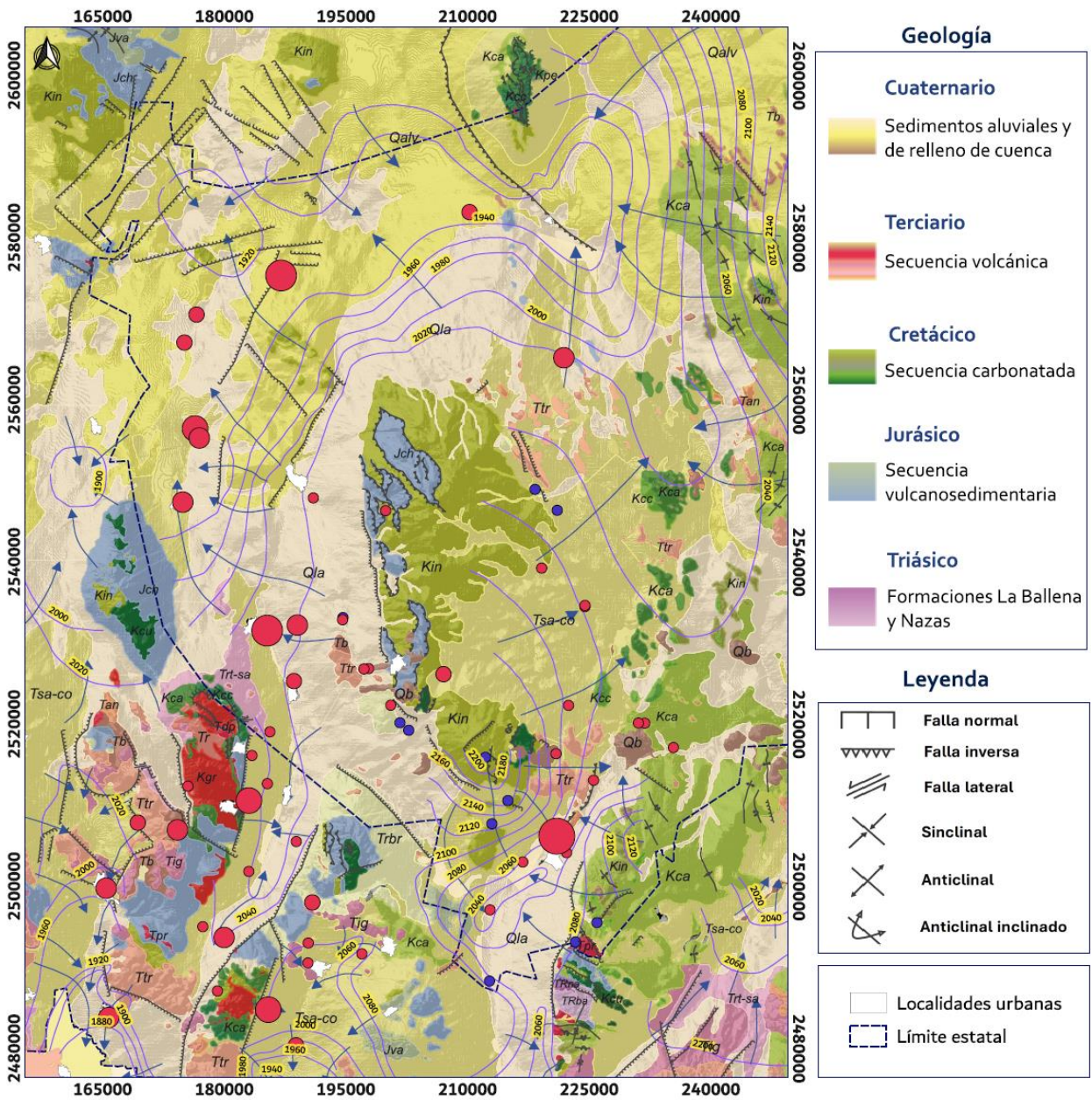
Tabla 4.1. Muestras que rebasan los parámetros comprendidos de especificaciones físicas, químicas y de metales y metaloides en la NOM-127-SSA1-2021.

Muestra	Uso	pH	S.D.T	Dureza total	Nitrógeno de nitrato	Fluoruros	Sulfatos	Aluminio	Arsénico	Bario	Hierro	Selenio	Uranio
			mg/L					µg/L					
S51	Público-urbano-agrícola	7.69	313	132.38	3.10	1.52	65.00	0.05	29.9	58.80	<0.01	0.72	5.61
S52	Agrícola	7.64	430	196.24	3.40	1.27	111.00	41.6	22.415	66.23	347.15	2.472	7.27
S53	Público-urbano	8.2	653	273.15	3.70	3.40	178.50	0.05	28.69	87.99	<0.01	7.295	5.95
S54	Agrícola	7.61	275	207.22	1.00	0.42	48.50	9.071	2.644	104.35	<0.01	1.169	1.08
S55	Agrícola	7.67	266	234.33	0.60	0.45	9.50	1.7695	1.928	186.80	60.03	<0.01	<0.01
S56	Público-urbano-agrícola	7.42	530	423.85	4.90	0.49	59.00	0.05	3.536	100.79	0.13	1.4245	0.34
S57	Público-urbano-agrícola	7.79	414	206.70	5.60	1.91	61.00	19.745	43.015	73.57	3.72	1.074	8.85
S58	Agropecuario	10.15	205	59.67	2.20	0.62	32.10	372	25.9	46.43	185.45	<0.01	1.09
S59	Público-urbano-agrícola	7.92	658	270.28	8.80	1.85	173.00	0.05	26.94	29.96	<0.01	3.993	43.47
S60	Público-urbano-agrícola	8.09	321	97.27	3.20	1.49	84.00	0.05	22.29	22.79	19.65	0.734	10.42
S61	Industrial	8.16	1210	203.35	1.90	0.63	215.00	738.1	93.825	46.65	840.25	1.639	27.19
S62	Público-urbano-agrícola	6.72	40	15.67	4.80	0.67	28.04	372.55	7.811	6.67	273.00	<0.01	9.97
S63	Agropecuario	7.75	738	514.55	2.30	3.11	287.50	0.05	3.023	56.88	32.41	2.795	11.23
S64	Público-urbano	6.94	4045	996.08	4.00	1.73	397.50	2.5445	43.13	57.65	90.63	4.809	39.66
S65	Industrial	8.5	11751	122.10	2.40	1.43	2180.00	5.5515	688.45	63.19	3.20	28.12	90.16

4.3 Evaluación por uranio

Recientemente la EPA y la OMS han definido un límite permisible de 30 ug/L para el uranio (U) debido a sus propiedades químico y radiotóxicas. Afecta principalmente las células tubulares de los riñones, pulmones y huesos. La presencia de uranio en los sistemas de agua subterránea depende de distintos aspectos como la litología, geomorfología y geología. Forma complejos con los fosfatos y los carbonatos, a pH más bajo, tiene afinidad a los fluoruros, cloruros y sus complejos (Arabi *et al.*, 2012; Kale *et al.*, 2020).

De acuerdo con el límite máximo permisible de 0.01 mg/L, el 24.6% del total (16 muestras) presentó concentraciones de entre 0.01042–0.0902 mg/L que están por encima del valor. Estas muestras se asocian a sedimentos (Figura 4.3). Del total de las muestras que rebasaron el límite máximo permisible, el 62.5% (10 muestras) son de uso: 1) público–urbano (60%), 2) uso público–urbano–agrícola (30%) y doméstico–pecuario (10%).



Proyecto:
Fuentes geogénicas y mecanismos de movilización de arsénico, fluoruro y uranio a sistemas de flujo de agua subterránea en la Sierra Madre Occidental

Mapa:
Concentraciones de arsénico en el área

Datum WGS 1984
Zona 13 Q
Coordenadas UTM
Rivera, 2021

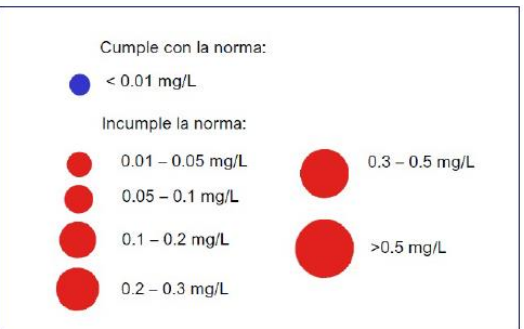


Figura 4.1. Concentraciones de arsénico en el área de estudio que rebasan la NOM-127-SSA1-2021 (Rivera, 2021).

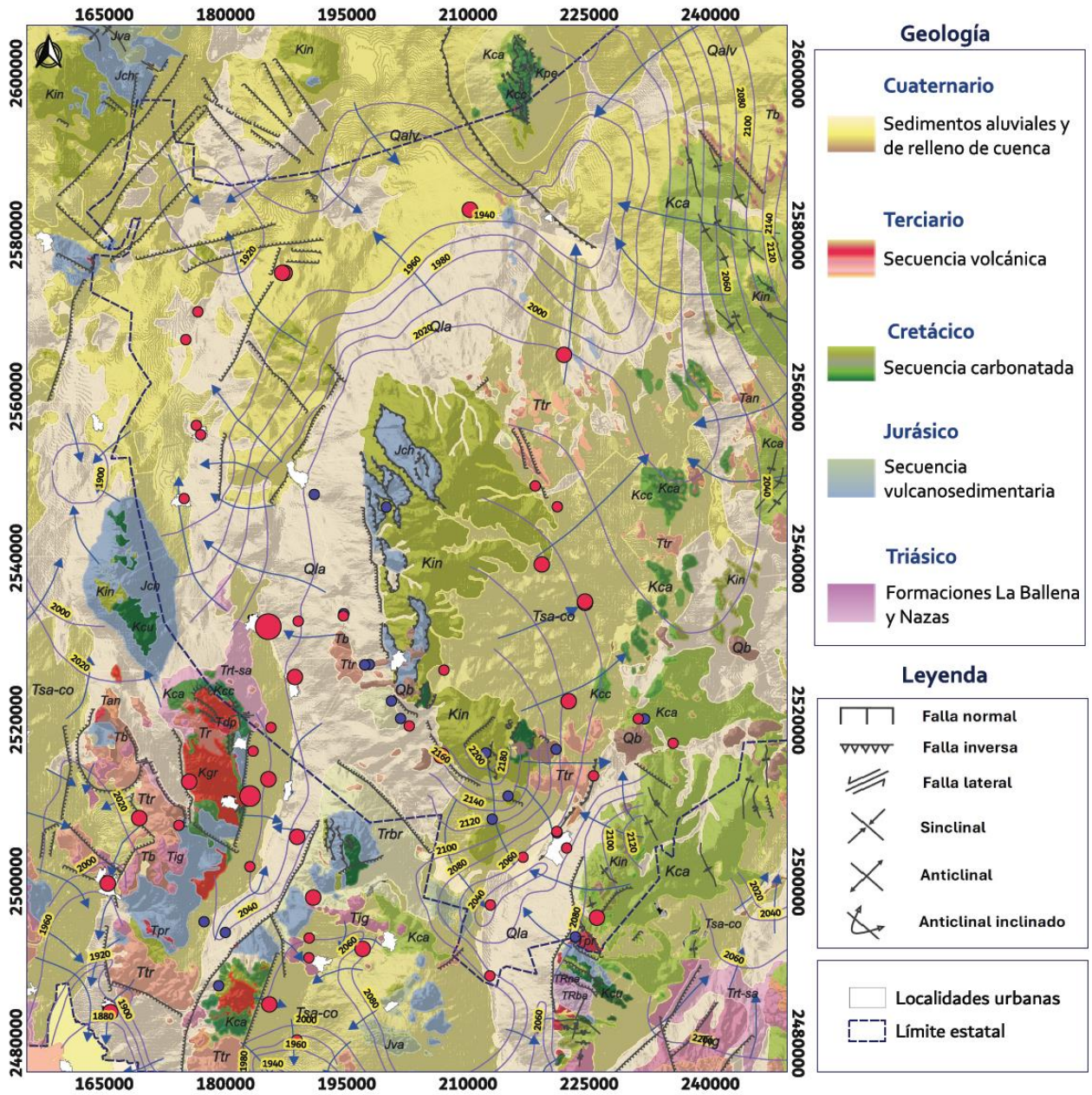


Figura 4.2. Concentraciones de fluoruro en el área de estudio que rebasan la NOM-127-SSA1-2021 (Rivera, 2021).

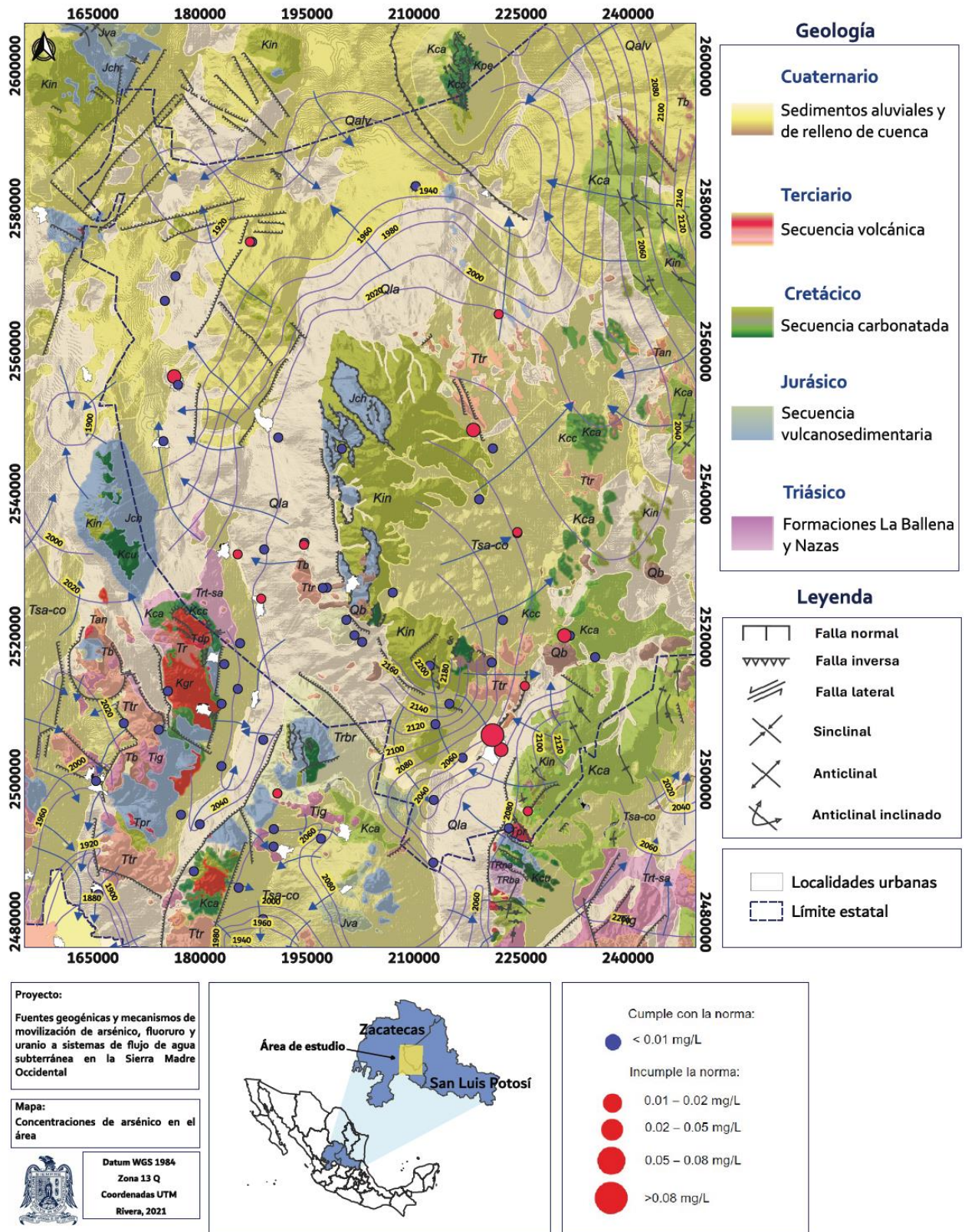


Figura 4.3. Concentraciones de uranio en el área de estudio que rebasan el límite máximo permisible de 0.01 mg/L propuesto en Alemania (Riversa, 2021).

5. Conclusiones y recomendaciones.

5.1 Modelo hidrogeoquímico conceptual

Para la construcción del modelo hidrogeoquímico conceptual se utilizó la sección geológica centro del acuífero administrativo de Salinas de Hidalgo, reportada por León (2020) y la química de los diferentes aprovechamientos hídricos (Figura 5.1).

El modelo hidrogeoquímico sugiere que las aguas bicarbonatadas ($\text{HCO}_3\text{-Na}$, $\text{HCO}_3\text{-Ca}$, $\text{HCO}_3\text{-mixta}$) están relacionadas con flujos locales que se mueven a través del medio fracturado carbonatado y volcánico. Al estar ubicadas en las partes topográficamente más altas, representan el área de recarga en la zona. Estos flujos se caracterizan por tener temperaturas ($16.0\text{--}31.6\text{ }^\circ\text{C}$), rangos de conductividad eléctrica ($7.9\text{--}1225.0\text{ }\mu\text{S/cm}$) y concentraciones de arsénico ($0.0068\text{--}0.2154\text{ mg/L}$), fluoruro ($0.2\text{--}3.9\text{ mg/L}$) y uranio ($0.0\text{--}0.0435\text{ mg/L}$).

Los flujos intermedios se identificaron en aguas mixtas (mixta sódica, mixta-mixta, mixta cálcica). Se relacionan principalmente con el medio fracturado carbonatado y el material granular de relleno. Posee bajas temperaturas ($14.2\text{--}29.6\text{ }^\circ\text{C}$), variaciones en la conductividad eléctrica ($489.7\text{--}2546.0\text{ }\mu\text{S/cm}$). Las concentraciones de arsénico son ($0.0013\text{--}0.2346\text{ mg/L}$), fluoruro ($0.4\text{--}5.4\text{ mg/L}$) y uranio ($0.0001\text{--}0.0229\text{ mg/L}$).

Los flujos regionales están comprendidos por las familias de agua sulfatadas y cloruradas (clorurada cálcica, clorurada sódica y sulfatada sódica), vinculadas al medio granular. Las temperaturas que caracterizan a estos flujos van de los 16.1 a los $26.6\text{ }^\circ\text{C}$, los rangos de conductividad eléctrica son los más altos en el área ($74.1\text{--}41061.0\text{ }\mu\text{S/cm}$). Con concentraciones de arsénico ($0.0035\text{--}0.6885\text{ mg/L}$), fluoruro ($0.5\text{--}8.1\text{ mg/L}$) y uranio ($0.0003\text{--}0.0902\text{ mg/L}$).

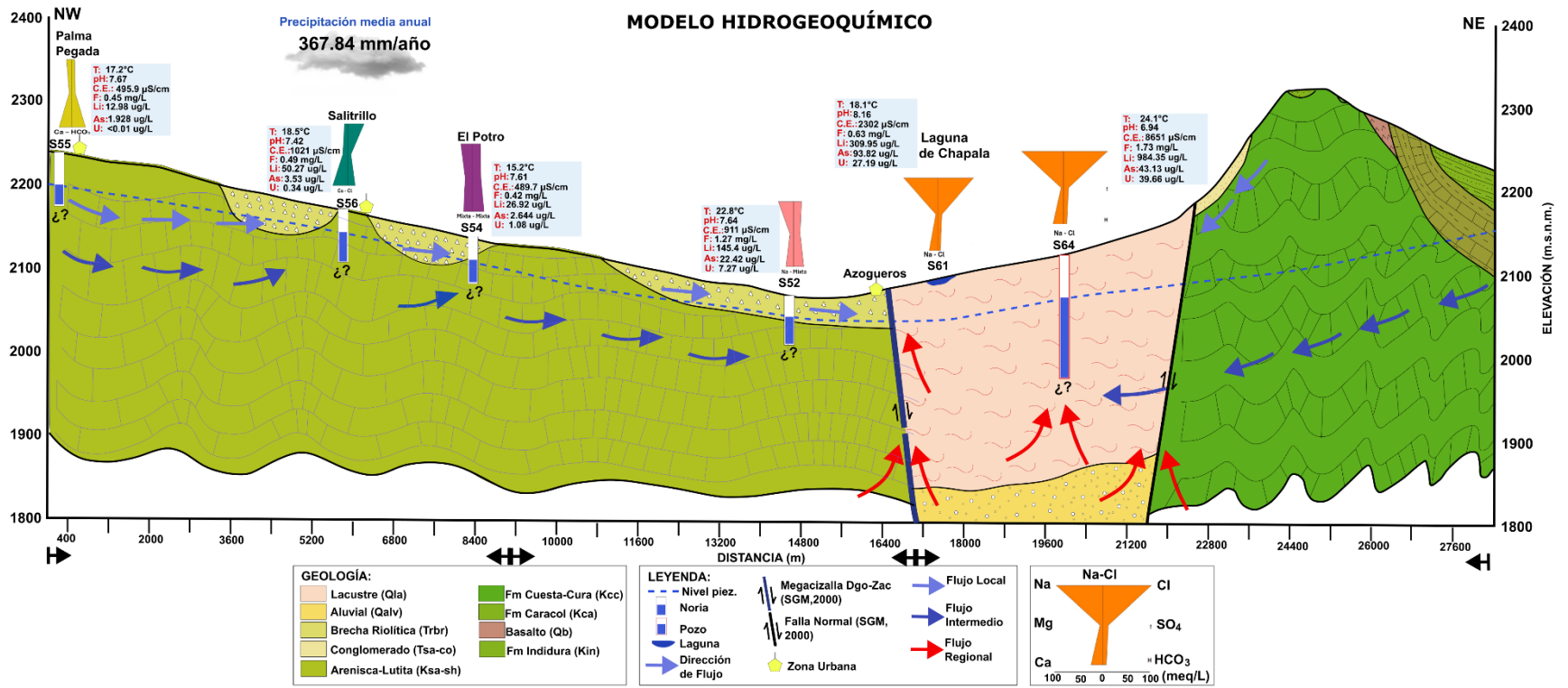


Figura 5.1. Modelo hidrogeoquímico conceptual.

Se recomienda:

1. Realizar caracterización a microescala para identificar fases portadoras de arsénico, fluoruro y uranio.
2. Promover el uso de extracciones secuenciales para conocer la movilización de los elementos.
3. Identificar problemas de salud en las comunidades expuestas.

Referencias

- Adeyeye, O.A., Xiao, C., Zhang, Z., Yawe, A.S., y Liang, X. (2021). *Groundwater fluoride chemistry and health risk assessment of multi – aquifers in Jilin Qianan, Northeastern China*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 211, 111926.
- Altamirano, M., y Delgado, V. (2019). *Contaminación natural por arsénico en las aguas subterráneas de la comunidad rural “La Fuente”, para sugerir y promover el uso de fuentes alternativas de agua segura municipio La Paz Centro, León, Nicaragua*. *Revista Torreón Universitario*, 8 (23), 58 – 72.
- Appelo, C.A.J., y Postma, D. (2004). *Geochemistry, groundwater, and pollution*. CRC press.
- Arabi, S.A., Funtua, I.I., Dewu, B.B.M., Alagbe, S.A., Kwaya, M.Y., Garba, M.L., y Baloga, A.D. (2013). *Activity concentration of uranium in groundwater from uranium mineralized areas and its neighborhood*. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 295, 135 – 142.
- Banning, A., Cardona, A., y Rude, T.R. (2012). *Uranium and arsenic dynamics in volcano – sedimentary basins – An exemplary study in North – Central Mexico*. *Applied Geochemistry*, 27 (11), 2160 – 2172.
- Brindha, K., y Elango, L. (2013). *Occurrence of uranium in groundwater of a shallow granitic aquifer and its suitability for domestic use in southern India*. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 295, 357 – 367.
- Cadenas, S. (2021). *Caracterización hidrogeoquímica del acuífero administrativo de Salinas de Hidalgo, San Luis Potosí*. [Tesis de licenciatura].
- Clark, I. (2015). *Groundwater Geochemistry and Isotopes*. CRC Press.
- CONAGUA. (2020a). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero El Barril (2402), estado de San Luis Potosí*.
- CONAGUA. (2020b). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Salinas de Hidalgo (2403), estado de San Luis Potosí*.
- CONAGUA. (2020c). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Santo Domingo (2404), estado de San Luis Potosí*.
- CONAGUA. (2020d). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Villa Hidalgo (2409), estado de San Luis Potosí*.

- CONAGUA. (2020e). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Chupaderos (3226), estado de Zacatecas.*
- CONAGUA. (2020f). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero La Blanca (3228), estado de Zacatecas.*
- CONAGUA. (2020g). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Loreto (3229), estado de Zacatecas*
- Consejo de Recursos Minerales. (2000). *Informe final complementario a la cartografía – geológico minera y geoquímica Zacatón F13 – B59.*
- Consejo de Recursos Minerales. (1998). *Informe de la carta geológico – minera y geoquímica Ojocaliente F13 – B69.*
- Consejo de Recursos Minerales. (2001). *Informe Final de la carta geológico-minera La Herradura F14 – A41.*
- Consejo de Recursos Minerales. (2001). *Informe Final de la carta geológico – minera Villa de Santo Domingo F14 – A31.*
- Edmunds, W.M. (2009). *Geochemistry's vital contribution to solving water resource problems.* Applied Geochemistry, 24 (6), 1058 – 1073.
- Espino, M.F. (2023). *Geoquímica del fluoruro en el agua subterránea en la región de Chihuahua, Chihuahua, México.* [Tesis de maestría].
- Fernández, J.E. (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.* [Tesis de maestría].
- Fetter, C.W., Boving, T., y Kreamer, D. (2018). *Contaminant Hydrogeology.* Waveland Press, Inc.
- Forcada, E.G., Fernández, A.F., Rodríguez, M.G., Ortiz, D.G., Kohfahl, C., Bahut, M.T.L., Moro, M.C., Moral, M.C., Timón, S., Vega, M., y Smedley, P. (2016). *Identificación de factores geológicos que controlan la distribución de arsénico y otros elementos traza asociados en las masas de agua del sur de la cuenca del Duero (Proyecto HidroGeoTox).* Las aguas subterráneas y la planificación hidrológica: Congreso hispano – luso sobre las aguas subterráneas en el segundo ciclo de planificación hidrológica (p. 259). Grupo Español.

- Freeze, R.A., y Cherry, J.A. (1979). *Groundwater*. Prentice Hall.
- González – Elizondo, M.S., González – Elizondo, M., Tena – Flores, J.A., Ruacho – González, L., y López – Enríquez, I.L. (2012). *Vegetación de la Sierra Madre Occidental, México: una síntesis*. Acta Botánica Mexicana, (100), 351 – 403.
- Iglesias, A., Ortiz, G., Rodríguez, R., y César, J. (2021). *Aguas subterráneas: exploración, evaluación, caracterización y gestión*. JCI Ingeniería y Servicios Ambientales.
- Jakeman, A.J., Barreteau, O., Hunt, R.J., Rinaudo, J.D., Ross, A., Arshad, M., y Hamilton, S. (2016). *Integrated groundwater management: an overview of concepts and challenges*. Integrated groundwater management: concepts, approaches and challenges, 3 – 20.
- Kale, A., Bandela, N., y Kulkarni, J. (2020). *Assessment of chemo – radiological risk of naturally occurred uranium in groundwater from the Beed district, India*. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 323, 151 – 157.
- Kehew, A. E. (2000). *Applied chemical hydrogeology*. Prentice Hall.
- Kilchmann, S., Waber, H.N., Parriaux, A., y Bensimon, M. (2004). *Natural tracers in recent groundwaters from different Alpine aquifers*. Hydrogeology Journal, 12, 643 – 661.
- León, N.T. (2020). *Modelo numérico de flujo de agua subterránea y estrategias de gestión hídrica del acuífero administrativo de Salinas de Hidalgo, San Luis Potosí*. [Tesis de maestría].
- Mora Donjuán, C.A., Alanís Rodríguez, E., Jiménez Pérez, J., González Tagle, M.A., Yerena Yamallel, J.I., y Cuellar Rodríguez, L.G. (2013). *Estructura, composición florística y diversidad del matorral espinoso tamaulipeco, México*. Ecología Aplicada, 12 (1), 29 - 34.
- Mukherjee, A., Bhattacharya, P., Shi, F., Fryar, A.E., Mukherjee, A.B., Xie, Z.M., Jacks, G., y Bundschuh, J. (2009). *Chemical evolution in the high arsenic groundwater of the Huhhot basin (Inner Mongolia, PR China) and its difference from the western Bengal basin (India)*. Applied Geochemistry, 24 (10), 1835 – 1851.
- Nieto – Samaniego, Á.F., Alaniz – Álvarez, S.A., y Camprubí Cano, A. (2005). *La Mesa Central de México: estratigrafía, estructura y evolución tectónica cenozoica*. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 57 (3), 285 – 318.

Onipe, T., Edokpayi, J. N., y Odiyo, J.O. (2021). *Geochemical characterization and assessment of fluoride sources in groundwater of Siloam area, Limpopo Province, South Africa*. Scientific Reports, 11 (1), 14000.

Ormachea Muñoz, M., y Quintanilla Aguirre, J. (2014). *Distribution of geogenic arsenic in superficial and underground water in Central Bolivian highlands*. Revista Boliviana de Química, 31 (2), 54 – 60.

Ortega – Guerrero, A. (2009). *Presencia, distribución, hidrogeoquímica y origen de arsénico, fluoruro y otros elementos traza disueltos en agua subterránea, a escala de cuenca hidrológica tributaria de Lerma – Chapala, México*. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 26 (1), 143 – 161.

Ortega – Guerrero, A. (2017). *Evaporative concentration of arsenic in groundwater: health and Environmental implications, La Laguna Region, Mexico*. Environmental Geochemistry and Health, 39, 987 – 1003.

Pandit, P., Saini, A., Chidambaram, S., Kumar, V., Panda, B., Ramanathan, A.L., Sahu, N., Singh, A.K., y Mehra, R. (2022). *Tracing geochemical sources and health risk assessment of uranium in groundwater of arid zone of India*. Scientific Reports, 12 (1), 2286.

Parkhurst, D.L. (1995). *User's guide to PHREEQC: A computer program for speciation, reaction – path, advective – transport, and inverse geochemical calculations* (No. 95 – 4227). US Department of the Interior, US Geological Survey.

Pérez, A. (2008). *Evolución hidrogeoquímica en el Hundido: una cuenca endorreica en Coahuila, México*. [Tesis de maestría].

Probabilidad y estadística: <https://www.probabilidadyestadistica.net/>

Reyes – Cortés, M., Reyes – Cortés, I.A., Espino Valdez, S., Rentería – Villalobos, M., Burillo Montúfar, J.C., y Montero – Cabrera, M.E. (2012). *Origen y distribución de la radiactividad natural en la zona norte de la cuenca de Chihuahua, México*. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 29 (3), 659 – 675.

Rivera, J.R. (2016). *Geoquímica y dinámica del arsénico en la porción costera de la cuenca del acuífero del río Mocorito asociada a la laguna costera Santa María La Reforma, Sinaloa, México*. [Tesis de doctorado].

- Secretaría de Economía. (2001a). NMX – AA – 073 – SCFI – 2001: *Análisis de agua – Determinación de cloruros totales en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – Método de prueba.*
- Secretaría de Economía. (2001b). NMX – AA – 079 – SCFI – 2001: *Análisis de aguas – Determinación de nitratos en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas – Método de prueba.*
- Secretaría de Economía. (1992). NMX – F – 518 – 1992: *Alimentos – Determinación turbidimétrica de sulfatos en agua.*
- Secretaría de Salud. (2022). Norma Oficial Mexicana NOM – 127 – SSA1 – 2021, *Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua.*
- Sedlock, R.L., Ortega – Gutiérrez, F., y Speed, R.C. (1993). *Tectonostratigraphic terranes and tectonic evolution of Mexico.*
- Servicio Geológico Mexicano. (2009a). *Carta Geológico Minera, Presa del Cedro F13 – B28.*
- Servicio Geológico Mexicano. (2007). *Carta Geológico Minera, La Abundancia F13 – B29.*
- Servicio Geológico Mexicano. (2009b). *Carta Geológico Minera, Villa de Cos F13 – B38.*
- Servicio Geológico Mexicano. (2016). *Carta Geológico Minera, Puerto Madero F14 – A21.*
- Servicio Geológico Mexicano. (2005). *Carta Geológico Minera, Salinas de Hidalgo F14 – A61.*
- Smith, R., Knight, R., y Fendorf, S. (2018). *Overpumping leads to California groundwater arsenic threat.* Nature Communications, 9 (1), 2089.
- Woessner, W.W., y Poeter, E.P. (2020). *Hydrogeologic properties of earth materials and principles of groundwater Flow.* The Groundwater Project.
- Zhang, H. (2020). *The migration dynamics and the speciation of arsenic in the Hetao area, Inner Mongolia.* Environmental Monitoring and Assessment, 192, 1 – 11.