



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Caracterización hidrogeoquímica
del acuífero del Graben de
Juchipila y el termalismo no
convencional asociado**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniera Geóloga

P R E S E N T A

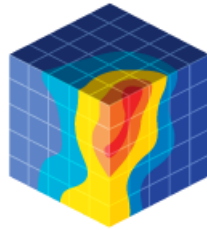
Alana Rubí Jiménez González

DIRECTOR DE TESIS

Ing. Alberto Arias Paz



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019



The
HYDRO
geology
Group
FACULTY OF ENGINEERING
U N A M



CONTRIBUCIÓN DEL GRUPO DE HIDROGEOLOGÍA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA, UNAM

Este documento representa la Tesis No. 25 del Grupo de Hidrogeología de la Facultad de Ingeniería (UNAM) como parte de su contribución científica y de formación de recursos humanos especializados en la evaluación cuantitativa de acuíferos.

This bachelor's dissertation represents the Thesis No. 25 of the Hydrogeology Group, Faculty of Engineering (UNAM) as part of our scientific contribution and human resources development in quantitative groundwater hydrology.

<http://www.ingenieria.unam.mx/hydrogeology/>

Twitter: @hydrogeologymx

Investigación realizada gracias al Programa de Apoyo a Proyectos de
Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) de la UNAM
IV100117 “Energía geotérmica no convencional en México: un estudio
interdisciplinario en la parte suroriental de la Sierra Madre Occidental”.
Agradezco a la DGAPA- UNAM la beca recibida.

Agradecimientos del proyecto

Al proyecto PAPIIT IV100117 “Energía geotérmica no convencional en México: un estudio interdisciplinario en la parte suroriental de la Sierra Madre Occidental”, cuyo responsable es el Dr. Luca Ferrari, a quien agradezco por todas las facilidades brindadas para el desarrollo de esta tesis.

Al laboratorio de Geoquímica Ambiental del Centro de Geociencias UNAM Campus Juriquilla, por el apoyo durante el análisis de muestras

Al Grupo de Hidrogeología de la Facultad de Ingeniería, al Ing. Alberto Arias Paz, Dr. José Antonio Hernández Espriú, a Alberto Paz Pérez y al Lic. Sergio Macías Medrano.

El mapa geológico y los fechamientos presentados en este trabajo, se elaboraron como parte de la tesis de maestría de la Lic. Vanessa Martínez Reséndiz dirigida por el Dr. Luca Ferrari y de la tesis de licenciatura de Beatriz Beltrán Martínez dirigida por el Dr. Isidro Loza Aguirre.

Los parámetros in- situ y resultados analíticos de las muestras de pozos y manantiales marcados con asterisco en las tablas 4 y 6 presentados en este trabajo, fueron tomados del proyecto de tesis de maestría desarrollado por la Lic. Andrea Billarent Cedillo, titulado “Origen y flujo de aguas termales en sistemas geotérmicos de baja entalpía en los grábenes de Juchipila y Santiago Papasquiario: caracterización hidrogeoquímica e isotópica (C-O-H; He)”, en el marco del proyecto PAPIIT IV100117, del que la autora del documento fungió como participante y becaria.

Agradecimientos personales

A la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ingeniería, por brindarme la mejor educación y la oportunidad de desarrollarme como persona.

Al Ing. Alberto Arias Paz, por compartir su conocimiento y experiencia conmigo, con el fin de llevar a cabo un trabajo de calidad.

A Alberto y a Sergio, por su apoyo y compañerismo en el trabajo de campo, así como en el trabajo de gabinete. Gracias por su paciencia y solidaridad. Fue un placer trabajar con ustedes

A mis sinodales el Dr. Antonio Hernández Espriú, M. en C. Eliseo Vázquez Sánchez, Ing. Gabriel Salinas Calleros e Ing. Javier Mancera Alejándrez, por sus valiosos comentarios y correcciones, las cuales ayudaron a mejorar la calidad de este trabajo.

A mis padres Juan y Rubí, por siempre creer en mí y por brindarme su apoyo incondicional a lo largo de mi carrera. Los amo.

A mi hermana Martha, por escucharme y aconsejarme durante este camino. Te quiero hermanita.

A mis abuelas Martha y Pilar, por su eterno amor y apoyo, sin ustedes nada de esto sería posible. Muchas gracias.

A Mara, Karen, Brenda, Angel, Vic, Memo, Dianita, Ari, David, Luis, Ro y Marianito. Mejores amigos no pude encontrar. Gracias por los buenos momentos.

A Fabián, por su compañía, consejos y apoyo durante esta maravillosa etapa. Te quiero.

Índice de contenido

Agradecimientos del proyecto	3
Agradecimientos personales	4
Índice de figuras	7
Índice de tablas	8
Resumen	9
1. Introducción	11
1.1 Introducción	11
1.2 Justificación	13
1.3 Objetivos	14
1.4 Descripción del área de estudio	15
1.4.1 Localización	15
1.4.2 Principales usos del agua.....	15
1.4.3 Clima	18
1.4.4 Hidrografía	20
2. Antecedentes	21
3. Marco Geológico	23
3.1 Provincia volcánica de la Sierra Madre Occidental.....	23
3.2 Rasgos tectónicos y estructurales.....	23
3.3 Estratigrafía regional.....	26
3.4 Estratigrafía local	29
4. Funcionamiento hidrodinámico del acuífero del Graben de Juchipila	32
5. Caracterización hidrogeoquímica y termalismo no convencional asociado 40	
5.1 Marco teórico	40
5.1.1 Geotermia no convencional.....	40
5.1.2 Principales constituyentes del agua subterránea	42
5.1.3 Principales constituyentes del agua subterránea termal	43
5.1.4 Conductividad Eléctrica y Sólidos Disueltos Totales	44
5.1.5 Potencial de Hidrógeno	45
5.1.6 Potencial de oxidación- reducción.....	46

5.2 Metodología	48
5.2.1 Toma de muestras en campo	48
5.2.2 Análisis químicos	48
5.3 Resultados	50
5.3.1 Parámetros medidos en campo	50
5.3.1.1 Temperatura	50
5.3.1.2 Conductividad Eléctrica	53
5.3.1.3 Sólidos Disueltos Totales	55
5.3.1.4 Potencial de Hidrógeno (pH).....	57
5.3.1.5 Potencial de oxidación- reducción (Eh)	59
5.3.2 Parámetros medidos en laboratorio	61
5.3.2.1 Constituyentes mayoritarios.....	61
5.3.2.1.1 Clasificación del agua subterránea.....	63
5.3.2.1.2 Correlación entre los constituyentes mayoritarios y los parámetros fisicoquímicos	67
5.3.2.2 Constituyentes minoritarios y traza.....	69
5.3.2.2.1 Distribución.....	71
5.3.2.2.2 Correlación entre constituyentes minoritarios y traza y los parámetros fisicoquímicos	81
6. Discusión de los resultados	83
7. Conclusiones	88
7.1 Recomendaciones.....	89
8. Bibliografía	90
9. Apéndices	94

Índice de figuras

Figura 1.1 Localización del área de estudio	17
Figura 1.2 Temperatura media normal	19
Figura 1.3 Precipitación.....	19
Figura 1.4 Evaporación total	20
Figura 3.2 Mapa tectónico de la porción centro- sur de la Sierra Madre Occidental.....	25
Figura 3.3 Mapa geológico del Graben de Juchipila.....	31
Figura 4.1 Localización del acuífero del Graben de Juchipila	34
Figura 4.2 Profundidad al nivel estático del acuífero del Graben de Juchipila.....	35
Figura 4.3 Configuración de la elevación del nivel estático del acuífero del Graben de Juchipila.....	36
Figura 4.4 Ubicación de los pozos en los cuales se llevaron a cabo pruebas de bombeo en el año de 2005	39
Figura 5.1 Principales parejas redox en el agua subterránea.....	47
Figura 5.2 Muestreo y medición de los parámetros en campo	49
Figura 5.3 Distribución de la temperatura del agua subterránea para los años de 2017 y 2018	52
Figura 5.4 Comportamiento de la conductividad eléctrica en el agua subterránea para los años de 2017 y 2018	54
Figura 5.5 Concentración de los sólidos disueltos totales en el agua subterránea para los años de 2017 y 2018	56
Figura 5.6 Comportamiento del pH en el agua subterránea para los años de 2017 y 2018	58
Figura 5.7 Comportamiento del potencial de oxidación- reducción en el agua subterránea para los años de 2017 y 2018.....	60
Figura 5.8 Diagrama de Piper.....	64
Figura 5.9 Diagramas de Stiff.....	66
Figura 5.10 Distribución de las concentraciones de arsénico en el área de estudio	72
Figura 5.11 Distribución de las concentraciones de hierro en el área de estudio.....	74
Figura 5.12 Distribución de las concentraciones de litio en el área de estudio.....	76
Figura 5.13 Distribución de las concentraciones de azufre en el área de estudio	78
Figura 5.14 Distribución de fluoruros en el área de estudio.....	80

Índice de tablas

Tabla 1. Comparación de transmisividades en el acuífero del Graben de Juchipila obtenidas por BETSCO (2005) y el Grupo de Hidrogeología de la Facultad de Ingeniería	38
Tabla 2. Producción de calor por decaimiento radiactivo en algunas rocas de la corteza terrestre	42
Tabla 3. Constantes de equilibrio del agua a diferentes temperaturas	46
Tabla 4. Concentraciones de los constituyentes mayoritarios en los aprovechamientos de la zona de estudio	63
Tabla 5. Matrices de correlación entre los constituyentes mayoritarios y los parámetros fisicoquímicos.....	68
Tabla 6. Concentraciones de los constituyentes minoritarios y traza en los aprovechamientos de la zona de estudio.....	70
Tabla 7. Matrices de correlación entre los constituyentes minoritarios y los parámetros fisicoquímicos.....	82
Tabla 8. Valores medidos de temperatura en pozos, norias y manantiales en los meses de junio y diciembre de 2017, y junio de 2018	94
Tabla 9. Valores medidos de conductividad eléctrica en pozos, norias y manantiales en los meses de junio y diciembre de 2017, y junio de 2018	96
Tabla 10. Valores medidos de sólidos disueltos totales en pozos, norias y manantiales en los meses de junio y diciembre de 2017, y junio de 2018	98
Tabla 11. Valores medidos de pH en pozos, norias y manantiales en los meses de junio y diciembre de 2017, y junio de 2018	100
Tabla 12. Valores medidos de potencial de oxidación- reducción en pozos, norias y manantiales en los meses de junio y diciembre de 2017, y junio de 2018	102

Resumen

Se llevó a cabo un estudio hidrogeoquímico en el acuífero de Jalpa- Juchipila, Zacatecas (en este trabajo nombrado como acuífero del Graben de Juchipila), en el cual se determinaron las familias de agua y sus parámetros físico- químicos (temperatura, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales, pH y potencial de oxidación- reducción), así como las concentraciones de los elementos mayoritarios y de cinco elementos minoritarios, con el fin de establecer la relación que existe entre las características químicas del agua y el termalismo presente en algunas zonas. El acuífero se encuentra emplazado en una unidad facturada conformada por ignimbritas del Oligoceno- Mioceno, la cual almacena agua termal ($T > 30^{\circ}\text{C}$) de tipo bicarbonatada sódica; y en una unidad granular conformada por rocas sedimentarias de origen lacustre y fluvial, y por sedimentos aluviales y volcánicos pertenecientes a la Formación Juchipila del Mioceno Tardío, en donde se almacena agua con temperatura ambiente de tipo bicarbonatada cálcica. El termalismo se ubica en tres zonas principales: extremo norte, centro y extremo sur del Graben. Estas aguas se caracterizan por el aumento considerable en la concentración de sólidos disueltos totales y conductividad eléctrica, así como en la concentración de Na^+ , Fe, Li, As y F^- . En el caso del arsénico y los fluoruros, las concentraciones superan los límites establecidos por la NOM-127-SSA-1994 en la mayoría de los aprovechamientos distribuidos en el acuífero, especialmente en los manantiales termales. El decaimiento radiactivo de los elementos U, Th y K contenidos en las ignimbritas que pertenecen a la unidad fracturada calienta el agua subterránea, mientras que la presencia de fallas y fracturas en estas rocas facilita el ascenso y la circulación de los fluidos termales hacia profundidades someras.

Abstract

A hydrochemical study was made on the aquifer of Jalpa-Juchipila in Zacatecas (named as the aquifer of The Juchipila Graben in this work), in order to determine the groundwater families and their physical and chemical parameters (temperature, electrical conductivity, total dissolved solids, pH and oxidation- reduction potential), as well as the concentration of the main elements and five trace elements. The aim is to establish the relationship between the chemical characteristics of the groundwater and its thermalism. The aquifer is located on a fractured unit formed of Oligocene- Miocene ignimbrites, which stores sodium-bicarbonate thermal water ($T > 30^{\circ}\text{C}$), and on a granular unit formed of lacustrine and fluvial sedimentary rocks, and alluvial and volcanic sediments from the Late Miocene Juchipila Formation, which stores calcium- bicarbonate water with ambient temperature. Thermal groundwater locates on three main zones of the Graben: far north, center and far south. It is characterized by the increase of total dissolved solids, electrical conductivity, Na^+ , Fe, Li, As and F. Arsenic and fluoride exceed the limit concentration established by the NOM-127-SSA-1994 in almost the entire aquifer, especially on thermal springs. Radioactive decay of U, Th and K from the ignimbrite heats groundwater, which ascends to the surface through the faults and fractures that affect this unit.

1. Introducción

1.1 Introducción

En México existen numerosas manifestaciones termales distribuidas principalmente en el centro y noroccidente del país. En años recientes se han realizado estudios cuyo objetivo es dar a conocer su distribución, por ejemplo, la Comisión Federal de Electricidad ha reportado cerca de 1380 áreas geotermales en México, la mayoría sin información geofísica ni geoquímica; por su parte, Prol- Ledesma & Morán- Centeno (2018) dividieron al país en 11 provincias geotérmicas, de las cuales las más importantes son el Cinturón Volcánico Transmexicano, la Provincia Extensional del Golfo de California y La Sierra Madre Occidental. En esta última, la producción de calor ha sido asociada al decaimiento radiactivo de los elementos U, Th y K que se encuentran en las rocas félsicas que la conforman.

Los diferentes usos que se le pueden dar a los sistemas geotérmicos dependen en gran medida de su temperatura: Como propone Boden (2017), en los sistemas de baja entalpía ($T < 100^{\circ}\text{C}$) se utilizan los fluidos geotérmicos directamente, los cuales se pueden ocupar para fines recreacionales y turísticos como balnearios, para actividades piscícolas, deshidratación de vegetales y frutas, calefacción, climatización de invernaderos y edificios, y como refrigerantes. Los sistemas de media entalpía ($100 < T < 175^{\circ}\text{C}$) pueden ser utilizados para usos directos o para generación de energía, dependiendo de la temperatura y las necesidades. Por último, los sistemas de alta entalpía ($T > 175^{\circ}\text{C}$) se utilizan para generar electricidad.

La exploración de los recursos geotérmicos se lleva a cabo a través de diferentes etapas y métodos, entre los cuales destacan los estudios de percepción remota, la fotografía aérea, estudios geológicos, geofísicos, hidrogeológicos e hidrogeoquímicos. Todos importantes para minimizar los costos de perforación y maximizar las posibilidades de éxito. En este trabajo se destaca la hidrogeoquímica como una herramienta importante para la caracterización de un acuífero termal, ya que permite calcular las temperaturas máximas que éste puede alcanzar sin necesidad de realizar perforaciones, ayuda a la determinación del tipo

de fluido que domina a profundidad en el sistema (vapor o líquido), y a conocer las características fisicoquímicas que se esperan a profundidad. Particularmente se estudia el acuífero del Graben de Juchipila, Zacatecas, el cual se encuentra alojado en dos unidades: una fracturada conformada por ignimbritas en la que se almacena agua termal, y una granular conformada por rocas sedimentarias de origen lacustre y fluvial, y por sedimentos aluviales y volcánicos, intercalados con ignimbritas y lavas basáltico- andesíticas en algunas zonas, en la que se almacena agua con temperatura ambiente mezclada con termal.

Se presenta una caracterización hidrogeoquímica del acuífero, que incluye el análisis de los siguientes parámetros fisicoquímicos: temperatura, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales, pH y potencial de oxidación- reducción; la determinación de las familias de agua subterránea; y la concentración y distribución de los constituyentes menores arsénico, hierro, azufre, litio y fluoruros. Todo esto enfocado a la relación que guardan las características químicas del acuífero con el aumento o la disminución de la temperatura del agua subterránea y de los manantiales presentes, así como con las características geológicas del área de estudio.

1.2 Justificación

La evidencia de manifestaciones termales en México que no están relacionadas a fuentes magmáticas o a rocas volcánicas recientes, sino a procesos como decaimiento radiactivo, demuestra la importancia de realizar estudios geológicos, hidrogeológicos e hidrogeoquímicos en estos sistemas para comprender su funcionamiento.

Conocer la química del agua subterránea de este acuífero es importante para determinar su calidad y de qué unidades hidrogeológicas procede, cuáles son las características químicas del agua termal, a qué familia(s) de agua subterránea pertenece, e incluso para la evaluación del acuífero como un sistema geotérmico de baja, media o alta entalpía. En consecuencia, se facilita la ubicación de áreas con mayor temperatura, lo cual puede ser aprovechado para distribuir la captación del agua de acuerdo a su uso: agrícola, abastecimiento público- urbano, recreativo y/o exploratorio.

1.3 Objetivos

El objetivo general de este trabajo es determinar el origen natural de las familias del agua subterránea y su termalismo asociado con base en los aspectos geológicos de la zona de estudio.

Los objetivos particulares son:

- Establecer la relación entre los parámetros físico- químicos del agua subterránea y la temperatura que presenta.
- Identificar anomalías hidrogeoquímicas asociadas al termalismo.
- Proporcionar información que sea de utilidad para la identificación de zonas con potencial geotérmico dentro del Graben de Juchipila.

1.4 Descripción del área de estudio

1.4.1 Localización

El área de estudio se encuentra dentro del Graben de Juchipila, el cual presenta un rumbo NE-SW en la porción sur del estado de Zacatecas entre la Sierra de Nochistlán al este y la Sierra de Morones al oeste, y pertenece a la provincia fisiográfica Sierra Madre Occidental, así como a la Cuenca del Río Juchipila. Comprende los municipios de Juchipila, Jalpa, Apozol, Moyahua de Estrada, Huanusco y Tabasco (Figura 1.1), se encuentra entre las coordenadas $-102^{\circ} 46' 27''$ al este, $-103^{\circ} 21' 49''$ al oeste, $21^{\circ} 52' 08''$ al norte y $21^{\circ} 03' 47''$ al sur y tiene una superficie aproximada de 4185 km^2 . Esta zona se encuentra representada por las cartas topográficas del INEGI: F13-B77 (Villanueva), F13-B78 (Cd. Cuauhtémoc), F13-B87 (Presa El Chique), F13- D17 (Calvillo), F13-D26 (Tepechitlán), F13-D27 (Jalpa), F13-D36 (Juchipila) y F13-D46 (Las Cruces) (CONAGUA, 2015).

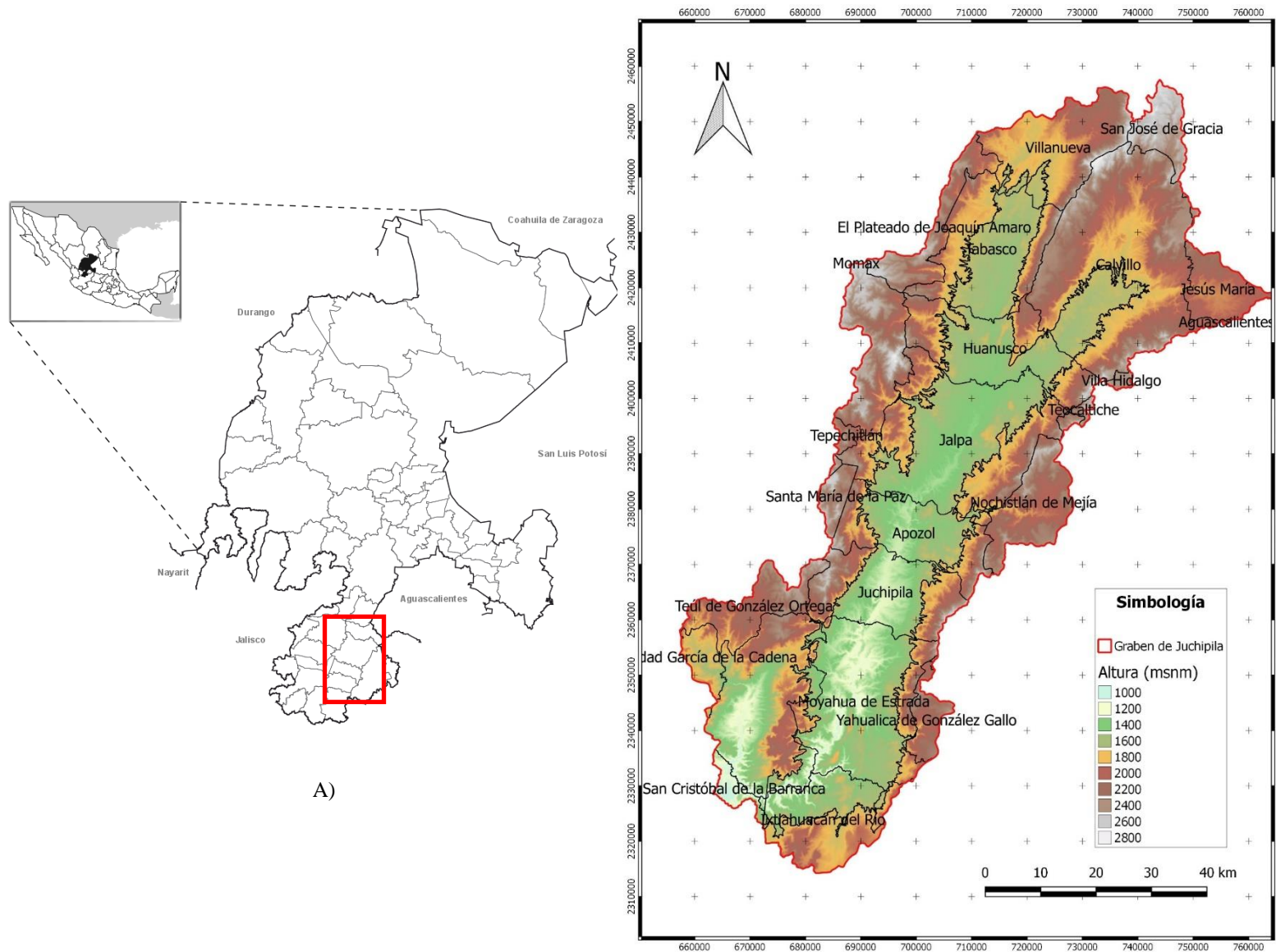
Las principales vías de acceso para llegar a esta zona son la carretera federal N°54, la cual comunica la ciudad de Zacatecas con la ciudad de Guadalajara, y atraviesa de norte a sur el área de estudio; y la carretera federal N°70, que conecta la ciudad de Aguascalientes con el municipio de Jalpa.

1.4.2 Principales usos del agua

Los principales usos que se le da al agua en la zona son para uso agrícola y público urbano (CONAGUA, 2015). Existen 13 presas que en conjunto tienen una capacidad de almacenamiento de 211.40 Mm^3 destinados en mayor medida para riego agrícola, las cuales captan el agua de los principales ríos que atraviesan la Cuenca del Río Juchipila, como son el Río Juchipila, Villanueva y Calvillo.

La Comisión Nacional del Agua (2005) realizó un censo de 400 aprovechamientos de agua subterránea (pozos, norias y galerías) distribuidos a lo largo del área de estudio, de los cuales el 40% se utiliza para fines agrícolas, el 24% para uso público- urbano, 8.2% para uso doméstico, 4.2% para uso pecuario, 4.5% para uso múltiple, y el restante 16.7% se encuentra

sin uso actualmente. El volumen extraído por bombeo en los aprovechamientos que se encuentran en uso es de 38.3 Mm³ por año aproximadamente. De este valor, 28.6 Mm³ (75%) se destina para el riego agrícola, 8.7 Mm³ (23%) para abastecimiento de agua potable, y 0.764 Mm³ (2%) para uso pecuario, doméstico y otros servicios.



B)

Figura 1.1. Área de estudio. A) Ubicada al sur del estado de Zacatecas, colinda al NE con Aguascalientes y al SW con Jalisco. Modificado de INEGI (2010). B) Graben de Juchipila y los municipios que lo conforman, en los límites este y oeste se encuentran la Sierra de Nochistlán y la Sierra de Morones, respectivamente.

1.4.3 Clima

La zona de estudio se localiza dentro de la Cuenca del Río Juchipila, y posee un clima seco semicálido (INEGI, 2017) el cual cubre 64.8% de la cuenca, principalmente en el valle de la parte norte a la parte sur; templado subhúmedo en las Sierras al este y oeste abarcando el 24.5% y semicálido semihúmedo en la parte suroeste con el 10.3% de la superficie (Márquez, Ruiz, Valdez, Blanco & Pérez, 2007).

La Comisión Nacional del Agua cuenta con estaciones meteorológicas a lo largo de la Cuenca. En este trabajo se eligieron tres estaciones meteorológicas para abarcar la zona norte, centro y sur del área de estudio, pues representan el valor promedio de las variables climatológicas (temperatura, precipitación y evaporación) descritas a continuación. Estas estaciones son las siguientes: Tayahua en la zona norte, Huanusco en la zona centro y Juchipila en la zona sur. Los datos analizados abarcan el periodo de 1951 a 2010 para cada estación.

Temperatura

La zona norte presenta una temperatura media normal anual de 19.4°C, la zona centro de 19.8°C y la zona sur de 21.1°C, con un promedio total de la zona de 20.1°C. Como se muestra en la figura 1.2, las temperaturas más altas van de los 23.7°C a los 25.7°C y ocurren en Mayo y Junio, mientras que las menores temperaturas ocurren en Enero y Diciembre y varían entre 14.4°C y 16.6°C. Cabe destacar que la zona sur presenta las temperaturas más altas durante todo el año.

Precipitación

En la zona norte la precipitación total anual registrada es 547.7 mm, en la zona centro es de 598 mm y en la zona sur de 704.3 mm, dando un total de toda la zona de 1850 mm anuales. Los meses más lluviosos son Julio y Agosto, con un promedio mensual de 139.3 a 206.2 mm y 126.8 a 175.7 mm respectivamente (figura 1.3).

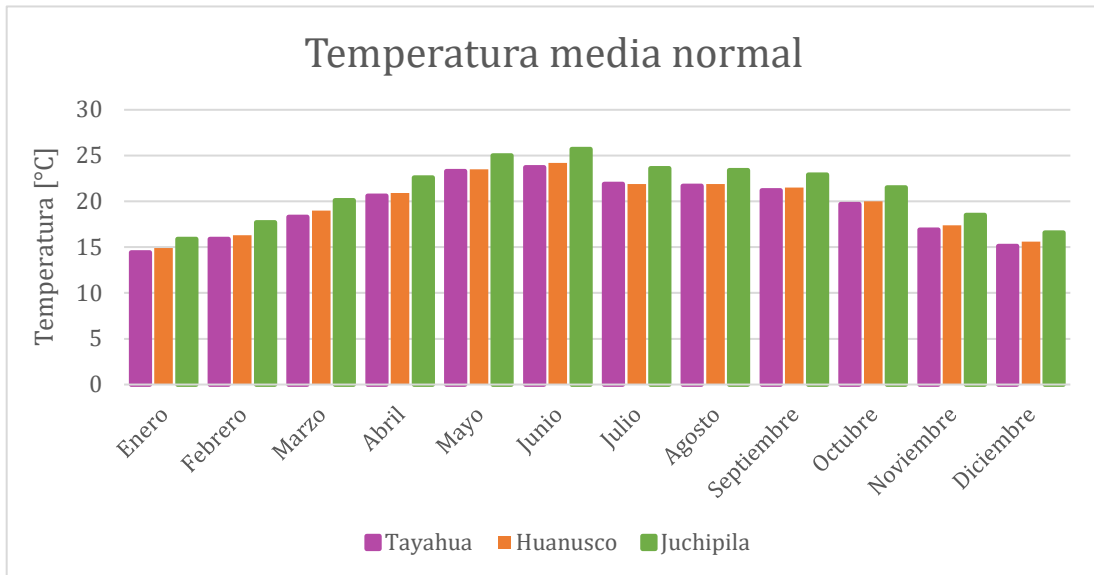


Figura 1.2 Gráfica que muestra el valor de la temperatura media normal por mes registrada en las estaciones climatológicas Tayahua (norte), Huanusco (centro) y Juchipila (sur) en el periodo de 1951 a 2010. Fuente: Servicio Meteorológico Nacional 2010.

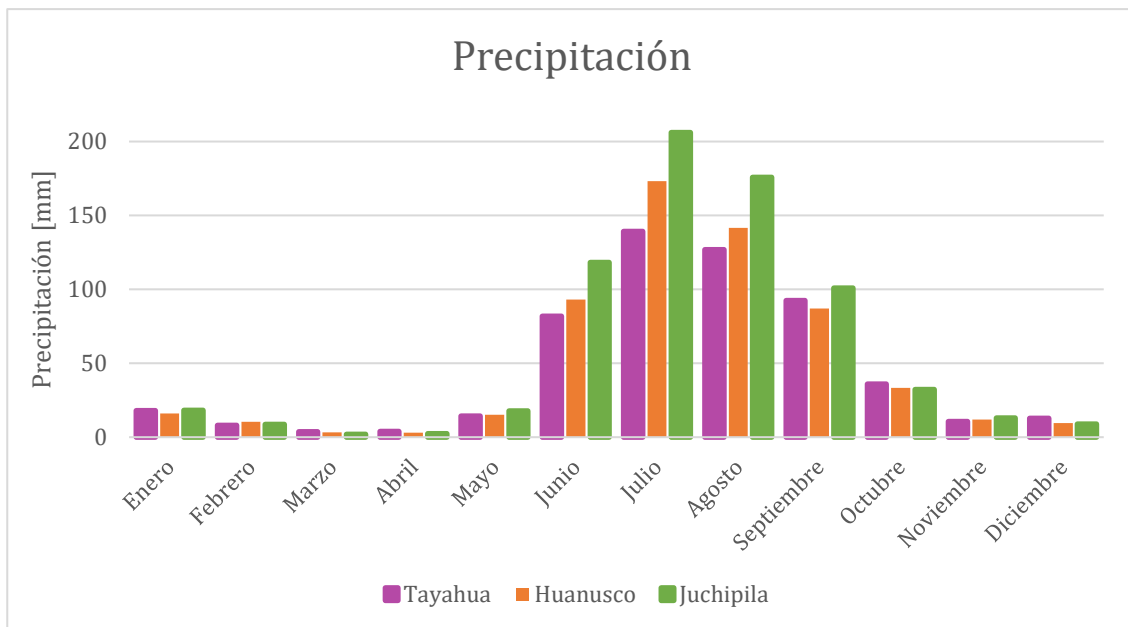


Figura 1.3. Gráfica que muestra el valor de la precipitación normal por mes registrada en las estaciones climatológicas Tayahua (norte), Huanusco (centro) y Juchipila (sur) en el periodo de 1951 a 2010. Fuente: Servicio Meteorológico Nacional 2010.

Evaporación

En la zona norte del área de estudio, la evaporación total anual es de 2142.2 mm, en la zona centro es de 2120.6 mm y en la zona sur de 2189.6 mm. Los meses en donde ocurre mayor evaporación son Abril y Mayo, con valores promedio de 235.5 a 277.4 mm, representados en la figura 1.4.

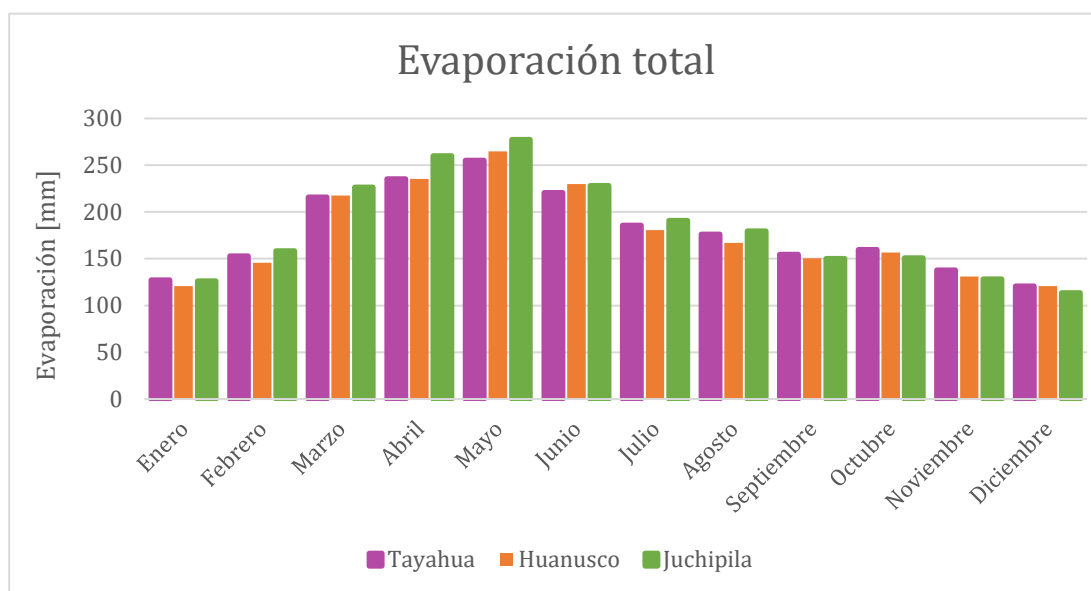


Figura 1.4. Gráfica que muestra el valor de la evaporación total por mes registrada en las estaciones climatológicas Tayahua (norte), Huanusco (centro) y Juchipila (sur) en el periodo de 1951 a 2010. Fuente: Servicio Meteorológico Nacional 2010.

1.4.4 Hidrografía

La cuenca del Río Juchipila pertenece a la Región Hidrológica 12 Lerma- Santiago y tiene un área aproximada de 8552 km². El Río Juchipila tiene su origen 10 km al sur de la ciudad de Zacatecas, la longitud de su cauce principal es de 250 km con una pendiente media de 0.0072 y su dirección preferencial es hacia el suroeste, desembocando en el Río Grande de Santiago, en el estado de Jalisco. El caudal máximo registrado para el Río Juchipila es de 830 m³/s. La densidad de drenaje de la zona es de 0.29318 corriente/km y la densidad de superficie de 0.0237 corriente/km (CONAGUA, 2005). Sus afluentes principales son los ríos Villanueva y Palomas, los cuales son represados por las presas Tayahua y el Chique; el río Calvillo, represado por la presa Achoquen; y el río Tabasco.

2. Antecedentes

Los estudios hidrogeológicos de la zona de estudio se realizaron en 1980 por la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), en 2004 por la Comisión Nacional del Agua, y los más recientes en 2005 por la Comisión Nacional del Agua con apoyo de la consultoría BETSCO, así como en 2015 por la Comisión Nacional del Agua y sus respectivas actualizaciones.

CONAGUA (2005), en un estudio titulado “Actualización hidrogeológica del acuífero Jalpa-Juchipila en Zacatecas” establece un diagnóstico de la evolución de los niveles del agua subterránea y actualiza la información hidrogeológica e hidrogeoquímica con respecto a los estudios anteriores. Se realizó un balance hidrometeorológico en donde se estimó que el volumen infiltrado aproximado en la cuenca es de 312 Mm³/año. Se censaron 400 aprovechamientos (325 pozos, 71 norias, 3 galerías y 1 manantial) y se determinó la extracción por bombeo en el acuífero de 38.32 Mm³/año. En cuanto a la piezometría, se realizaron configuraciones de profundidad y elevación del nivel estático y se analizó su evolución con respecto al año 2004. También se llevaron a cabo 6 pruebas de bombeo en las cuales se determinó que la transmisividad tiene valores desde 16.8 a 2450 m²/día. Para evaluar la evolución hidrogeoquímica y la calidad del agua, se midieron los iones mayoritarios y parámetros físico- químicos como temperatura, pH, conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales. Se establecieron dos tipos dominantes de composición del agua subterránea: bicarbonatadas sódicas y bicarbonatadas cálcicas. Se determinaron 18.75 millones de metros cúbicos por año para concesiones en el acuífero de Jalpa- Juchipila.

Por su parte, en el estudio más reciente “Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Jalpa- Juchipila, Estado de Zacatecas” llevado a cabo por CONAGUA (2015), se realizó una caracterización hidrogeológica del acuífero tomando como base los estudios publicados con anterioridad. Se establece que se trata de un acuífero libre alojado en ignimbritas, pero confinado en algunos sitios por sedimentos arcillosos. Se censó un total de 400 aprovechamientos: 325 pozos, 71 norias, 3 galerías y 1 manantial. Se realizó también un análisis de la piezometría de ese año y su evolución con respecto a los años de 2004 y 2005,

así como de la hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea. En esta última, se determinaron los parámetros de conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales, dureza total, dureza de calcio, dureza de magnesio, alcalinidad total, pH y los iones mayoritarios del agua subterránea dando como resultado una composición bicarbonatada sódica de carácter general y bicarbonatada cálcica hacia el sur. Por último, se efectuó el balance de aguas subterráneas de la zona, en donde se determinó la recarga vertical anual en 18.3 Mm^3 y se determina que la disponibilidad media anual para otorgar nuevas concesiones de agua subterránea en este acuífero es de $18,068,915 \text{ m}^3$ por año.

3. Marco Geológico

3.1 Provincia volcánica de la Sierra Madre Occidental

La Sierra Madre Occidental es una provincia volcánica de edad Cretácico- Cenozoico que se extiende en dirección NW- SE a lo largo del Noroeste de México, con una longitud aproximada de 1000 km, un área de 300,000 km² y un volumen de roca estimado de 400,000 km³ (Aguirre- Díaz et al., 2008; Ferrari et al., 2007), lo cual la convierte en la provincia ignimbrítica continua más grande de la era Cenozoica. Abarca los estados de Querétaro, San Luis Potosí, Guanajuato, Aguascalientes, Jalisco, Nayarit, Zacatecas, Durango, Sinaloa, Sonora, Chihuahua y la porción este de Texas.

Esta provincia colinda al sur con el Cinturón Volcánico Transmexicano, al oeste con el Golfo de California y al este con la Mesa Central. Se formó como resultado de diferentes episodios magmáticos y tectónicos que se desarrollaron durante el Cretácico- Cenozoico, los cuales se asocian a la subducción de la Placa de Farallón debajo de la Placa Norteamericana y a la apertura del Golfo de California.

3.2 Rasgos tectónicos y estructurales

El graben de Juchipila pertenece al terreno tectonoestratigráfico Guerrero, según Campa & Coney (1983); al Terreno Tahué según Sedlock, Ortega- Gutiérrez & Speed (1993) o al Terreno Compuesto Guerrero según Centeno- García, Guerrero- Suastegui & Talavera- Mendoza (2008), el cual abarca a los dos primeros; dentro de la placa de Norteamérica.

La Sierra Madre Occidental se formó a partir de diferentes episodios volcano- tectónicos, los cuales coinciden con la formación de la provincia de Basin and Range (Cuencas y Sierras) (Aguirre- Díaz et al., 2008) que abarca la porción noroeste de México y continúa por el oeste

de Estados Unidos. Su desarrollo está fuertemente conectado con la evolución de las etapas finales de subducción de la placa de Farallón con la placa de Norteamérica, que desde el Eoceno propició episodios de extensión cortical, dando paso a la formación de fosas tectónicas. En el sur de la Sierra Madre Occidental, éstas se encuentran ubicadas hacia el sur de Zacatecas y el noroeste de Jalisco (figura 3.1).

Los eventos volcánicos del Eoceno coinciden con los primeros signos de la disminución en la velocidad y el ángulo de convergencia entre la placa de Farallón y la placa de Norteamérica hace 43 y 39 Ma. Durante el Oligoceno- Mioceno, la placa de Farallón se seguía subduciendo en partes del oeste de México aún después de que la placa de Norteamérica y del Pacífico entraran en contacto directo. Debido a un posible desprendimiento de la parte más profunda de la placa de Farallón, se generó un flujo de material astenosférico que combinado con los esfuerzos de los límites de placas dio paso a la generación de los distintos pulsos ignimbríticos en el sur de la Sierra Madre Occidental (Ferrari et al., 2007).

Particularmente, el graben de Juchipila se comenzó a formar hace 22 y 18 Ma, durante el Mioceno Temprano. Es una estructura de aproximadamente 85 km de largo y 25 km de ancho, hacia el noreste se ramifica convirtiéndose en el graben de Calvillo. Se encuentra delimitado por la sierra de Morones y de Nochistlán, las cuales constituyen los pilares tectónicos. Las fallas que se encuentran en los hombros son de ángulo alto, con desplazamiento dominante de tipo normal, con dirección preferencial al N10°E (Nieto-Samaniego, Alaniz- Álvarez & Labarthe- Hernández, 1997). Algunos depósitos del relleno sedimentario que se encuentran en su interior presentan basculamientos de entre 10° y 20°.

La producción de una gran cantidad de ignimbritas de la Sierra Madre Occidental ha sido relacionada con ventilas fisurales asociadas a los sistemas de fallas regionales de la provincia de Basin and Range. Sin embargo, también se han encontrado registros que indican la presencia de estructuras volcánicas denominadas por Aguirre- Díaz et al., (2008) como “calderas de graben”, las cuales se caracterizan por tener un origen tectónico (extensión cortical). El graben de Juchipila es señalado por estos autores como parte de estas estructuras.

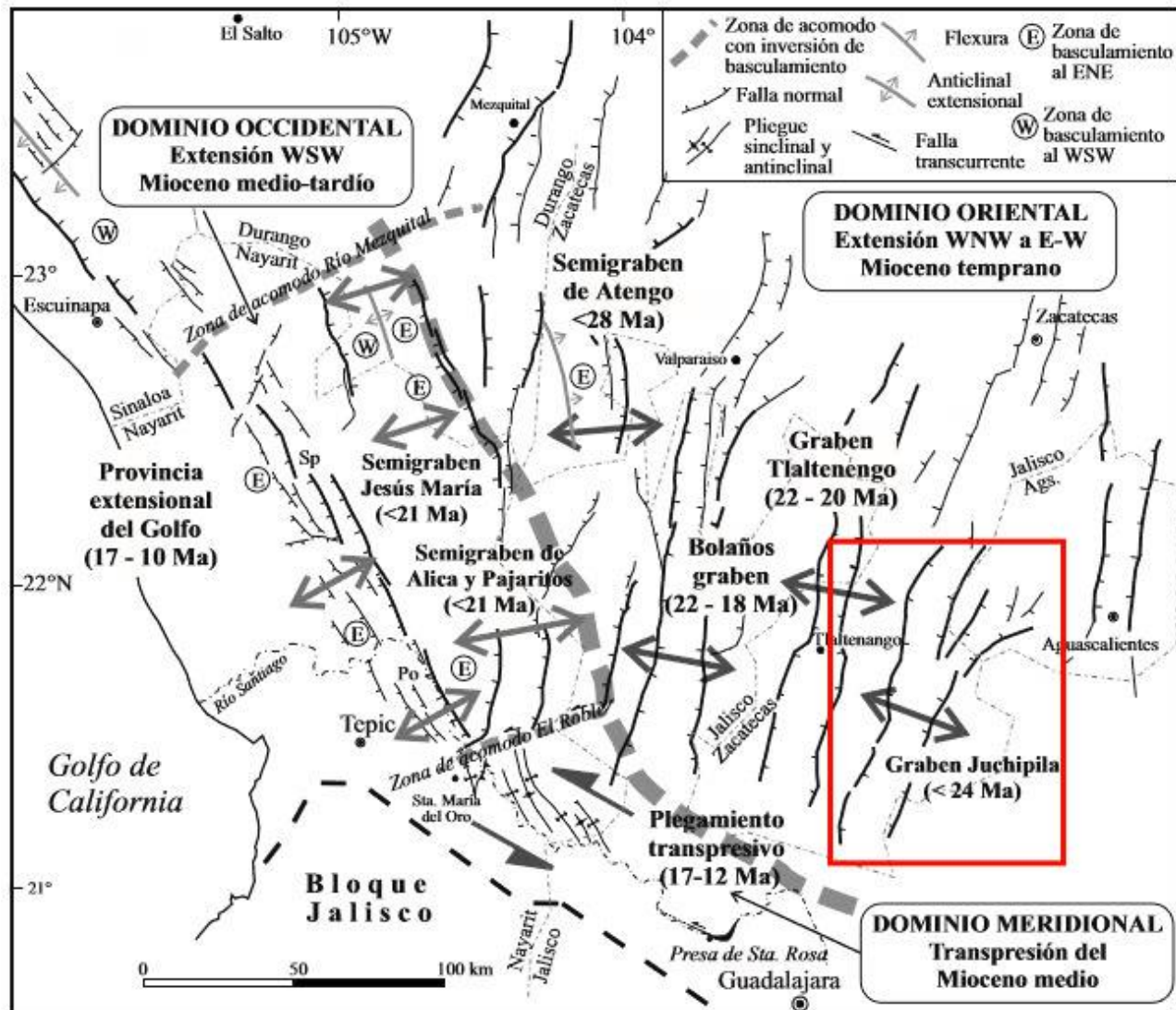


Figura 3.1. Mapa tectónico que muestra las fosas tectónicas en la porción centro- sur de la Sierra Madre Occidental. Se muestran también las edades y la dirección de la deformación extensional. Modificado de Ferrari et al. (2007).

3.3 Estratigrafía regional

Basamento pre-volcánico

Los afloramientos más antiguos que corresponden al basamento de la Sierra Madre Occidental corresponden a edades del Paleoproterozoico y Mesoproterozoico, los cuales forman parte del cratón de Norteamérica. Se compone de plutones graníticos, gneises y esquistos con edades entre 1800 y 1700 Ma. Parte de este basamento fue desplazado 800 km hacia el sureste de Sonora durante el Jurásico Medio y Tardío por la mega cizalla de Mojave-Sonora (Anderson & Silver, 1979).

Cubriendo a las rocas cristalinas del Proterozoico del norte y noroeste de México, se encuentran secuencias sedimentarias marinas, metamórficas de bajo grado y volcánicas que afloran en el norte de la Sierra Madre Occidental, en los estados de Sonora y Coahuila. Las rocas de origen sedimentario marino se formaron en el Neoproterozoico y Paleozoico como parte de dos ambientes geológicos: una plataforma marina somera y una cuenca marina profunda. Mientras que las rocas metamórficas y las secuencias volcánicas y volcánicas pertenecen al bloque de Coahuila y representan los remanentes de la acreción de Gondwana y Laurentia en el principio del periodo Pérmico (McKee, Jones & Anderson, 1988).

Durante el Mesozoico, en el oeste de la Sierra Madre Occidental se formó el Grupo Barranca (Alencaster & de Cserna, 1961), el cual se compone de secuencias sedimentarias clásticas continentales y marinas, desarrolladas durante el periodo Triásico Tardío y Jurásico Temprano. Rocas sedimentarias marinas de edad similar también han sido reportadas, conocidas como el Grupo Antimonio (González- León, 1997), el cual está sobreyacido por rocas sedimentarias clásticas intercaladas con rocas volcánicas, interpretadas como los productos de un arco continental desarrollado en el Jurásico.

Yaciendo discordantemente sobre este conjunto de rocas se encuentra el Grupo Bisbee, formado por secuencias fluvio- deltaicas y marinas del Jurásico Tardío y Cretácico Temprano. Para el Cretácico Tardío se desarrollaron cuencas sintectónicas en el noroeste de Sonora asociadas a la Orogenia Laramide, en las cuales se acumularon sedimentos fluviales y lacustres, conocidos como el Grupo Cabullona (Ferrari et al., 2007). Mientras que en el

estado de Sinaloa se emplazaron batolitos durante el Cretácico que cortan ortogneisses, rocas metasedimentarias y rocas metavolcánicas del Triásico Tardío y Jurásico.

Complejo Volcánico Inferior

Durante el Cretácico Tardío y a principios del Cenozoico la actividad magmática en el norte de México estuvo dominada principalmente por el desarrollo de la Orogenia Laramide, en donde se favoreció la creación de un arco magmático que forma parte del Complejo Volcánico Inferior. En la zona norte de la Sierra Madre Occidental, éste se compone de batolitos que varían en su composición de diorita a granito alcalino y de lavas andesíticas con tobas riolíticas y dacíticas (Ferrari et al., 2007) subyacidos por areniscas y lutitas de la Formación Tarahumara. El centro y sur de la Sierra Madre Occidental se encuentra representado por batolitos de composición diorítica y granodiorítica, los cuales se encuentran intrusionando rocas sedimentarias marinas del Cretácico, así como por lavas andesíticas y dacíticas e ignimbritas.

Rocas ígneas del Eoceno

Se encuentran representadas por secuencias de ignimbritas, lavas dacíticas y andesíticas en la zona norte (Ferrari et al., 2007); lavas riolíticas y andesíticas con intrusiones dioríticas sobreyacidas por una sucesión fluvial- lacustre de conglomerados, areniscas y lutitas en la zona centro, e ignimbritas silíceas, domos riolíticos y lavas andesíticas cubiertas por arenisca y conglomerado con clastos de andesita en la zona sur.

Grupo Volcánico Superior

Este grupo yace discordantemente sobre las rocas del Eoceno y al Grupo Volcánico Inferior. Está compuesto por una secuencia de ignimbritas riolíticas, depósitos volcánicos de caída, lavas intermedias y silíceas y en menor cantidad de lavas máficas (Ferrari et al., 2007). En el norte de la Sierra Madre Occidental esta secuencia presenta ignimbritas riolíticas intercaladas con dacitas, riolitas y lavas basálticas con un rango de edad del Oligoceno al Plioceno; en el sector central existen secuencias ignimbríticas, domos riolíticos y lavas basálticas y riolíticas emplazados en el Oligoceno, así como ignimbritas, plutones granodioríticos y lavas basáltico- andesíticas del Mioceno Temprano; mientras que el sur

presenta pulsos de ignimbritas silíceas, domos riolíticos y estructuras de calderas que datan del Oligoceno y Mioceno Temprano.

Rocas volcánicas post- ignimbríticas: Se trata de pulsos magmáticos de composición más heterogénea que aparecieron en las etapas finales o después de cada pulso ignimbrítico. Un primer grupo de andesitas y basaltos del Oligoceno se encuentra distribuido en la zona norte y central, en los estados de Chihuahua, Sinaloa, Durango, Arizona y Nuevo México, éste forma parte de la Provincia Basáltico- Andesítica del Sur propuesta por Cameron, Nimz, Kuentz, Niemeyer & Gunn (1989). El segundo grupo está caracterizado por rocas alcalinas del Mioceno representadas en el norte por la Formación Lista Blanca, la cual consiste en una secuencia de ignimbritas, lavas riolíticas y riolíticas peralcalinas. En el resto de la Sierra Madre Occidental, el vulcanismo alcalino consiste en basaltos emplazados mediante fisuras, así como de campos monogenéticos.

Relleno sedimentario

A partir del Eoceno Tardío, la Sierra Madre Occidental sufrió diferentes episodios de extensión cortical que dieron paso al desarrollo de cuencas en las que se depositaron sedimentos de origen fluvial y lacustre. Éstos aparecen intercalados con los productos volcánicos mencionados anteriormente.

En la porción norte y central existen sucesiones gruesas y compactadas de conglomerados y areniscas sobreyacidas por lavas y tobas que datan del Oligoceno, mientras que en el sur las secuencias de relleno comenzaron a formarse en el Mioceno e incluyen conglomerados, gravas, arenas, areniscas y en algunos casos margas, calizas y pedernal (Nieto-Samaniego, Ferrari, Alaniz- Álvarez, Labarthe- Hernández & Rosas- Elguera, 1999).

3.4 Estratigrafía local

Eoceno

En el graben de Juchipila y en los valles de la Sierra de Morones afloran lavas de composición basáltica y andesítica, con una edad de 48 Ma (Webber, Fernandez & Simmons, 1994), ubicándose en el Eoceno Inferior. Cubriendo discordantemente, se encuentra una secuencia de arenisca intercalada con limolita y conglomerado con clastos líticos de andesita, perteneciente al Eoceno Superior (Servicio, Geológico Mexicano, 2018).

Complejo Volcánico Superior

De manera discordante a las rocas del Eoceno, yace una secuencia de ignimbritas, cuyo emplazamiento empezó en el Oligoceno. El primer paquete se conforma de flujos de ceniza de 50 m de espesor, fuertemente soldados y con alto contenido de cristales, seguido de depósitos de caída pobremente soldados e intercalados con sedimentos volcanoclásticos, conocidos como “San Miguel Tuff”. Posteriormente le sobreyace la ignimbrita conocida como “Boquillas Tuff”, la cual mide 100 m de espesor y va de pobre a fuertemente soldada con fragmentos de pómez. Ésta se encuentra distribuida a lo largo del municipio de Juchipila. Por último, se encuentra “Los Indios Tuff” con depósitos de caída horizontales que conforman una unidad de 150 m. de espesor, distribuidos principalmente en la Sierra de Morones (Webber et al., 1994).

A esta secuencia le siguen derrames de basaltos alcalinos emplazados en el Oligoceno Superior- Mioceno Inferior, los cuales afloran en el hombro este del Graben de Juchipila (Martínez- Reséndiz, 2016) sobreyacidos por una ignimbrita poco consolidada con alto contenido de líticos cubierta por un flujo de ceniza consolidado. Como última unidad de este complejo, se encuentran flujos de lavas basálticas y andesíticas alcalinas que rellenan el sector sur del Graben de Juchipila, emplazadas durante el Mioceno Medio.

Formación Juchipila

Como consecuencia de la extensión cortical y de los últimos flujos de lavas pertenecientes al Complejo Volcánico Superior, el drenaje en el Valle de Juchipila se vio interrumpido, por lo

que dio paso a la acumulación de sedimentos lacustres, aluviales, fluviales y volcánicos durante el Mioceno Tardío conocidos como la Formación Juchipila (Lahiere, 1982). Ésta consiste en secuencias de areniscas y conglomerados volcanoclásticos y matriz- soportados, intercaladas con depósitos volcánicos de caída y depósitos lacustres dominados por carbonatos, los cuales están representados por mudstone, wackestone y limolita calcárea. En la cima de esta sucesión, el tamaño de los clastos aumenta hasta llegar a grava, mientras que los estratos de sedimentos finos disminuyen. En algunas partes del graben se encuentra una capa de depósitos de talud, derivados de las ignimbritas emplazadas durante el Oligoceno (Carranza- Castañeda, Aranda- Gómez, Wang & Iriondo, 2013).

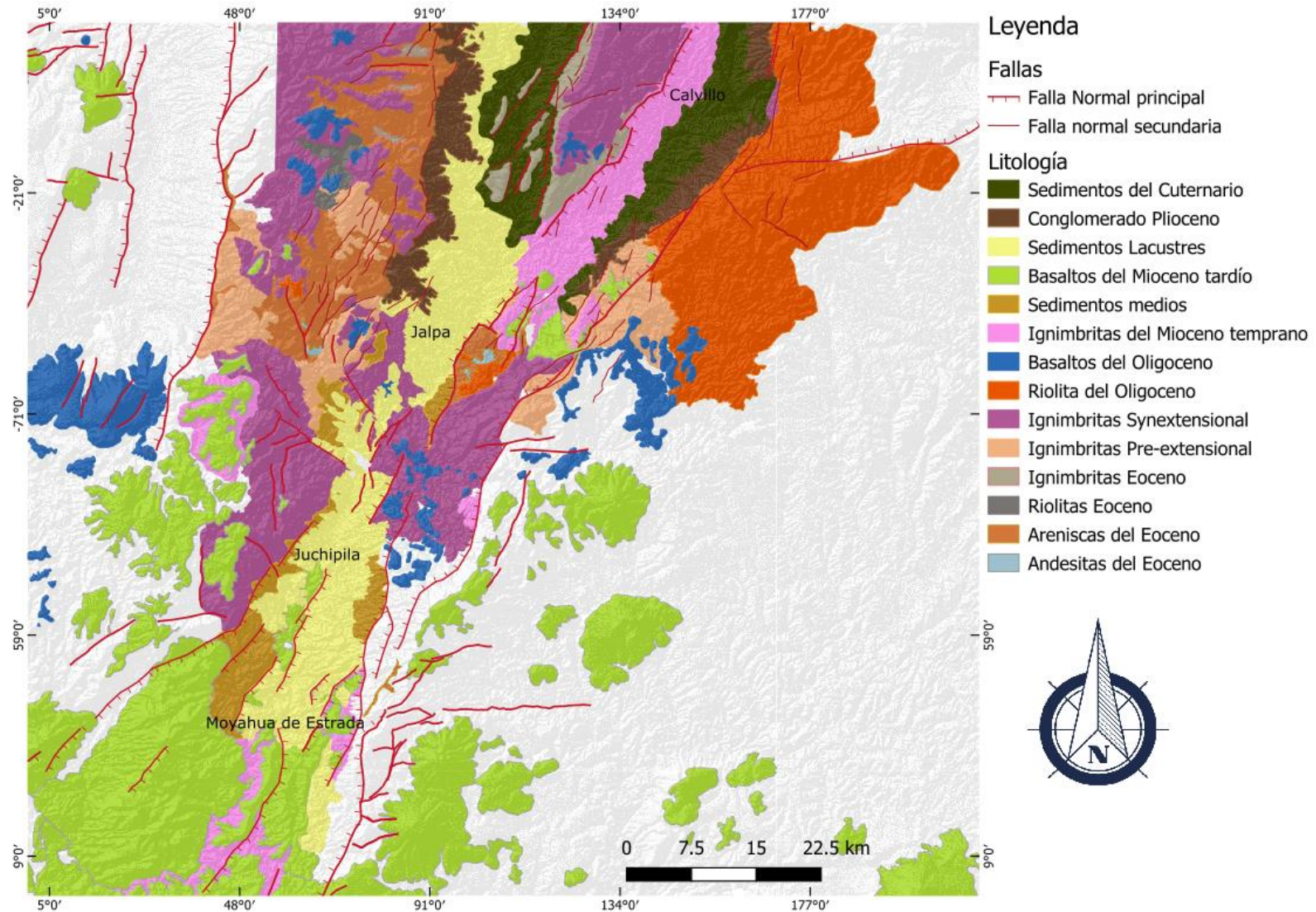


Figura 3.3. Mapa geológico del Graben de Juchipila. Elaborado por Vanessa Martínez-Reséndiz, Beatriz Beltrán- Martínez, Isidro Loza- Aguirre y Luca Ferrari para el proyecto PAPIIT IV100117 “Energía geotérmica no convencional en México: un estudio interdisciplinario en la parte suroriental de la Sierra Madre Occidental”

4. Funcionamiento hidrodinámico del acuífero del Graben de Juchipila

El acuífero de Jalpa- Juchipila (en este trabajo llamado acuífero del Graben de Juchipila) se ubica en la zona suroeste del estado de Zacatecas (figura 4.1). Pertenece a la Región Hidrológica del Río Lerma- Santiago y a la Región Hidrológica- Administrativa VIII Lerma Santiago Pacífico y posee una superficie aproximada de 4069 km² (CONAGUA, 2018). Es un acuífero en el cual, debido a la complejidad de la geología del lugar, presenta zonas en las cuales se comporta como libre, mientras que en algunas otras se encuentra semiconfinado e incluso confinado debido a la presencia de materiales con baja permeabilidad como sedimentos lacustres, derrames basáltico- andesíticos y productos volcánicos con fragmentos de tamaño ceniza y lapilli.

Se conforma de dos unidades hidrogeológicas principales: la unidad inferior corresponde al paquete de ignimbritas y productos volcánicos que forman parte del Complejo Volcánico Superior, las cuales, a pesar de que en algunos pseudoestratos se encuentran fuertemente soldadas, presentan fracturamiento debido a los esfuerzos de tipo extensional que iniciaron en el Mioceno Temprano, lo que les confiere permeabilidad secundaria. Las rocas pertenecientes a esta unidad pueden alcanzar espesores superiores a los 400 m (CONAGUA, 2018). Afloran en los hombros del graben, en las Sierras de Morones, Nochistlán y Fría; en el extremo norte del Graben, en los municipios de Tabasco, Tayahua y Villanueva, y en el extremo sur, en los municipios de Juchipila y Moyahua de Estrada. La recarga en esta unidad se lleva a cabo por medio de la infiltración del agua precipitada a través de las fallas y fracturas.

La unidad superior se trata de los depósitos sedimentarios pertenecientes a la Formación Juchipila, los cuales presentan una composición más heterogénea, pues están formados por estratos de alta permeabilidad como areniscas, conglomerados y depósitos de aluvión, y por estratos de baja permeabilidad como limolitas, calizas y depósitos volcánicos de caída. Esta unidad puede llegar a medir 200 m de espesor y se extiende en el interior del Valle, desde Tabasco hasta Moyahua de Estrada. En esta unidad el agua precipitada y el agua que procede

de las actividades agrícolas se infiltra a través de los sedimentos con mayor permeabilidad. Es posible encontrar secuencias ignimbríticas de edad más reciente intercaladas con esta unidad, principalmente en la zona sur del acuífero.

Entre las dos unidades hidrogeológicas principales existen flujos de lavas de composición basáltica y andesítica que afloran principalmente en el norte y en el extremo sur del Graben, aunque el volumen de esta unidad es significativamente menor que las demás. Su interacción con el agua subterránea depende en gran medida del grado de fracturamiento que poseen: aquellos que no presentan fracturamiento actúan como capas confinantes mientras que aquellos que sí lo presentan forman parte del acuífero.

De acuerdo con CONAGUA (2015), el basamento de este acuífero lo constituyen los derrames de lavas andesíticas emplazadas durante el Eoceno, las cuales subyacen a las ignimbritas que conforman la unidad hidrogeológica inferior. Estas lavas afloran en el centro y sur del área de estudio, en los municipios de Moyahua de Estrada, Juchipila y Apozol.

La profundidad al nivel estático varía de 5 m a 120 m (figura 4.2) y la elevación del nivel estático se encuentra en un rango de 1600 msnm a 1120 msnm, con un gradiente hidráulico promedio de 0.005. Las menores elevaciones se encuentran en el sur del acuífero, mientras que las mayores en el norte. De esta manera la dirección del flujo subterráneo es NE-SW, coincidiendo con la dirección del Graben y del Río Juchipila (figura 4.3).

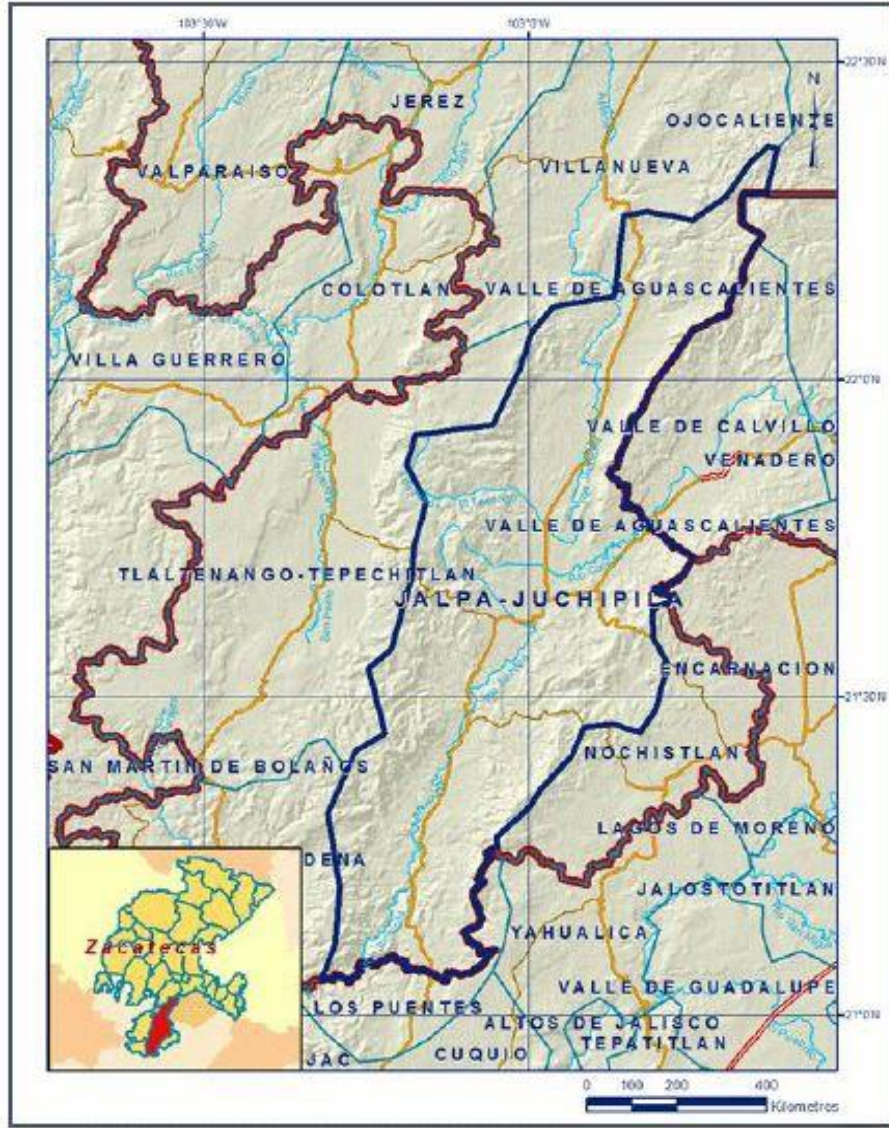


Figura 4.1 Localización del acuífero del Graben de Juchipila. Tomado de CONAGUA (2018).

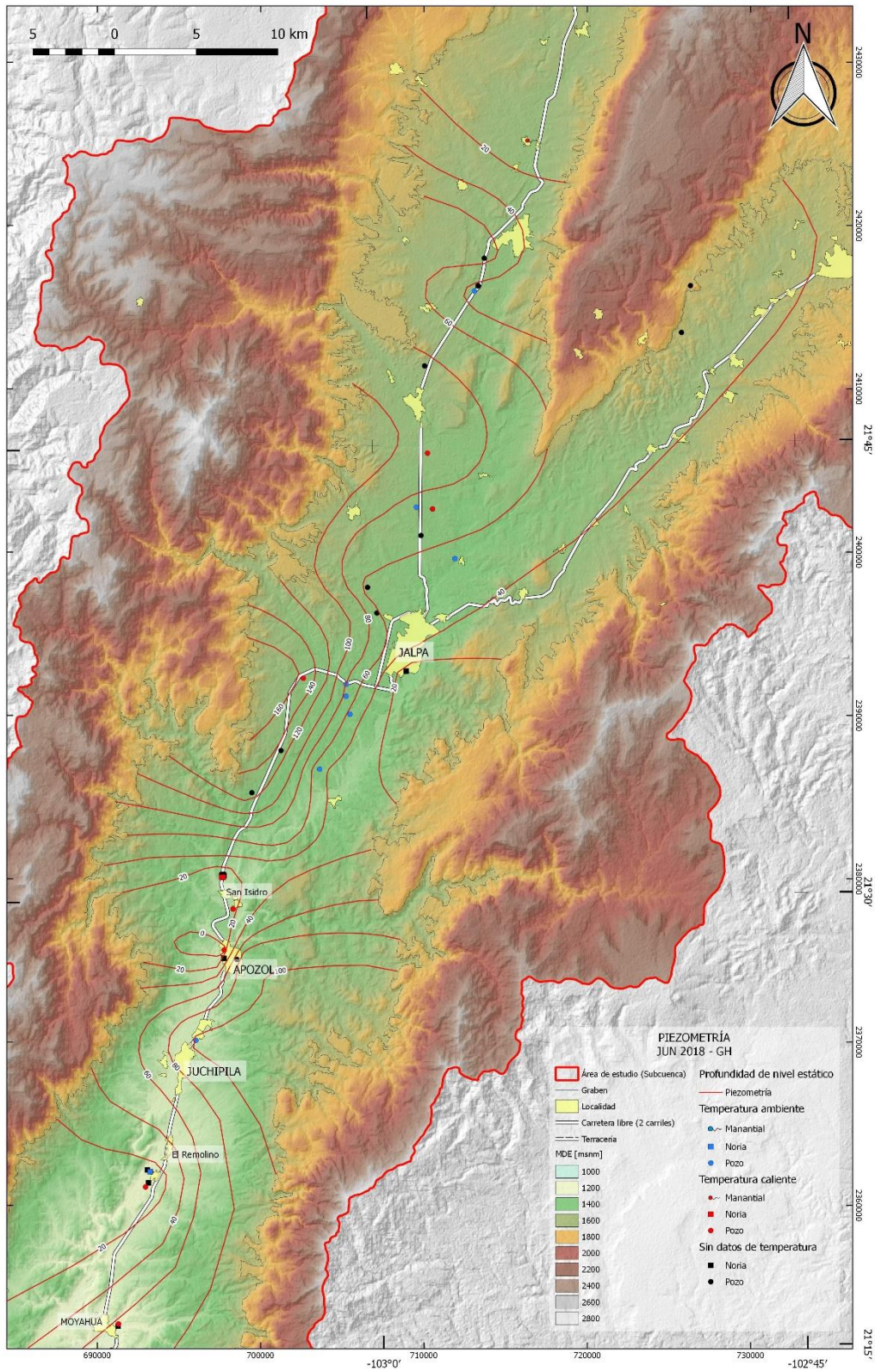


Figura 4.2 Profundidad al nivel estático en la zona de estudio. Mediciones realizadas durante los meses de junio de 2017, diciembre de 2017 y junio de 2018.

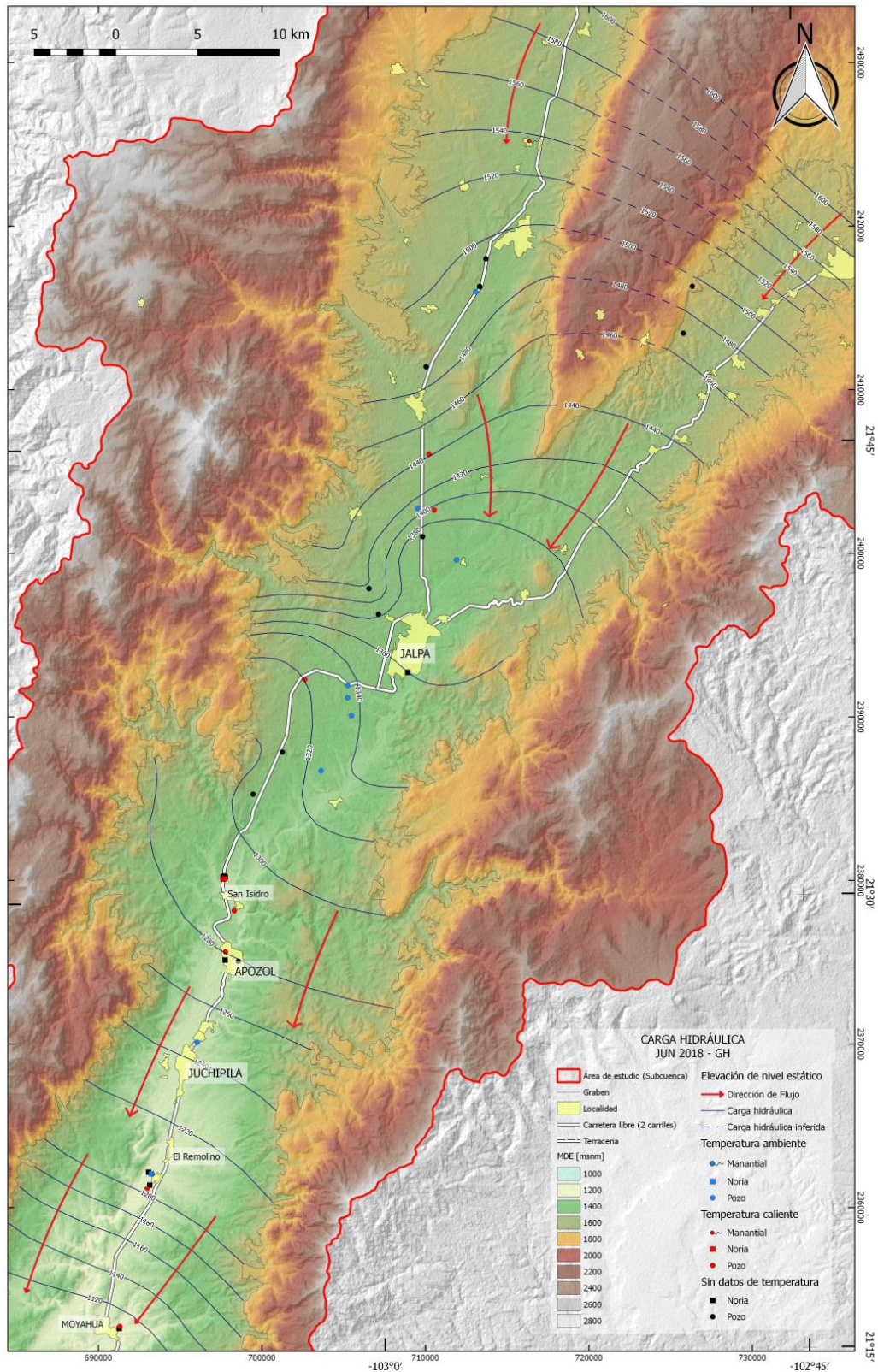


Figura 4.3. Configuración de la elevación del nivel estático en la zona de estudio. Mediciones realizadas durante los meses de junio de 2017, diciembre de 2017 y junio de 2018.

Como parte de las actividades del proyecto PAPIIT IV100117 “Energía geotérmica no convencional en México: un estudio interdisciplinario en la parte suroriental de la Sierra Madre Occidental”, se llevó a cabo la reinterpretación de las pruebas de bombeo realizadas en seis pozos de la zona de estudio por la Consultoría BETSCO S.A. de C.V., las cuales fueron presentadas en CONAGUA (2005). El primer análisis se realizó mediante el método de Jacob, mientras que para las reinterpretaciones los métodos analíticos utilizados fueron Theis (abatimiento), Cooper- Jacob, Walton, Neuman y Theis (recuperación), y el método numérico de Rushton.

En la tabla 1 se presentan los resultados de estas pruebas y la comparación de los valores de transmisividad [m^2/d] obtenidos por la consultoría BETSCO y el Grupo de Hidrogeología de la Facultad de Ingeniería. Como se puede apreciar, estos valores varían entre $16 m^2/día$ y $2450.7 m^2/día$, aunque este último se debe tomar con reserva. Los valores intermedios oscilan entre $25 m^2/día$ y $231.9 m^2/día$, es decir, transmisividades bajas a altas según Iglesias y Villanueva (1985).

La figura 4.4 muestra la ubicación de los pozos en los cuales se realizaron estas pruebas. Se puede apreciar que las transmisividades más altas se encuentran hacia el noroeste del Graben, con valores entre $231 m^2/día$ y $184 m^2/día$, así como en la zona sur, en donde se alcanzó un valor de hasta $2450.7 m^2/día$. La zona centro presenta los valores más bajos, los cuales se encuentran en el rango de $31.4 m^2/día$ a $16 m^2/día$.

Tabla 1. Comparación de los valores de transmisividad en el acuífero del Graben de Juchipila obtenidos por la consultoría BETSCO en el año de 2005, y los obtenidos mediante la reinterpretación de las pruebas de bombeo con diferentes métodos llevados a cabo por el Grupo de Hidrogeología de la Facultad de Ingeniería.

Clave GH	Clave BETSCO	Localidad	X	Y	Z	Profundidad total	Temperatura [°C]	TRANSMISIVIDAD [m ² /día]					T final
								Abatimiento		Recuperación		Rushton	
								BETSCO (2005)	GH (2017)	BETSCO (2005)	GH (2017)	GH (2017)	
	CNA-B-291	Agua Blanca	717151	2431137	1574.35	130	28.6	252.98	114	210.82	113	288.4	231.9
	CNA-B-189	El Rodeo	710191	2417121	1603.1	170	27.7	140.8	111	150.2	184	184.5	184
	CNA-B-30	Jalpa	707004	2393043	1452	210	27	39.5	33.5	26.4	26.2	55.9	31.4
	CNA-B-114	El Caracol	723635	2401360	1581.6	150	20.8	24.1	21.9	29.1	36.3	55.5	25
P055	CNA-B-315	Juchipila	1030631	212521.9	1275.58	200	28.1	16.8	17.3	10.43	14	25.08	16
P061	CNA-B-343	Guadalajarita	692951	2361129		90	26.33	2450.7		2450.7			2450.7

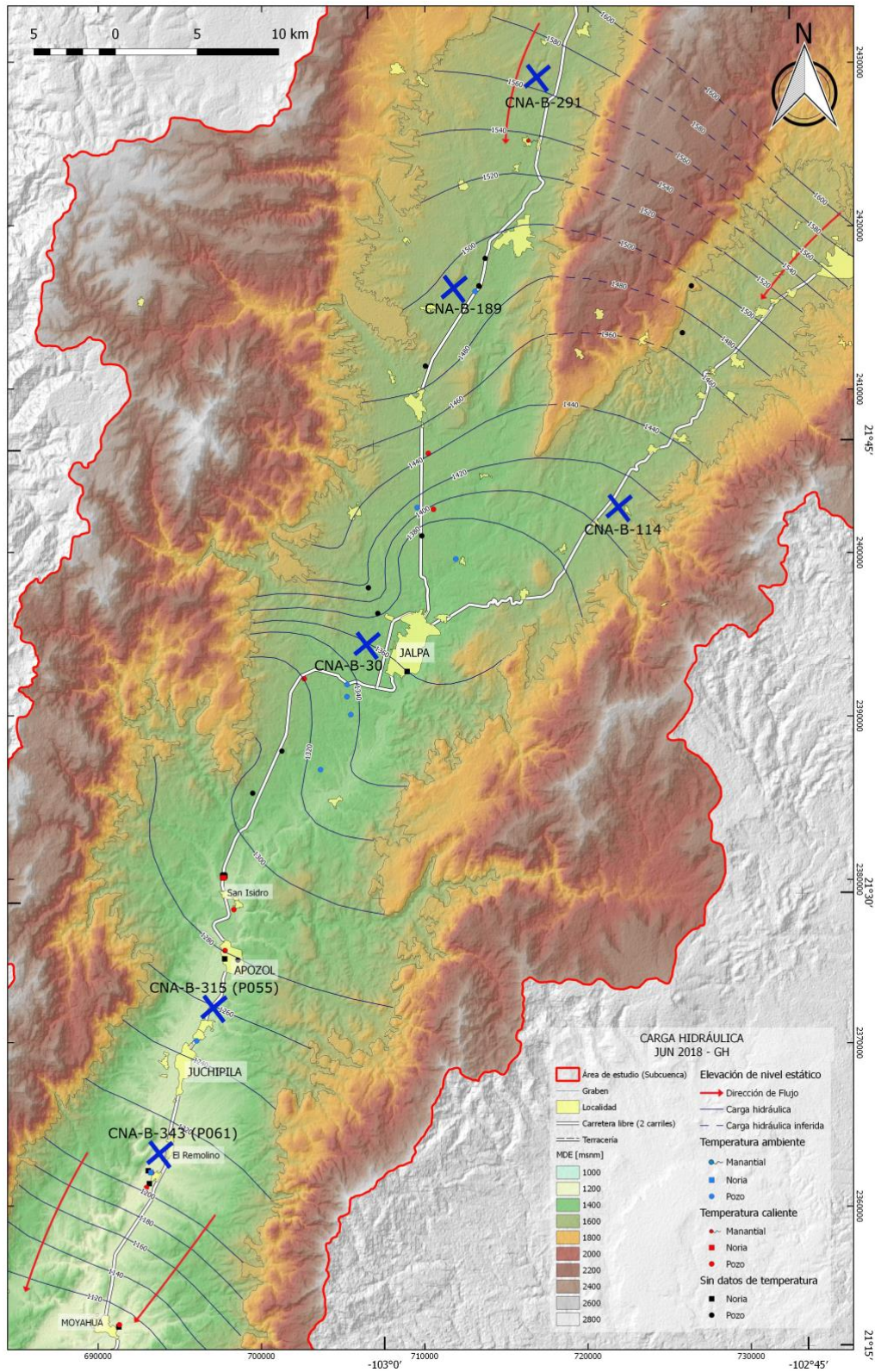


Figura 4.4. Ubicación de los pozos (representados por cruces azules) en los cuales se llevaron a cabo pruebas de bombeo por la consultoría BETSCO S.A. de C.V. en el año de 2005.

5. Caracterización hidrogeoquímica y termalismo no convencional asociado

5.1 Marco teórico

5.1.1 Geotermia no convencional

La energía geotérmica es el aprovechamiento del calor que proviene naturalmente de la Tierra para beneficio de la sociedad. Es entonces un sistema geotérmico aquel que cumple con las características geológicas necesarias para que ese calor pueda ser atrapado y posteriormente explotado. Según Boden (2017), los sistemas geotérmicos se pueden dividir de acuerdo a su temperatura como:

- Baja entalpía ($T < 100^{\circ}\text{C}$)
- Entalpía moderada ($100^{\circ}\text{C} < T < 175^{\circ}\text{C}$)
- Alta entalpía ($T > 175^{\circ}\text{C}$)

Se puede considerar como termal al agua de una fuente natural cuya temperatura se encuentra entre 6°C y 9°C más caliente que la temperatura media anual del aire de las localidades en donde aparece (Tarbuck & Lutgens, 2005). En estos casos el agua se infiltra a través de fracturas, fallas o mediante procesos de recarga natural, y la mayoría de las veces es calentada por una fuente magmática o por una roca volcánica joven (< 1.5 M.a.) anómalamente caliente, formando sistemas geotérmicos que son conocidos como magmáticos (Boden, 2017), éstos son característicos de volcanes activos relacionados a límites tectónicos, así como de puntos calientes. Generalmente son de moderada y alta entalpía. Ejemplos de este tipo en México son Los Humeros (0.5 M.a.), Los Azufres (Cuaternario) y Las Tres Vírgenes (Cuaternario).

Sin embargo, existen sistemas en los cuales no se tiene registro de actividad reciente involucrada, sino que el calor es generado por mecanismos diferentes. En este trabajo se tratarán como sistemas geotérmicos no convencionales, pues son menos comunes que los de origen magmático y frecuentemente son de baja y moderada entalpía. Las posibles causas

para la generación de calor en un sistema geotérmico no convencional son presentadas a continuación.

Gradiente geotérmico

El gradiente geotérmico promedio es de 30°C por kilómetro. Existen acuíferos (generalmente profundos) que son calentados debido a la conducción del calor producto de este gradiente, y cuando son sobreyacidos por una roca impermeable que funciona como sello, este calor es almacenado, generando sistemas geotérmicos de baja entalpía.

Adelgazamiento cortical por extensión

Los campos geotérmicos asociados a regiones de extensión de tipo Basin and Range son caracterizados por fuentes de calor no magmáticas (Yang, 2014). Su origen se asocia con flujos de calor provenientes del manto, los cuales son favorecidos por el adelgazamiento cortical. Además, la circulación de los fluidos es favorecida por fallas asociadas a la extensión.

Generación de calor por decaimiento radiactivo

El decaimiento radiactivo de los elementos K, Th y U pueden ser fuentes de calor que dan lugar a temperaturas anómalas en la corteza terrestre, mediante los isótopos de K^{40} , U^{235} y Th^{232} . Este mecanismo se ha descrito en algunos sistemas geotérmicos de baja entalpía (Morales- Arredondo, Rodríguez, Armieta & Villanueva-Estrada, 2016). Las rocas que contienen concentraciones considerables de estos elementos son las rocas ígneas ácidas, como granitos, riolitas e ignimbritas.

Estudios recientes demuestran que el decaimiento radiactivo afecta las temperaturas de la litósfera (Hasterock & Webb, 2017), en la cual la producción de calor promedio se encuentra en el rango de $1.5 \mu W/m^3$ a $1.67 \mu W/m^3$. También se han reportado valores de 2.3 a $4.2 \mu W/m^3$ para las rocas del basamento de los acuíferos de las Grandes Planicies de Norteamérica (Gosnold, 1985), en donde se alcanzan temperaturas de hasta 90°C, y el calor generado podría ser consecuencia de este mecanismo. Wollenberg & Smith en 1964 calcularon la energía calorífica generada por el K, Th y U en las granodioritas de la Sierra Nevada, California y Press & Biehler en ese mismo año la asociaron con un incremento importante de la temperatura (hasta 200°C) en esa zona.

Para tener una aproximación empírica del calor producido por decaimiento radiactivo (A) en una roca (tabla 2), en 1954, Birch desarrolló una fórmula tomando en cuenta las concentraciones de K (en %), U y Th (en ppm) (Albu, Banks & Nash, 1997):

$$A = 0.097[K] + 0.261[U] + 0.072[Th]$$

En donde A se encuentra en μWm^{-3} .

Tabla 2. Producción de calor proveniente de elementos radiactivos en algunas de las rocas de la corteza terrestre. Modificado de Albu (1997).

	U (ppm)	Th (ppm)	K (%)	Producción de calor (A) (μWm^{-3})
Rocas ígneas silíceas	4	16	3.3	2.5
Rocas ígneas máficas	0.5	1.5	0.5	0.3
Lutitas	4	12	2.7	2.1
Carbonatos	2.2	1.7	0.3	0.7
Arenas de playa	3	6	0.3	1.2

5.1.2 Principales constituyentes del agua subterránea

El agua subterránea sufre múltiples modificaciones desde su infiltración en el área de recarga hasta su descarga. Su composición varía de acuerdo a los materiales por los que transita, el tiempo que transcurre en contacto con ellos, temperatura, presión, entre otros factores. A pesar de esta gran variedad de condiciones, hay algunas generalizaciones que se pueden hacer para el agua subterránea natural no contaminada respecto a su composición, pues existen solutos presentes en ella que se encuentran en concentraciones que facilitan su clasificación.

Según Freeze and Cherry (1979), los constituyentes del agua subterránea ocurren como iones (excepto la sílice acuosa) y se pueden dividir en mayoritarios, minoritarios y traza, según las concentraciones en las que estén presentes:

- Constituyentes mayoritarios (mayores a 5 mg/l): calcio (Ca^+), magnesio (Mg^+), sodio (Na^+), sílice (SiO_2), cloruro (Cl^-), sulfato (SO_4^{2-}) y bicarbonato (HCO_3^-).

- Constituyentes minoritarios (de 0.01 a 10 mg/l): potasio (k), fluoruro (F⁻), nitrato (NO₃⁻), carbonato (CO₃²⁻), hierro (Fe), boro (B) y estroncio (Sr).
- Constituyentes traza (menores a 0.01 mg/l): Aluminio (Al), Arsénico (As), Molibdeno (Mo), Fosfato (PO₄³⁻), Cadmio (Cd), Bromuro (Br⁻), etc.

Cabe mencionar que esta clasificación puede variar ligeramente dependiendo de las cantidades en las que los constituyentes se presenten.

5.1.3 Principales constituyentes del agua subterránea termal

A través del estudio de isótopos estables de oxígeno e hidrógeno se ha podido determinar que por lo menos el 95% de las aguas de carácter termal tienen un origen principalmente meteórico (Gupta & Roy, 2007; Rinehart, 1980) y originalmente carecen de contenido mineral. Por lo que el ciclo hidrogeológico juega un papel esencial en las características físicas y químicas que adquiere durante su circulación y ascenso hacia la superficie.

El agua que circula en los sistemas geotérmicos contiene concentraciones variables de solutos aparte de los constituyentes mayores y usualmente se encuentra enriquecida en los siguientes elementos: sodio (Na⁺), potasio (k), litio (Li), calcio (Ca⁺), magnesio (Mg⁺), rubidio (Rb), cesio (Cs), manganeso (Mn), hierro (Fe), cadmio (Cd), mercurio (Hg), arsénico (As), boro (B), sulfatos (SO₄²⁻), cloruros (Cl⁻), bicarbonatos (HCO₃⁻), bromuros (Br⁻), yoduros (I⁻), así como sílice (SiO₂), amoníaco (NH₃) y gases nobles. (Gupta & Roy, 2007; Armienta, Rodríguez, Ceniceros, Cruz, Aguayo, Morales, Cienfuegos, 2014). No obstante, estas concentraciones dependen de la temperatura, el contenido de gases, la fuente de calor, el tipo de roca, la permeabilidad, la edad del sistema hidrotermal y la fuente del fluido, por lo que su presencia varía de un sistema a otro.

La disolución de ciertos minerales se acelera a medida que se incrementa la temperatura, por lo que las aguas termales pueden ser altamente mineralizadas y mostrar más evidencia de las reacciones agua- roca que el agua fría. En consecuencia, se han propuesto diferentes tipos de agua subterránea en los sistemas geotérmicos de acuerdo a su composición. La siguiente clasificación es propuesta por Gupta & Roy (2007):

- Aguas sódico- cloruradas: Es el tipo más común encontrado en los sistemas geotérmicos. Contiene de 1000 a 10 000 mg/kg de cloro. Tiene un pH cercano a la neutralidad.
- Aguas ácidas cloruradas/ sulfatadas: Son comúnmente formadas por la mezcla de agua clorurada y sulfatada a profundidades variables. La oxidación del sulfuro a bisulfato a niveles profundos le da el carácter ácido.
- Aguas bicarbonatadas: Se pueden originar ya sea por disolución de gases que contienen CO₂ o por la condensación de vapor geotérmico en aguas subterráneas profundas y pobres de oxígeno. La disociación del H₂CO₃ (ácido carbónico) a HCO₃⁻ (bicarbonato) convierte a los feldespatos en arcillas, liberando Na⁺ y generando soluciones acuosas neutras.

Debe tomarse en cuenta, sin embargo, que cada uno de estos tipos se pueden mezclar dando lugar a tipos híbridos.

La química dominante de las manifestaciones superficiales depende de la roca de la que emerge. Incluso manantiales termales que se encuentran en una misma cuenca pueden diferir en su composición debido a las diferencias en la cantidad y tipo de agua con la que se mezcla durante su ascenso (Rinehart, 1980).

5.1.4 Conductividad Eléctrica y Sólidos Disueltos Totales

Como resultado de las interacciones del agua con el medio por el que fluye, ésta lleva consigo solutos disueltos, los cuales se determinan en el laboratorio como sólidos disueltos totales (SDT). Según Clark (2015), las aguas naturales se pueden clasificar de acuerdo a su concentración de sólidos disueltos totales como: agua dulce (100- 1000 mg/l), salobre (1000- 10 000 mg/l), salada (10 000- 100 000 mg/l) y salmuera (100 000- 1 000 000 mg/l).

La conductividad eléctrica del agua es una expresión numérica de su habilidad para transportar una corriente eléctrica, que depende de la concentración total de las sustancias disueltas ionizadas que contenga y de la temperatura a la cual se haga la determinación. En

el sistema internacional de unidades (SI), ésta se mide en siemens (S), en donde un siemens es el recíproco de la resistividad eléctrica ($\text{ohm}^{-1} = \text{mho}$). El contenido de solutos en el agua termal es comúnmente más alto que en el agua no termal, y conforme la concentración de iones incrementa, la conductividad de la solución también. La respuesta de la conductividad en relación con el cambio de temperatura es generalmente un incremento del 2% por cada °C (Hem, 1985).

5.1.5 Potencial de Hidrógeno (pH)

Es la concentración efectiva o actividad de los iones de hidrógeno en una solución. Se expresa en unidades logarítmicas, por lo que el pH representa el logaritmo negativo base 10 de la actividad en [mol/l].

El proceso de disociación del agua en iones de H^+ y OH^- puede expresarse en términos de equilibrio químico (k_w) como:

$$k_w = \frac{[\text{H}^+][\text{OH}^-]}{[\text{H}_2\text{O}]}$$

Por convención, la actividad del agua líquida [H_2O] se considera como unidad, entonces la constante de equilibrio del agua se convierte en el producto de las actividades de los iones de H^+ y OH^- , la cual a 25°C y 1 atm adquiere un valor de 10^{-14} , lo que se conoce como constante de ionización del agua. Utilizando la notación de pH, el logaritmo base 10 de la actividad de iones ($-\log k_w$) es igual a 14 (pH=14). Cuando las concentraciones de H^+ y OH^- son iguales se alcanza la neutralidad, y el pH adquiere un valor de 7.

Sin embargo, los efectos de la temperatura modifican los valores de k_w y en consecuencia el pH en el cual el agua adquiere un valor neutro. A temperaturas bajas esto ocurre con un pH más alto y viceversa. Garrels & Christ (1965) presentan las constantes de equilibrio para la disociación del agua en un rango de temperatura del agua de 0-60°C (Freeze & Cherry, 1979) (figura 5.2).

Tabla 3. Constantes de equilibrio del agua a diferentes temperaturas. Modificado de Freeze & Cherry, 1979.

T(°C)	$K_w \times 10^{-14}$
0	0.1139
5	0.1846
10	0.292
15	0.4505
20	0.6809
25	1.008
30	1.469
35	2.089
40	2.919
45	4.018
50	5.474
55	7.297
60	9.614

5.1.6 Potencial de oxidación- reducción (Eh)

Las reacciones químicas en las cuales los elementos participantes cambian su número de valencia ya sea ganando o perdiendo electrones se denominan reacciones de oxidación o reducción. En la oxidación un elemento pierde electrones, mientras que en la reducción los gana.

El potencial de oxidación- reducción o Eh es una medida del intercambio de electrones entre especies donadoras y receptoras. Se determina midiendo la diferencia de potencial que genera la pareja redox dominante en la solución en voltios [V]. El valor del Eh define en qué dirección la reacción avanzará para poder liberar energía, esto es expresado mediante el signo que adquieran las mediciones: valores negativos indican una tendencia reductora de la solución y valores positivos, una tendencia oxidante. Los valores de Eh en las aguas naturales

van desde 1 a -0.5 [V] (Clark, 2015). Generalmente el agua que se encuentra cerca de la superficie tiene un Eh más positivo que el agua que se encuentra a mayor profundidad, que es más reductora.

Los sistemas de agua subterránea no están limitados al O₂ como el único receptor de electrones ni a la materia orgánica como la única donadora de electrones, sino que existen otras parejas redox importantes ya sea disueltas durante la recarga o como minerales y gases en el subsuelo (figura 5.1).

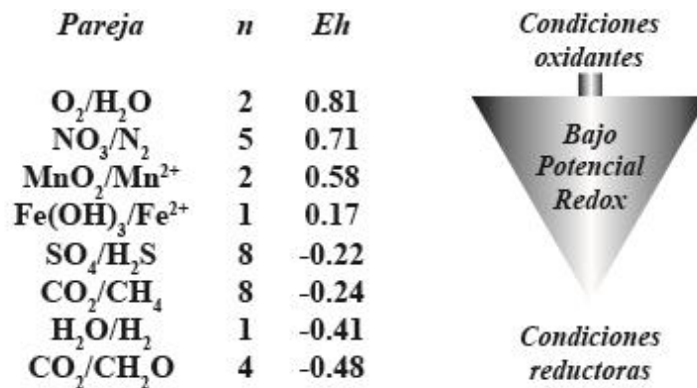


Figura 5.1. Principales parejas redox en el agua subterránea, electrones transferidos en las reacciones (n) y su Eh a pH neutro. Modificado de Clark, 2015.

Otra forma de expresar el potencial de oxidación- reducción es al igual que el pH, en términos del logaritmo base 10 de la actividad de electrones, mediante el símbolo *pe*. En condiciones estándar (25°C y 1 atm) y cuando el Eh está proporcionado en voltios:

$$pe = \frac{Eh}{0.0592}$$

El *pe* se define entonces como la demanda que existe de electrones en las especies en solución. Una solución con alto *pe* se caracterizará por tener alta concentración de especies reducidas.

5.2 Metodología

5.2.1 Toma de muestras en campo

Se realizaron tres campañas de exploración con duración de una semana en los meses de junio de 2017, diciembre de 2017 y junio de 2018. En éstas se visitó un total de 67 aprovechamientos distribuidos a lo largo de la zona de estudio, de los cuales 47 son pozos, 10 norias y 10 manantiales. Los parámetros medidos en campo fueron profundidad de nivel estático [m], temperatura [°C], conductividad eléctrica [$\mu\text{S}/\text{cm}$], sólidos disueltos totales [ppm], pH y potencial de oxidación- reducción [V].

Se midió la profundidad al nivel estático en 43 aprovechamientos, para lo cual se utilizó una sonda eléctrica de 200 m, mientras que los parámetros fisicoquímicos se midieron en 66 aprovechamientos con la ayuda de un medidor multiparamétrico HANNA HI 9828 (figura 5.2). Se utilizó agua destilada para enjuagar los sensores del medidor entre cada toma de muestra.

Por otra parte, se tomaron muestras en 49 aprovechamientos, de los cuales 33 son pozos, 9 son manantiales y 7 son norias, para el análisis de los constituyentes mayoritarios Ca, K, Mg, Na, Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} y HCO_3^- y traza As, Fe, Li, S, F^- . Éstas fueron recolectadas en botellas de polietileno de 600 ml y almacenadas en hieleras durante su transporte al laboratorio de Geoquímica Ambiental del Centro de Geociencias de la UNAM Campus Juriquilla.

5.2.2 Análisis químicos

El análisis químico de los elementos fue llevado a cabo en el laboratorio de Geoquímica Ambiental del Centro de Geociencias de la UNAM Campus Juriquilla. Para determinar los aniones se utilizó la técnica de Cromatografía Líquida de Alto Rendimiento (HPLC) con un Cromatógrafo Dionex ICS-2500 HPLC/IC. Los aniones medidos fueron: cloruros Cl^- (límite

de cuantificación 0.2 mg/kg), sulfatos SO_4^{2-} (límite de cuantificación 0.5 mg/kg), nitratos NO_3^- (límite de cuantificación 0.5 mg/kg) y fluoruros F^- (límite de cuantificación 0.1 mg/kg).

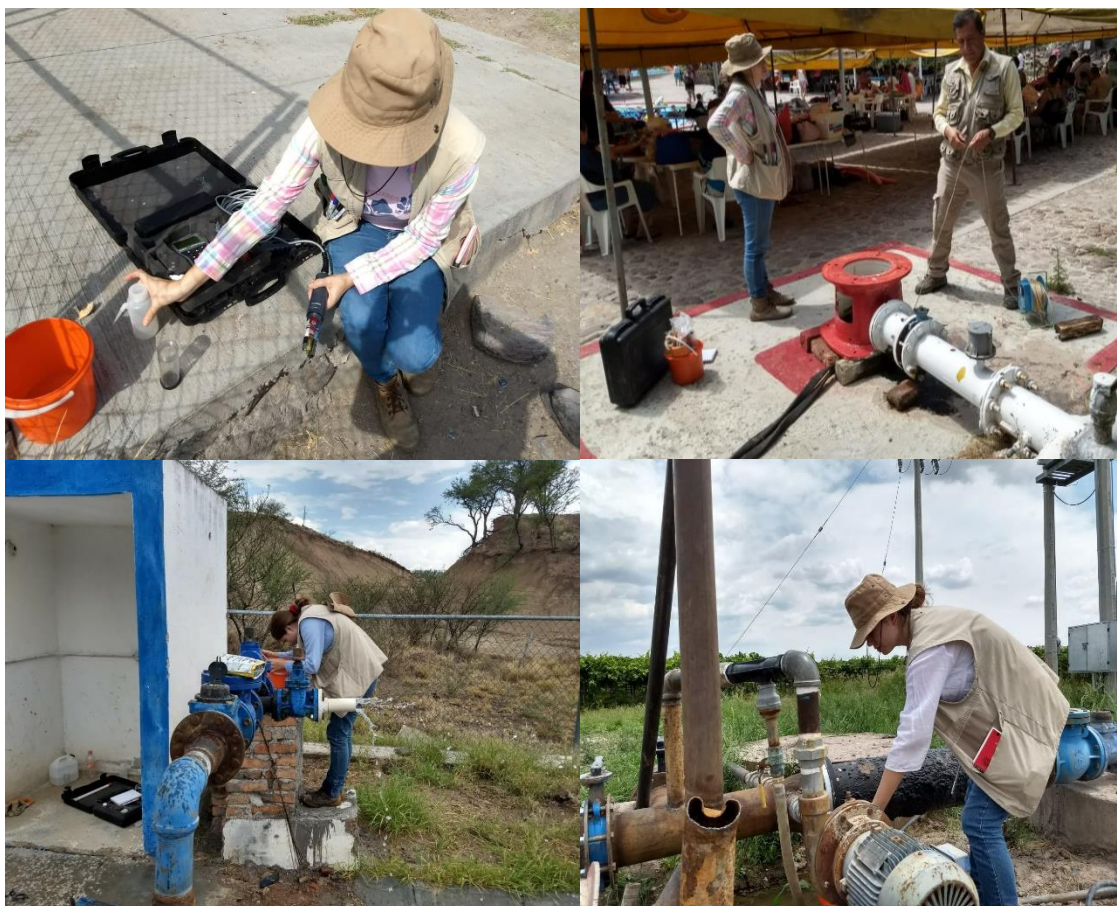


Figura 5.2 Muestreo y medición de los parámetros en campo.

Los cationes mayoritarios y los demás elementos fueron medidos con la técnica de Plasma de Acoplamiento Inductivo- Espectrofotometría de Emisión Óptica (ICP-OES) mediante un espectrómetro Thermo iCAP 6500 Duo View. Los elementos medidos fueron calcio Ca^+ , potasio k, magnesio Mg^{2+} , sodio Na^+ , arsénico As, hierro Fe, litio Li y azufre S. Los límites de detección con esta técnica se encuentran en el rango de partes por billón (ppb)/ microgramos por litro ($\mu\text{g}/\text{l}$).

5.3 Resultados

5.3.1 Parámetros medidos en campo

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de los parámetros fisicoquímicos medidos en campo (temperatura, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales, pH, y potencial de oxidación- reducción) durante los meses de junio y diciembre de 2017 y junio de 2018. Como se mencionó anteriormente, a excepción de la temperatura estos parámetros fueron también analizados en laboratorio para algunos aprovechamientos previamente seleccionados. Sin embargo, los valores que se tomaron en cuenta para realizar el análisis fueron aquellos medidos en campo, ya que representan el valor in situ de cada parámetro, el cual se ve afectado por la temperatura y factores fisicoquímicos e incluso biológicos.

Debido a que en algunos aprovechamientos se realizaron mediciones consecutivas en los meses de junio de 2017, diciembre de 2017 y junio de 2018, el valor que se tomó en cuenta para cada parámetro fue el promedio, considerando también el factor estacional (época de estiaje y época de lluvias).

Es de suma importancia tomar en cuenta que para las muestras analizadas no se cuenta con un valor de profundidad en específico, por lo que no representan a una unidad hidrogeológica en especial, sino a una posible mezcla.

5.3.1.1 Temperatura

Se midió la temperatura del agua subterránea en un total de 64 aprovechamientos distribuidos a lo largo del graben de Juchipila, de los cuales 44 corresponden a pozos, 10 a manantiales y 10 a norias. La tabla 8 ubicada en la sección de apéndices muestra los valores de temperatura para cada aprovechamiento en los meses de junio y diciembre de 2017, así como de junio de 2018. La temperatura media anual de la zona de estudio es de 20.1°C, por lo tanto, se consideran termales las temperaturas iguales o mayores a 30°C, y las menores a este valor, se consideran como temperaturas normales del régimen natural del acuífero.

Como se observa en la figura 5.3, el agua subterránea de carácter termal se distribuye tanto en el norte, como en el centro y sur de la zona de estudio. En el límite norte, la temperatura máxima medida fue de 58.3°C correspondiente al manantial M027 ubicado hacia el poniente del graben, en el municipio de Villanueva. Ligeramente hacia el sur, en los municipios de Calvillo y Huanusco, existen temperaturas normales concentradas en el centro y de nuevo temperaturas termales en el lado oriente con valores mayores a 35°C. Cabe mencionar que el termalismo se manifiesta tanto en pozos como en manantiales, aunque estos últimos poseen las temperaturas más altas, a excepción del manantial M007 el cual posee una temperatura normal de 26.2°C.

En la zona centro, en los municipios de Jalpa y Apozol, se puede apreciar la concentración de temperaturas termales en la parte media del graben, con valores mayores a 40°C. Éstas se manifiestan en pozos, norias y manantiales. La temperatura más alta de esta zona es de 43°C, medida en el manantial M019. Alrededor de esta concentración de puntos termales las temperaturas disminuyen, incluso llegando por debajo de los 25°C, como ocurre en el manantial M029 ubicado en el lado oeste, con temperatura de 22.9°C.

Para la zona sur existe de nuevo una concentración de altas temperaturas, siendo estas las más altas registradas en toda la zona de estudio, con valores de hasta 67°C, como es el caso del pozo P062 ubicado en el municipio de Moyahua de Estrada y los manantiales M024 y M022, con 61 y 48°C, respectivamente. El termalismo continúa hacia el poniente con temperaturas por arriba de los 35°C. Por el contrario, ligeramente hacia el oriente las temperaturas comienzan a disminuir hasta alcanzar valores normales, pero a partir de la noria N031 con 31°C, la temperatura comienza a incrementar nuevamente.

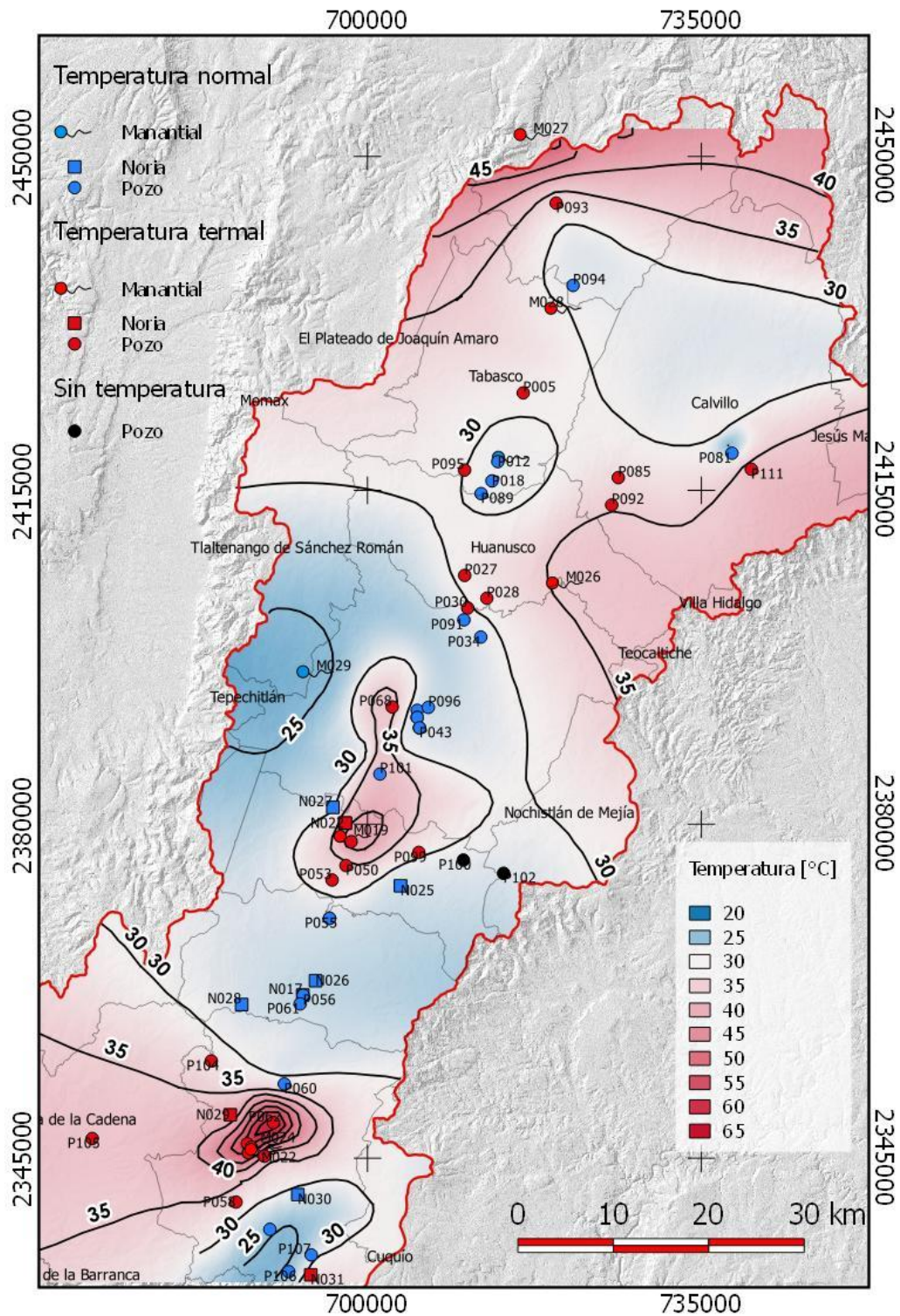


Figura 5.3. Mapa que muestra la distribución de la temperatura del agua subterránea en el área de estudio para los años de 2017 y 2018, así como los diferentes aprovechamientos en donde fueron realizadas las mediciones.

5.3.1.2 Conductividad Eléctrica

Para la medición de este parámetro se visitaron 65 aprovechamientos, de los cuales 45 son pozos, 10 norias y 10 manantiales. En la tabla 9 ubicada en la sección de apéndices éstos se encuentran enlistados con su respectivo valor de conductividad eléctrica para los meses de junio y diciembre de 2017, así como de junio de 2018. Es importante mencionar que la concentración de sólidos disueltos totales máxima medida en todo el acuífero del graben de Juchipila es de 747 ppm, por lo que según la clasificación de Freeze & Cherry (1979) se trata de agua dulce; y en este tipo de agua los valores de conductividad eléctrica varían entre 100 y 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Por su parte, el valor máximo medido de conductividad eléctrica es de 1541 $\mu\text{S}/\text{cm}$, siendo el valor promedio 622 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Para fines de este trabajo aquellos que sean menores al valor promedio serán considerados de baja conductividad eléctrica, y los valores mayores de alta conductividad eléctrica.

La distribución de la conductividad eléctrica en el acuífero del graben de Juchipila se muestra en la figura 5.4. En la parte norte, en el municipio de Villanueva y una porción de Calvillo, los valores van desde 600 a más de 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$, aumentando hacia el norte, siendo el más alto de esta zona representado por el manantial M027, con 1091 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Continuando hacia la parte central, en Huanusco, Jalpa y Apozol la conductividad eléctrica se presentó con valores bajos, con un de promedio de 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, con excepción de regiones en la parte central del graben, en donde estos valores descienden a menos de 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$, lo cual coincide con una región de temperatura normal (menos de 30°C). Por el contrario, ligeramente hacia el sur se encuentra otra pequeña región en la que los valores se incrementan, como lo muestra el P028 con 711 $\mu\text{S}/\text{cm}$. En el municipio de Apozol esta tendencia de valores bajos cambia, pues empiezan a incrementar a más de 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Los valores más altos registrados en esta zona están representados por el manantial M019 y la noria N022, con 842.2, 843 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 43 y 34 °C respectivamente.

En la parte sur del graben, en los municipios de Juchipila y Moyahua de Estrada se registraron los valores más altos de conductividad eléctrica. Éstos se concentran hacia el oriente y están representados tanto por pozos como por norias y manantiales. De igual manera, estos aprovechamientos presentaron temperaturas normales y termales, aunque aquellos que sobrepasan valores de 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ son termales y en su mayoría manantiales, con excepción

de la noria N031, con 1117 $\mu\text{S}/\text{cm}$. El único aprovechamiento de temperatura normal que presenta un valor de más de 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ es el P060, con 1464.5 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

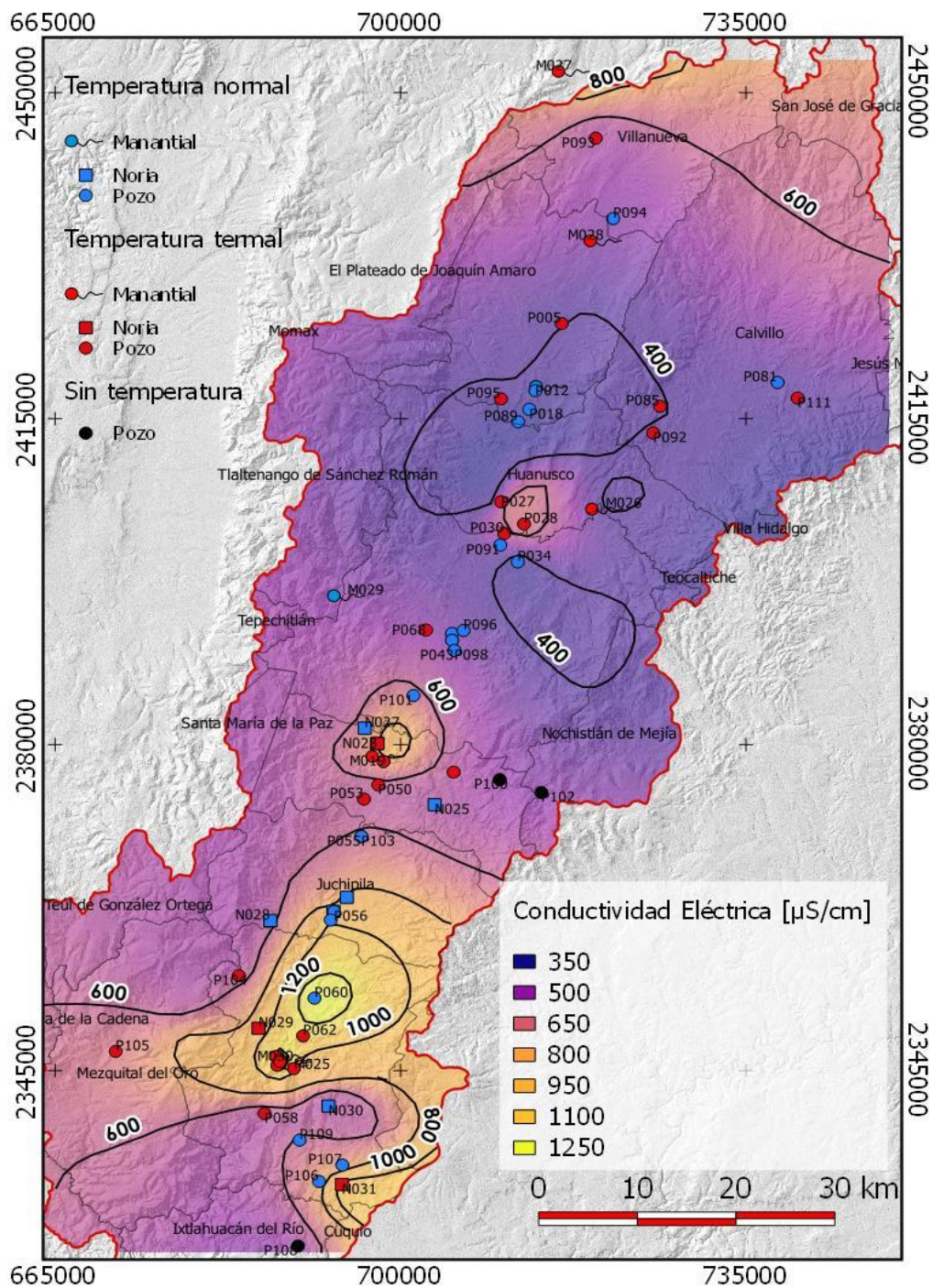


Figura 5.4 Mapa que muestra el comportamiento de la conductividad eléctrica en el agua subterránea del área de estudio para los años de 2017 y 2018.

5.3.1.3 Sólidos Disueltos Totales

Se tomaron datos de agua de 66 aprovechamientos: 46 pozos, 10 norias y 10 manantiales. La tabla 10 ubicada en la sección de apéndices muestra las mediciones de las concentraciones en partes por millón realizadas en junio y diciembre de 2017, y de junio de 2018. También se muestran los resultados de laboratorio para los aprovechamientos a los cuales se les realizó este análisis. Sin embargo, los valores tomados en cuenta para la configuración y análisis de los sólidos disueltos totales son aquellos medidos en campo.

De acuerdo a la NOM-127-SSA1-1994, el límite permisible de sólidos disueltos totales en el agua para uso y consumo humano es de 1000 mg/l, y el valor máximo medido en este trabajo es 747 ppm (mg/l). Debido a que no se sobrepasa este límite, se considerarán altos los valores mayores a la concentración promedio (306 ppm) y bajos aquellos que sean menores.

La figura 5.5 muestra la distribución de los sólidos disueltos totales medidos en el acuífero del graben de Juchipila. Como se puede observar, presenta un comportamiento muy similar al de la conductividad eléctrica. En el límite norte las concentraciones superan las 400 ppm, siendo la más alta representada por el manantial M027, con 535.3 ppm y 58.3 °C. Más al sur, en los municipios de Huanusco y Jalpa, las concentraciones descienden a menos de 300 ppm, a pesar de que existen pozos, norias y manantiales con temperaturas termales y normales distribuidos por toda la región.

En la zona centro, en el municipio de Apozol se concentran valores altos, incluso por arriba de 400 ppm. Éstos son representados por un par de aprovechamientos termales: el manantial M019 y la noria N023 con 413.2, 442 ppm y 43 y 38 °C respectivamente. Esta pequeña región coincide con la que se forma en la distribución de la conductividad eléctrica, en donde también se registran valores altos.

Al sur del área de estudio, en Juchipila y Moyahua de Estrada el comportamiento de la distribución de este parámetro y el de la conductividad eléctrica es prácticamente el mismo. Las concentraciones más altas se agrupan hacia el oriente; los aprovechamientos con temperaturas normales presentan valores entre 300 y 400 ppm y en los aprovechamientos de temperaturas termales los valores van de 400 ppm a más de 600 ppm, en donde los más altos se encuentran en los manantiales de esa zona, los cuales alcanzan temperaturas de hasta 61 °C.

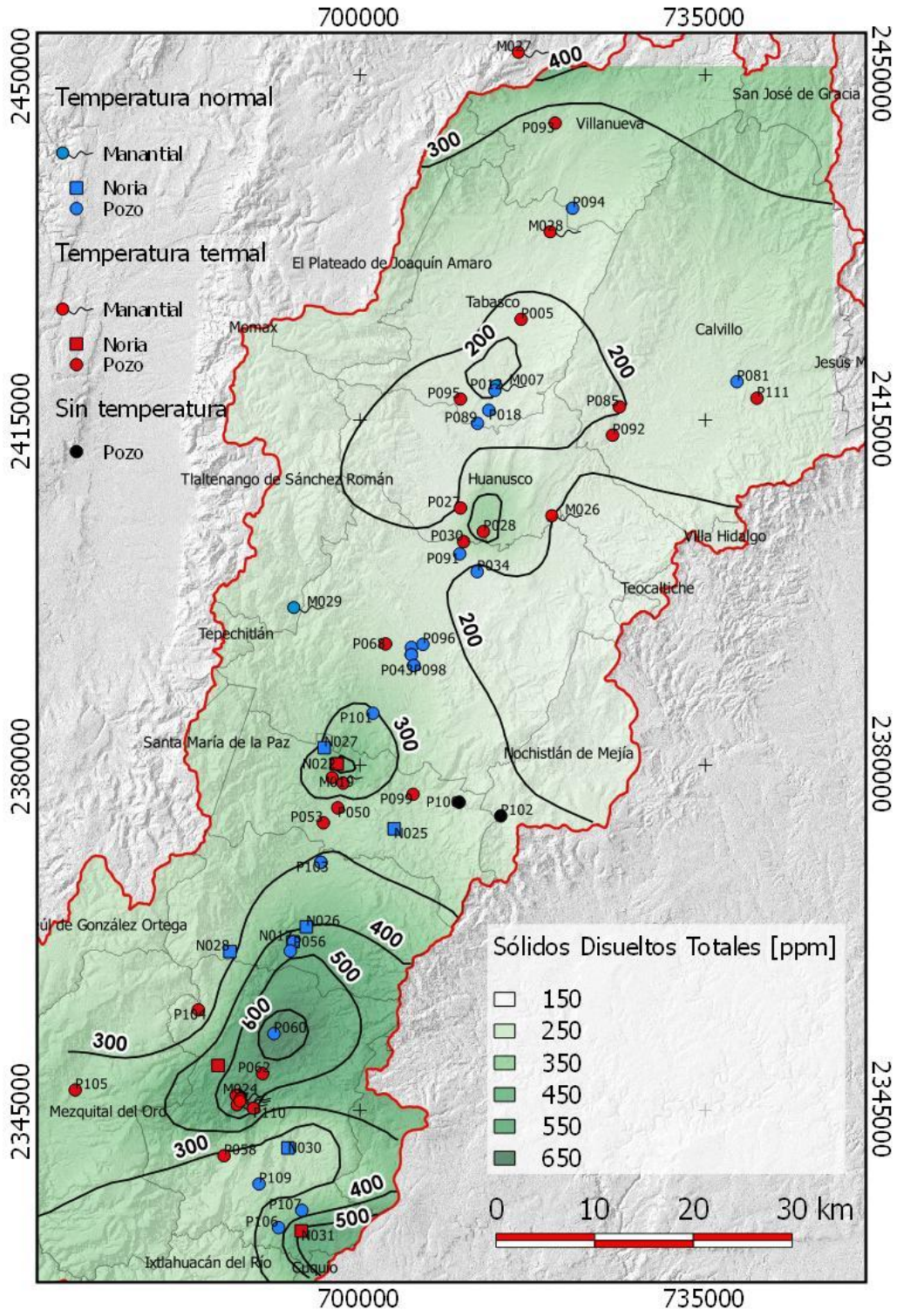


Figura 5.5 Mapa que muestra la concentración de los sólidos disueltos totales distribuidos en el agua subterránea del área de estudio para los años de 2017 y 2018.

5.3.1.4 Potencial de Hidrógeno (pH)

Al igual que con los sólidos disueltos totales, la cantidad de aprovechamientos en los cuales se midió este parámetro son 66, de los cuales 46 son pozos, 10 norias y 10 manantiales. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 11 ubicada en la sección de apéndices.

Los valores de potencial de hidrógeno en el acuífero del graben de Juchipila se muestran en la figura 5.6. Hacia el norte del graben, se encuentran los valores más bajos, representados por el manantial M027 con un pH de 6.86. Un poco más hacia el sur los valores se encuentran en un rango de 7 a 8, coincidiendo con una zona de aprovechamientos termales, a excepción de una zona ubicada en la parte media del graben, en donde los valores están por arriba de 8, y son de temperatura normal.

En la zona centro, en los municipios de Huanusco y Jalpa existen valores de pH que se encuentran por debajo de 7.5 concentrados hacia el oriente, mientras que del lado poniente los valores ascienden, sin llegar a 8. Ligeramente hacia el sur, esta tendencia se invierte de manera abrupta, pues del lado oriente los valores de pH son mayores a 8, incluyendo aprovechamientos termales y de temperatura normal, y del lado poniente son inferiores a este valor.

En el sur del graben, en los municipios de Juchipila y Moyahua de Estrada, los valores de los aprovechamientos se encuentran en un rango de 7 a 8, a excepción del límite sur, en donde están por arriba de 8 y 8.5.

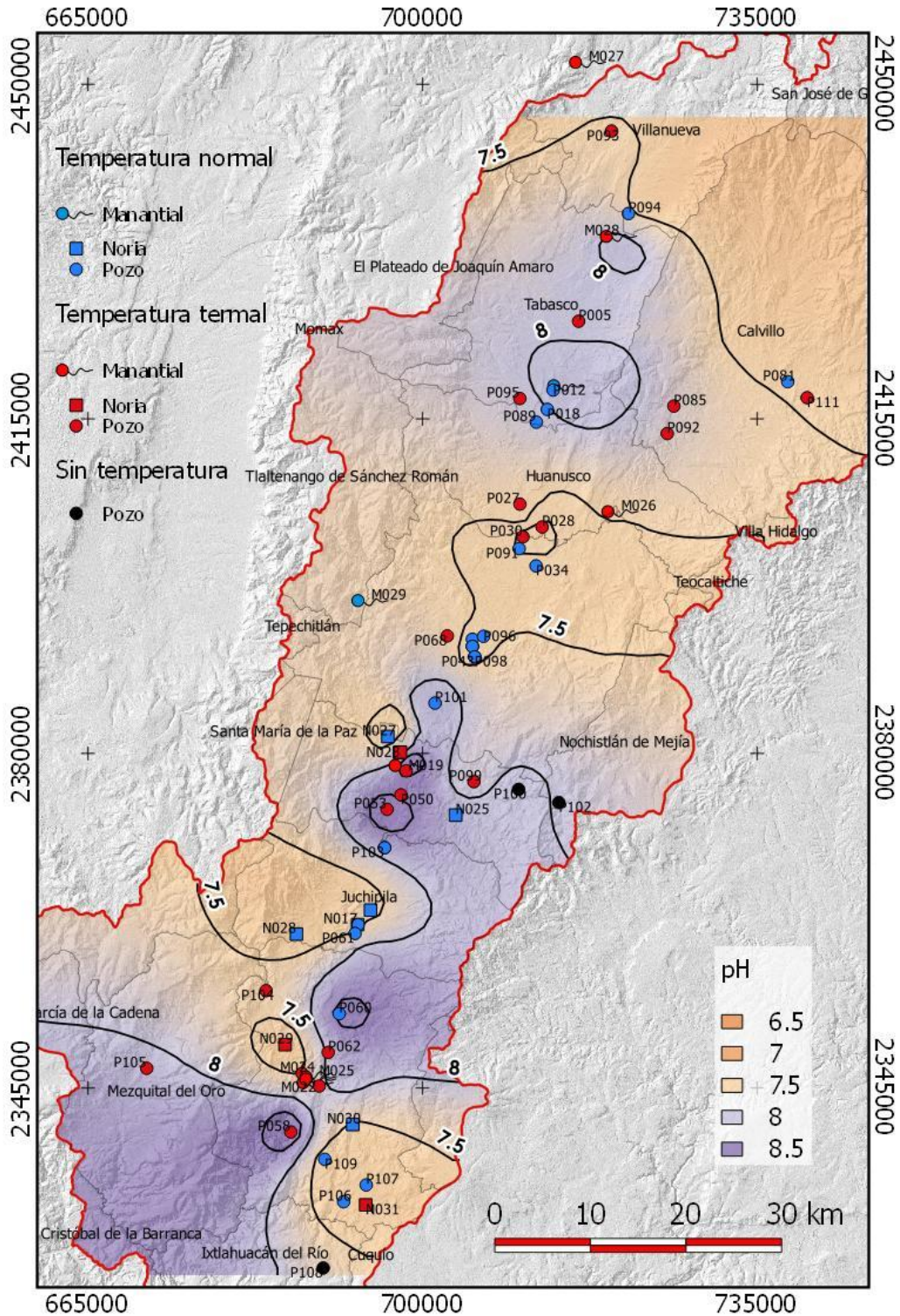


Figura 5.6 Mapa que muestra la distribución del pH en el agua subterránea del área de estudio para los años de 2017 y 2018.

5.3.1.5 Potencial de Oxidación- Reducción (Eh)

Este parámetro se midió en el agua de 63 aprovechamientos, de los cuales 43 son pozos, 10 norias y 10 manantiales. La tabla 12 del ubicada en la sección de apéndices muestra los resultados obtenidos para cada uno. Según, Clark, 2015, los valores de Eh en el agua natural varían entre -0.5 y 1 V. Debido a que los valores obtenidos en este trabajo se encuentran dentro de este rango, se consideran altos aquellos que estén por encima del valor promedio (0.14 V) y bajos aquellos que estén por debajo de ese valor.

La figura 5.7 muestra la distribución de los valores en el área de estudio. En el límite norte, en los municipios de Villanueva y Tabasco existen valores altos representados por el M027 y P093 con 0.2257 V y 0.2379 V respectivamente. Ambos son aprovechamientos termales. Hacia el sur, en los municipios de Calvillo, Huanusco y Jalpa, los valores son menores y se mantienen por debajo de 0.1 V en pozos de temperatura normal y termal, a excepción del P092 y M026, los cuales son termales y poseen valores altos por encima de 0.15 V, y del M029, el cual es de temperatura normal y presenta un valor de 0.1482 V.

En la zona centro, en el municipio de Huanusco, los pozos y norias termales presentan valores por debajo de 0.1 V, mientras que los pozos y norias de temperatura normal se encuentran en el rango de 0.1 V a 0.15 V.

Finalmente, en la zona sur en los municipios de Juchipila y Moyahua de Estrada, los valores más altos (>0.15 V) se encuentran en el área donde se concentran los manantiales (todos de temperatura termal). Los demás aprovechamientos muestran valores que se encuentran dentro del rango de 0.1 y 0.15 V.

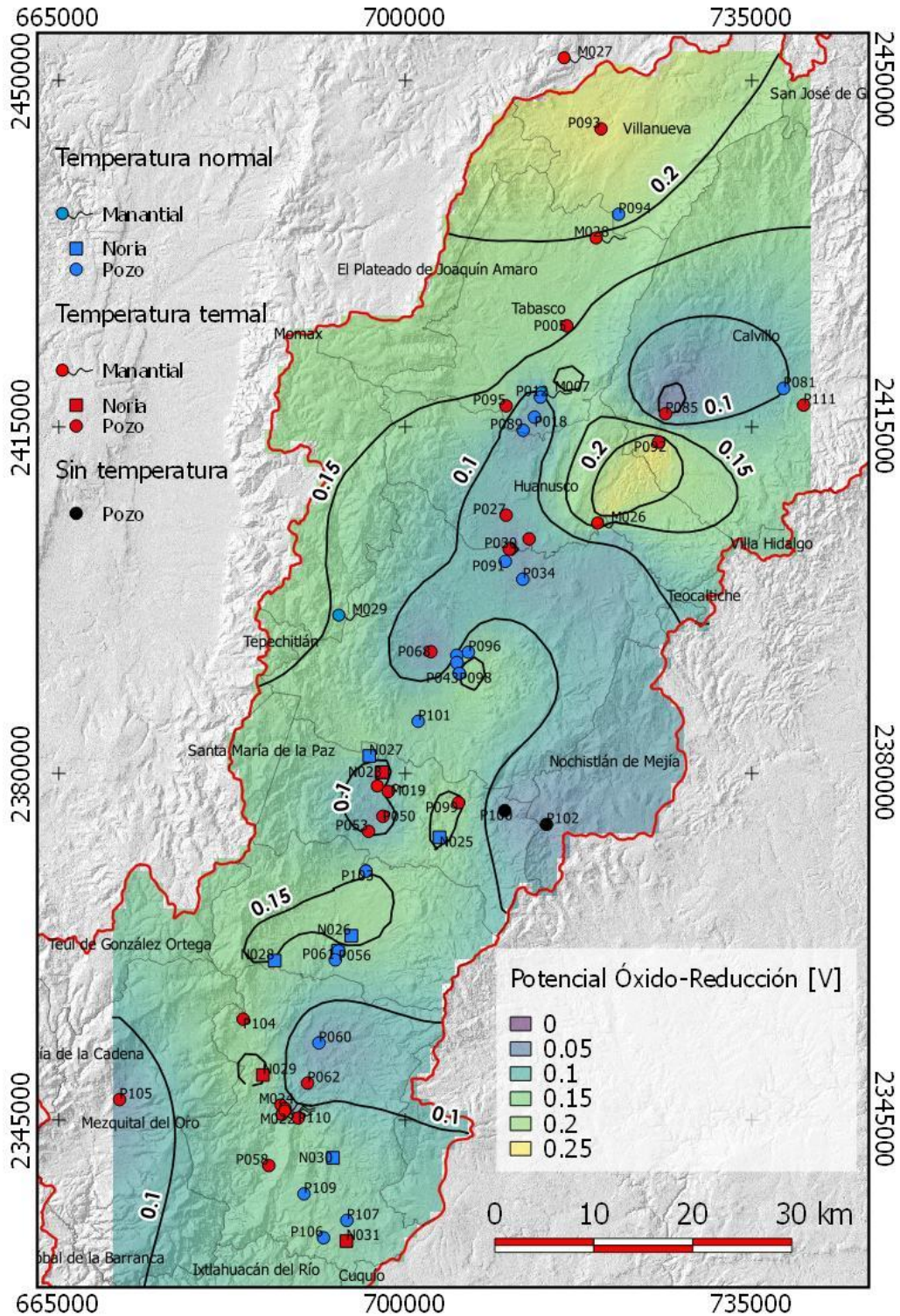


Figura 5.7. Mapa que muestra el comportamiento del potencial de oxidación- reducción en el agua subterránea del área de estudio para los años de 2017 y 2018.

5.3.2 Parámetros medidos en laboratorio

Los parámetros medidos en laboratorio incluyen a los constituyentes químicos mayoritarios calcio (Ca^{2+}), potasio (K), magnesio (Mg^{2+}), sodio (Na^+), cloruros (Cl^-), nitratos (NO_3^-), sulfatos (SO_4^{2-}) y bicarbonatos (HCO_3^-), así como algunos de los constituyentes minoritarios y traza comunes en el agua subterránea termal: arsénico (As), hierro (Fe), litio (Li), azufre (S) y fluoruros (F^-). Se realizaron 14 análisis para cada aprovechamiento, los cuales conforman un total de 49 aprovechamientos distribuidos a lo largo de la zona de estudio, de éstos 33 son pozos, 9 manantiales y 7 norias. Estas mediciones se realizaron en junio de 2017 y junio de 2018, sin embargo, no se midió ningún aprovechamiento más de una vez, por lo que en los resultados se muestran las fechas en que fueron realizadas.

5.3.2.1 Constituyentes mayoritarios

La tabla 4 muestra las concentraciones en [mg/l] de los constituyentes mayoritarios. También se muestra la temperatura medida en campo para cada aprovechamiento. Para el balance de electroneutralidad se tomó como límite el 15% en el porcentaje de error, de acuerdo a Webb (2004). Los análisis que sobrepasaron este valor fueron 9 y se desecharon para el posterior manejo de datos, quedando un total de 40 aprovechamientos: 8 manantiales, 5 norias y 27 pozos.

Se puede apreciar que los componentes que sobrepasan los límites permisibles para el agua de uso y consumo humano establecidos por la NOM-127-SSA1-1994 son el sodio (límite= 200 mg/l) y los nitratos (límite= 10 mg/l). En el caso del sodio, el límite se supera en el pozo P060 con 357.37 mg/l y 29.6 mg/l y los manantiales M022, M024 y M030 con 210.60 mg/l, 223.40 mg/l y 232.67 mg/l, y 47.2°C, 61°C y 39.9°C respectivamente.

Sin embargo, en el caso de los nitratos el valor más alto que supera la norma se encuentra en la noria termal N031, con 54.78 mg/l y 31°C, es decir, más de 5 veces la concentración máxima permitida. Los demás aprovechamientos que sobrepasan el límite comprenden norias y pozos de temperatura normal y termal, en estos últimos el valor más alto es de 38.82 mg/l en el P106, con temperatura de 25.2°C.

Tabla 4. Concentraciones en [mg/l] de los constituyentes mayoritarios y porcentajes de error en los balances de electroneutralidad en los aprovechamientos de la zona de estudio.

Clave	Fecha	T [°C]	Ca ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	% Error
CNA-B-208	Junio 2018	39.8	10.17	2.26	0.50	127.82	15.64	1.33	50.37	196	13.5
M007	Junio 2018	26.2	26.95	7.65	3.23	22.41	4.97	2.45	11.74	152	-2.3
M019	Junio 2017	43.0	4.69	1.83	0.07	132.80	22.07	0.38	72.87	295	11
M022	Junio 2017	47.2	22.45	5.32	0.93	210.60	66.33	0.71	318.58	132	0.6
M024	Junio 2017	61.0	21.57	5.64	0.20	223.40	84.23	0.24	355.38	130	3.9
M026*	Junio 2018	38.3	17.28	2.88	0.30	71.03	4.77	2.70	10.47	194	6.2
M027*	Junio 2018	58.3	61.58	5.36	1.98	183.35	16.59	1.17	48.71	477	9.8
M028*	Junio 2018	30.3	46.26	9.83	6.59	39.93	6.15	0.62	17.31	185	15
M029*	Junio 2018	22.4	31.89	1.65	5.95	14.16	1.50	0.42	0.69	125	13
M030*	Junio 2018	39.9	24.81	7.55	0.50	232.67	41.44	0.39	159.20	114	29.1
N025*	Junio 2018	25.1	54.67	4.71	11.40	16.27	3.05	10.88	13.79	180	12.5
N026*	Junio 2018	28.6	82.53	10.19	7.60	94.40	19.08	7.58	84.24	315	9.2
N027*	Junio 2018	27.8	121.16	6.43	2.96	19.25	2.06	1.10	15.51	306	14.9
N028*	Junio 2018	27.9	33.21	6.52	14.47	71.12	2.54	0.40	6.29	228	21.8
N029*	Junio 2018	31.8	104.90	6.48	19.33	78.12	5.36	20.97	77.55	354	13.6
N030*	Junio 2018	26.1	78.23	7.21	6.63	11.86	3.18	7.36	5.09	198	18.3
N031*	Junio 2018	31.0	157.11	9.33	40.21	38.97	69.04	54.78	62.60	362	13.1
P005	Junio 2018	33.0	33.92	6.59	1.38	39.84	2.16	4.13	5.89	158	13.2
P027	Junio 2018	30.7	36.01	8.28	0.76	56.73	2.33	2.80	5.89	204	13.3
P028	Junio 2018	30.7	34.67	9.74	0.60	106.26	7.71	14.37	167.29	180	1.03
P034	Junio 2018	28.5	33.85	7.97	2.75	39.86	4.89	3.04	7.17	164	13.4
P049	Junio 2018	45.7	5.76	1.57	0.05	132.96	21.47	0.49	74.61	189	7.8
P053	Junio 2018	31.5	1.89	4.50	0.08	135.90	20.60	0.00	75.50	166	12.2
P055	Junio 2017	28.1	47.36	8.95	0.62	90.19	2.49	1.21	152.56	165	4.8
P056	Junio 2017	26.2	69.37	9.71	7.50	90.61	19.04	3.89	82.99	295	7.2
P060	Junio 2018	29.6	3.23	4.78	0.40	357.37	5.23	1.24	208.83	476	9.8
P061	Junio 2018	26.3	119.01	8.54	13.09	92.46	26.74	21.02	140.03	316	10.2
P081	Junio 2018	24.4	65.79	15.02	7.34	64.14	17.30	25.60	39.60	226	15
P085	Junio 2018	33.9	20.10	2.30	1.13	69.10	5.98	3.76	19.40	140	18.6
P092*	Junio 2018	34.9	22.14	2.85	0.90	71.34	5.78	3.70	14.20	166	14.70
P093*	Junio 2018	30.9	29.25	8.20	2.59	50.97	4.02	5.93	10.68	232	-1.60
P094*	Junio 2018	27.6	79.13	12.29	6.23	20.93	6.63	8.15	24.67	224	11.70
P095*	Junio 2018	30.3	45.72	6.88	2.56	38.51	2.85	10.38	6.70	160	18.20
P096*	Junio 2018	27.4	33.62	4.68	2.44	19.34	4.12	8.48	10.87	197	-13.21
P097*	Junio 2018	25.9	59.60	6.00	5.85	25.31	2.73	4.60	6.19	185	17.50
P098*	Junio 2018	26.1	64.40	6.30	5.89	24.09	3.38	5.41	15.40	193	14.54
P099*	Junio 2018	30.7	55.84	6.49	7.38	32.83	3.27	7.15	9.78	198	15

Clave	Fecha	T [°C]	Ca ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	% Error
P100*	Junio 2018	s.v.	30.83	2.43	6.48	58.70	3.66	3.67	7.64	156	23.95
P101*	Junio 2018	29.5	8.24	1.76	0.22	131.49	7.97	1.03	75.75	212	7.82
P102*	Junio 2018	s.v.	4.99	0.37	0.56	95.52	2.77	2.69	2.85	158	23.34
P103*	Junio 2018	29.5	50.10	8.22	0.89	90.09	2.43	1.20	139.97	158	9.04
P104*	Junio 2018	32.1	49.56	4.78	14.74	24.33	3.03	9.30	2.57	208	13.73
P105*	Junio 2018	36.4	15.69	1.86	1.21	132.70	10.63	0.75	162.84	122	8.05
P106*	Junio 2018	25.2	117.37	4.03	14.50	16.35	5.23	38.82	45.89	262	13.35
P107*	Junio 2018	29.7	103.42	6.69	16.42	24.03	13.25	37.48	27.45	248	15
P108*	Junio 2018	s.v.	58.00	4.52	12.60	21.69	1.92	9.27	2.74	218	13.20
P109*	Junio 2018	26.4	101.70	2.53	11.53	22.22	2.16	16.02	7.25	292	14.70
P110*	Junio 2018	33.0	30.83	2.43	6.48	58.70	3.66	3.67	7.64	156	19.12
P111*	Junio 2018	39.0	13.67	1.89	0.10	106.44	7.26	2.36	19.33	208	13.93

■ Porcentaje de error > 5 %

■ Concentraciones que superan los límites establecidos por la NOM-127-SSA1-1994

* Aprovechamientos muestreados por la Lic. Andrea Billarent Cedillo como parte de su tesis de maestría titulada “Origen y flujo de aguas termales en sistemas geotérmicos de baja entalpía en los grábenes de Juchipila y Santiago Papasquiari: caracterización hidrogeoquímica e isotópica (C-O-H; He)”

5.3.2.1.1 Clasificación hidrogeoquímica del agua subterránea

A continuación, se presentan los diagramas de Piper y de Stiff en donde se clasifican las principales familias de agua subterránea que existen en el área de estudio con base en sus constituyentes mayoritarios.

En el diagrama de Piper (figura 5.8) se aprecian los siguientes grupos de familias: bicarbonatadas cálcicas, representada en su mayoría por aprovechamientos de temperatura normal, bicarbonatadas sódicas y sulfatadas sódicas representadas en su mayoría por aprovechamientos termales. En la mayoría de los aprovechamientos termales el catión dominante es el Na⁺, mientras que en los aprovechamientos de temperatura normal es el Ca⁺.

En cuanto a los aniones, se puede observar que la mayoría de los aprovechamientos presentan un enriquecimiento en bicarbonato sin importar su temperatura, a excepción de 4 pozos (3 termales y uno de temperatura normal) y 2 manantiales termales, en los cuales el anión predominante es el SO₄²⁻. Una característica común en todos los aprovechamientos es el bajo contenido en Cl⁻, siendo el aprovechamiento que presenta la mayor concentración un manantial termal con poco más de 80 mg/l.

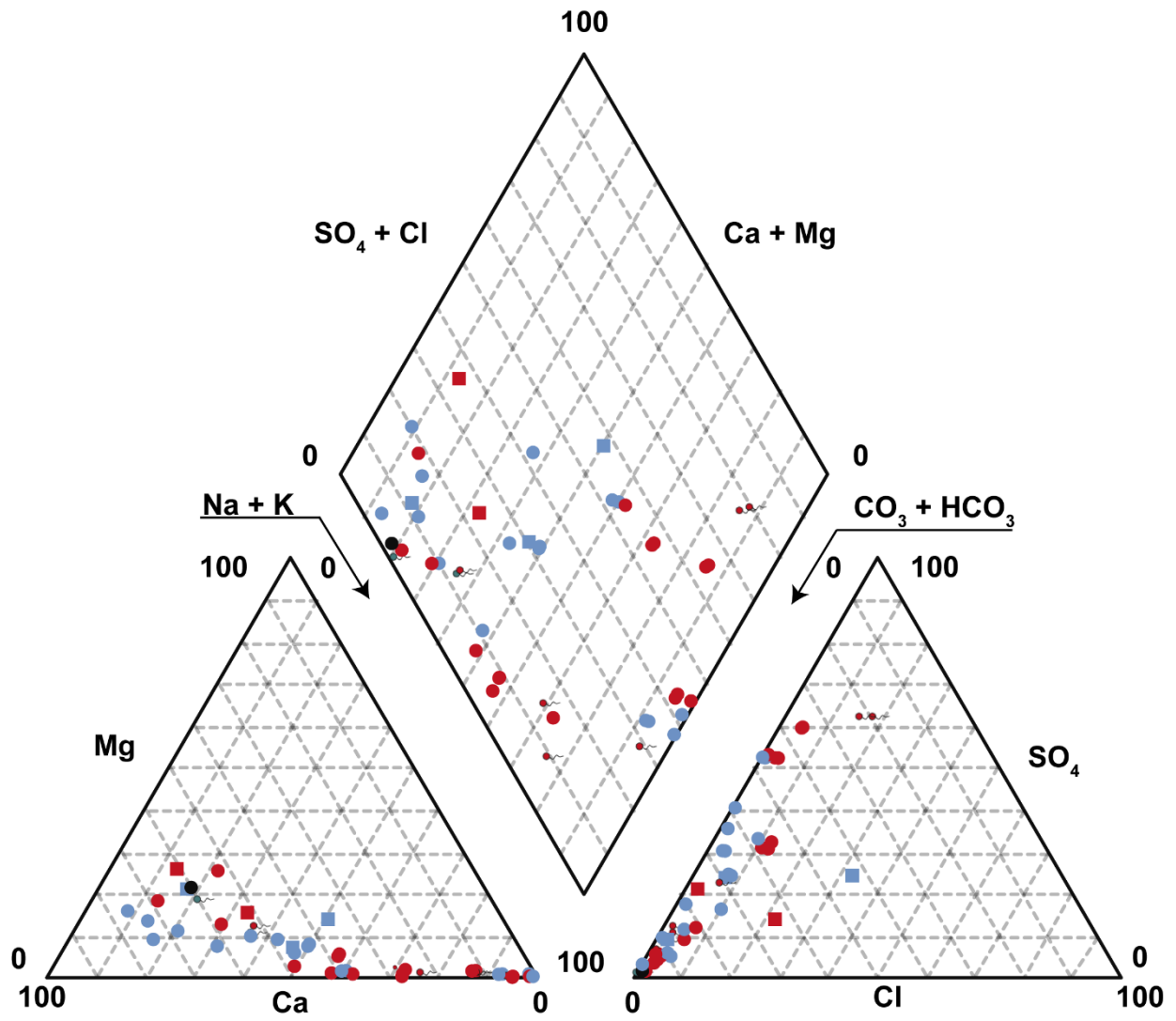


Figura 5.8. Diagrama de Piper de los aprovechamientos del área de estudio.

- Pozos con temperatura normal
 - Norias con temperatura normal
 - Manantiales con temperatura normal
- Pozos con temperatura termal
 - Norias con temperatura termal
 - Manantiales con temperatura termal
- Sin temperatura

La Figura 5.9 muestra el mapa en el que se encuentran los diagramas de Stiff generados a partir de los constituyentes mayoritarios de cada aprovechamiento. Como se puede apreciar en este mapa, en la zona noroeste del graben hacia el municipio de Villanueva, específicamente en los pozos P093 y P094 el agua es de tipo bicarbonatada cálcica, sin presentarse alguna distinción entre los aprovechamientos termales y de temperatura normal. Continuando ligeramente hacia el sur, en los municipios de Tabasco y la porción poniente de Huanusco el agua se vuelve más rica en sodio, aunque el calcio y el bicarbonato siguen predominando. Este enriquecimiento también ocurre sin importar la temperatura. Por otra parte, en el municipio de Calvillo ubicado en el noreste del graben el agua es de tipo bicarbonatada sódica, siendo el sodio el ion predominante. En esta zona todos los aprovechamientos son de tipo termal.

En la zona centro hacia el municipio de Jalpa, los aprovechamientos son principalmente de temperatura normal con tipo de agua bicarbonatada cálcica, a excepción del pozo P101, el cual, al igual que el pozo CNA-B-208 que es termal, el agua es bicarbonatada sódica. En municipio de Apozol se aprecia de manera clara que los aprovechamientos de temperatura normal son de tipo bicarbonatado cálcico, mientras que los termales son de tipo bicarbonatado sódico, a excepción del pozo P099, el cual es termal y está enriquecido en calcio.

En la zona sur, en el municipio de Juchipila los aprovechamientos son de temperatura normal. Sin embargo, el tipo de agua es variable. En la porción norte de este municipio el agua se empieza a enriquecer en sulfatos, pero el sodio continúa siendo el ion predominante, mientras que en la parte sur del municipio se aprecia un considerable incremento de calcio y magnesio. Finalmente, en el municipio de Moyahua de Estrada el agua se divide en dos tipos: bicarbonatada cálcica y sulfatada sódica. El primer tipo se presenta en pozos y norias de temperatura normal y termal, aunque es importante resaltar que el magnesio y los sulfatos están presentes en cantidades importantes. El segundo tipo se presenta en los manantiales de esa zona y en un par de pozos, todos de carácter termal. Estos aprovechamientos presentan una disminución considerable de magnesio, pero un aumento muy importante de sulfatos. Es importante mencionar que existe un ligero incremento de cloruros, que, aunque no sobresale como los demás iones, contrasta con los demás aprovechamientos de la zona de estudio. El

único pozo que se sale completamente de estas dos tendencias es el P060, el cual posee un incremento anómalo de sodio, bicarbonatos y sulfatos, y es de temperatura normal.

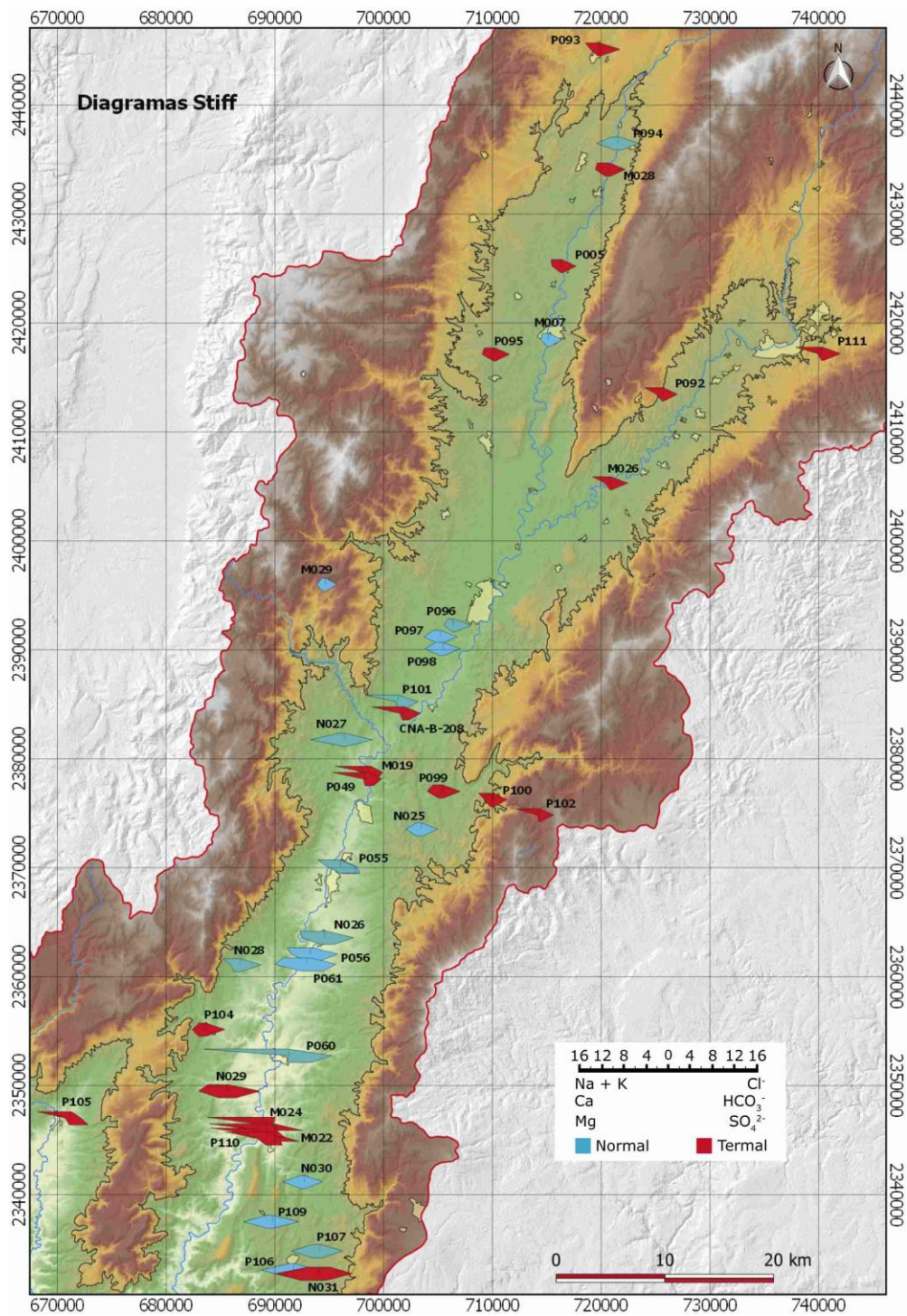


Figura 5.9. Mapa que muestra los diagramas de Stiff de cada aprovechamiento para los años de 2017 y 2018. Las unidades se presentan en meq/l.

5.3.2.1.2 Correlación entre constituyentes mayoritarios y parámetros fisicoquímicos

Se obtuvieron los coeficientes de correlación que engloban las concentraciones de los constituyentes mayoritarios (Ca^+ , K^+ , Mg^{2+} , Na^+ , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} y HCO_3^-) y los parámetros fisicoquímicos (temperatura, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales, pH y Eh). Estos resultados se presentan en dos matrices de correlación: una para los aprovechamientos de temperatura normal y otra para los aprovechamientos termales.

En la matriz de correlación de los aprovechamientos de temperatura normal (Tabla 5 a)), se puede apreciar que los constituyentes que están relacionados con la temperatura son el sodio y los sulfatos, ambos presentando coeficientes de 0.5. El sodio a su vez se relaciona de manera positiva con la conductividad eléctrica, los sólidos disueltos totales y el pH, con coeficientes de 0.9, 0.9 y 0.5, respectivamente; y de manera negativa con el Eh, con un coeficiente de -0.5. Por su parte, los sulfatos están relacionados positivamente con la conductividad eléctrica, los sólidos disueltos totales y el sodio, con coeficientes de 0.8 en todos los casos. La conductividad eléctrica y los sólidos disueltos totales se relacionan también con los bicarbonatos, con un coeficiente de 0.9; el Eh se relaciona con el sodio de manera negativa con -0.5 de coeficiente, y el pH se relaciona de positivamente con el sodio, con un coeficiente de 0.9, mientras que el calcio, magnesio y nitratos la relación es negativa, con coeficientes de -0.7, -0.5 y -0.6, respectivamente.

En cuanto a la matriz de correlación de los aprovechamientos termales (Tabla 5 b)), los constituyentes y parámetros relacionados con la temperatura son la conductividad eléctrica y los sólidos disueltos totales, el sodio, el cloro y los sulfatos, con coeficientes de 0.6, 0.6, 0.8, 0.6 y 0.6, respectivamente. La conductividad eléctrica y los sólidos disueltos totales se relacionan positivamente con el sodio, cloro y sulfatos, con coeficientes de 0.7, 0.8 y 0.8; y el pH presenta únicamente relaciones negativas con el calcio, potasio y nitratos, con coeficientes de -0.6, -0.5 y -0.5.

Las dos matrices dejan ver que el sodio y los sulfatos son los constituyentes mayoritarios que dependen de los cambios de temperatura en el agua. La conductividad eléctrica y los sólidos disueltos totales presentan entre ellos un coeficiente de correlación de 1, por lo que se

comportan de la misma manera. Estos parámetros varían con la temperatura únicamente en el agua termal.

Tabla 5. Matrices de correlación de los constituyentes mayoritarios y los parámetros fisicoquímicos medidos en los aprovechamientos de temperatura normal (a) y termal (b).

	T	CE	SDT	Eh	pH	Ca	K	Mg	Na	Cl	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
T	1												
CE	0.4	1											
SDT	0.4	1.0	1										
Eh	-0.2	-0.4	-0.4	1									
pH	0.3	0.2	0.2	-0.1	1								
Ca	-0.1	0.0	0.0	0.3	-0.7	1							
K	0.1	0.0	0.0	0.1	-0.3	0.2	1						
Mg	-0.3	-0.1	-0.1	0.1	-0.5	0.7	0.0	1					
Na	0.5	0.9	0.9	-0.5	0.5	-0.4	0.0	-0.4	1				
Cl-	0.0	0.3	0.4	-0.1	-0.4	0.4	0.5	0.3	0.2	1			
NO ₃ ⁻	-0.2	0.1	0.1	-0.1	-0.6	0.6	0.1	0.8	-0.3	0.4	1		
SO ₄ ²⁻	0.5	0.8	0.8	-0.3	0.4	-0.2	0.2	-0.3	0.8	0.3	-0.2	1	
HCO ₃ ⁻	0.3	0.9	0.9	-0.4	-0.1	0.2	0.0	0.1	0.7	0.4	0.2	0.5	1

a)

b)

	T	CE	SDT	Eh	pH	Ca	K	Mg	Na	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
T	1.0												
CE	0.6	1											
SDT	0.6	1.0	1										
Eh	0.0	-0.2	-0.2	1									
pH	-0.1	-0.3	-0.3	-0.4	1								
Ca	-0.2	0.3	0.3	0.2	-0.6	1							
K	-0.4	0.1	0.1	0.0	-0.5	0.6	1						
Mg	-0.3	0.2	0.2	0.1	-0.4	0.9	0.4	1					
Na	0.8	0.7	0.7	-0.3	0.1	-0.4	-0.4	-0.4	1				
Cl ⁻	0.6	0.8	0.8	-0.3	-0.1	0.2	0.1	0.3	0.6	1			
NO ₃ ⁻	-0.3	0.2	0.2	0.0	-0.5	0.9	0.5	0.9	-0.4	0.3	1		
SO ₄ ²⁻	0.6	0.8	0.8	-0.4	-0.1	-0.1	0.0	-0.1	0.8	0.8	-0.1	1	
HCO ₃ ⁻	0.2	0.3	0.3	0.3	-0.4	0.6	0.2	0.5	-0.1	0.0	0.5	-0.3	1

■ Buena correlación positiva
 ■ Buena correlación negativa

5.3.2.2 Constituyentes minoritarios y traza

En la tabla 6 se muestran las concentraciones en [mg/l] de los constituyentes minoritarios y traza comunes en el agua subterránea termal medidos en la zona de estudio. Se tomaron en cuenta únicamente los análisis que presentan un porcentaje de error menor al 15%, lo cual da un total de 40 aprovechamientos.

Los componentes que sobrepasan los límites establecidos por la NOM-127-SSA1-1994 son el arsénico (límite= 0.05 mg/l), el hierro (límite= 0.30 mg/l) y los fluoruros (límite= 1.50 mg/l). El litio y el azufre no se encuentran especificados dentro de esta norma ni dentro de los estándares de otras organizaciones como la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) o la Organización Mundial de la Salud (WHO), por lo que no fue posible establecer un punto de comparación para estos elementos.

En el caso del arsénico, casi la mitad de los aprovechamientos de la zona sobrepasan el límite permitido, algunos de éstos difieren por una orden de magnitud. El hierro se presenta en concentraciones permisibles en la zona de estudio, salvo el manantial M022, con 0.349 mg/l. Finalmente, los fluoruros se presentan en concentraciones superiores a las permitidas en poco más de la mitad de los aprovechamientos.

Tabla 6. Concentraciones en [mg/l] de los constituyentes minoritarios y traza.

Clave	Fecha	T [°C]	As	Fe	Li	S	F
CNA-B-208	Junio 2018	39.8	0.076	0.008	0.420	18.57	8.31
M007	Junio 2018	26.2	<l.c.	0.017	0.021	3.49	1.13
M019	Junio 2017	43	0.063	0.022	0.339	29.20	12.14
M022	Junio 2017	47.1	0.203	0.349	0.781	119.80	11.48
M024	Junio 2017	61.	0.169	0.023	0.812	116.60	13.14
M026*	Junio 2018	38.3	<l.c.	<l.c.	0.170	4.33	2.54
M027*	Junio 2018	58.3	0.032	<l.c.	1.074	16.40	5.11
M028*	Junio 2018	30.3	<l.c.	0.055	0.014	6.74	1.11
M029*	Junio 2018	22.4	<l.c.	0.031	0.008	0.25	0.19
N025*	Junio 2018	25.1	<l.c.	<l.c.	0.014	5.06	0.28
N026*	Junio 2018	28.6	0.065	<l.c.	0.191	28.98	2.63
N027*	Junio 2018	27.8	0.082	0.004	0.041	5.25	1.16
N029*	Junio 2018	31.8	0.038	0.004	0.186	25.05	2.00
N031*	Junio 2018	31	0.024	<l.c.	0.140	22.11	0.26
P005	Junio 2018	33	<l.c.	0.002	0.098	2.64	1.75
P027	Junio 2018	30.6	0.045	<l.c.	0.219	1.63	3.70
P028	Junio 2018	30.7	0.101	0.012	0.430	54.07	8.06
P034	Junio 2018	28.4	<l.c.	<l.c.	0.138	1.68	1.00
P049	Junio 2018	45.6	0.059	<l.c.	0.360	27.36	12.50
P053	Junio 2018	31.5	0.089	<l.c.	0.241	24.07	11.70
P055	Junio 2017	28.1	0.052	0.028	0.467	62.85	5.11
P056	Junio 2017	26.2	0.037	0.023	0.159	32.82	2.83
P060	Junio 2018	29.5	0.266	0.039	0.486	80.74	19.34
P061	Junio 2018	26.3	0.049	<l.c.	0.229	49.38	1.97
P081	Junio 2018	24.4	0.027	<l.c.	0.138	12.19	1.28
P092*	Junio 2018	34.9	<l.c.	0.002	0.167	5.90	3.20
P093*	Junio 2018	30.9	<l.c.	<l.c.	0.126	4.27	1.49
P094*	Junio 2018	27.6	<l.c.	<l.c.	0.027	9.59	0.53
P096*	Junio 2018	27.4	<l.c.	<l.c.	0.030	2.26	0.85
P098*	Junio 2018	26.1	<l.c.	0.002	0.037	5.68	0.43
P099*	Junio 2018	30.7	<l.c.	<l.c.	0.053	3.64	0.59
P101*	Junio 2018	29.5	<l.c.	<l.c.	0.503	26.69	3.85
P103*	Junio 2018	29.5	0.046	0.015	0.483	54.93	3.37
P104*	Junio 2018	32.1	<l.c.	0.019	0.029	0.94	0.26
P105*	Junio 2018	36.4	0.213	0.053	0.360	63.09	8.30
P106*	Junio 2018	25.2	<l.c.	<l.c.	0.072	15.03	0.18
P107*	Junio 2018	29.7	<l.c.	<l.c.	0.130	9.44	0.42
P108*	Junio 2018	s.v.	<l.c.	<l.c.	0.027	0.92	0.09
P109*	Junio 2018	26.4	0.022	<l.c.	0.101	2.70	0.40
P111*	Junio 2018	39	<l.c.	<l.c.	0.182	6.55	3.05

■ Concentraciones que superan los límites establecidos por la NOM-127-SSA1-1994
s.v. Sin valor

* Aprovechamientos muestreados por la Lic. Andrea Billarent Cedillo como parte de su tesis de maestría titulada “Origen y flujo de aguas termales en sistemas geotérmicos de baja entalpía en los grábenes de Juchipila y Santiago Papasquiaro: caracterización hidrogeoquímica e isotópica (C-O-H; He)”.

5.3.2.2.1 Distribución

Arsénico

Como se puede apreciar en la Figura 5.10, las zonas que presentan concentraciones por debajo del límite establecido son la zona norte desde Villanueva y Calvillo hasta el límite entre Jalpa y Apozol, la zona sureste en el municipio de Moyahua de Estrada y el límite suroeste entre Juchipila y Moyahua de Estrada. En la zona norte el P027 y P028 son los únicos con concentraciones superiores al límite, en donde superan los 0.04 mg/l y 0.08 mg/l, con 30.6 °C y 30.7 °C, respectivamente.

La zona centro sur, conformada por el municipio de Apozol, Juchipila y Moyahua de Estrada, presenta los valores más altos de este elemento, principalmente en donde se concentran los manantiales termales, en donde el arsénico alcanza hasta 0.2 mg/l. Las norias y pozos de temperatura normal, aunque muestran valores por encima de la norma, la gran mayoría está por debajo de 0.04 mg/l, a excepción del P060, el cual es de temperatura normal y posee el valor más alto de arsénico en toda la zona de estudio, con 0.266 mg/l.

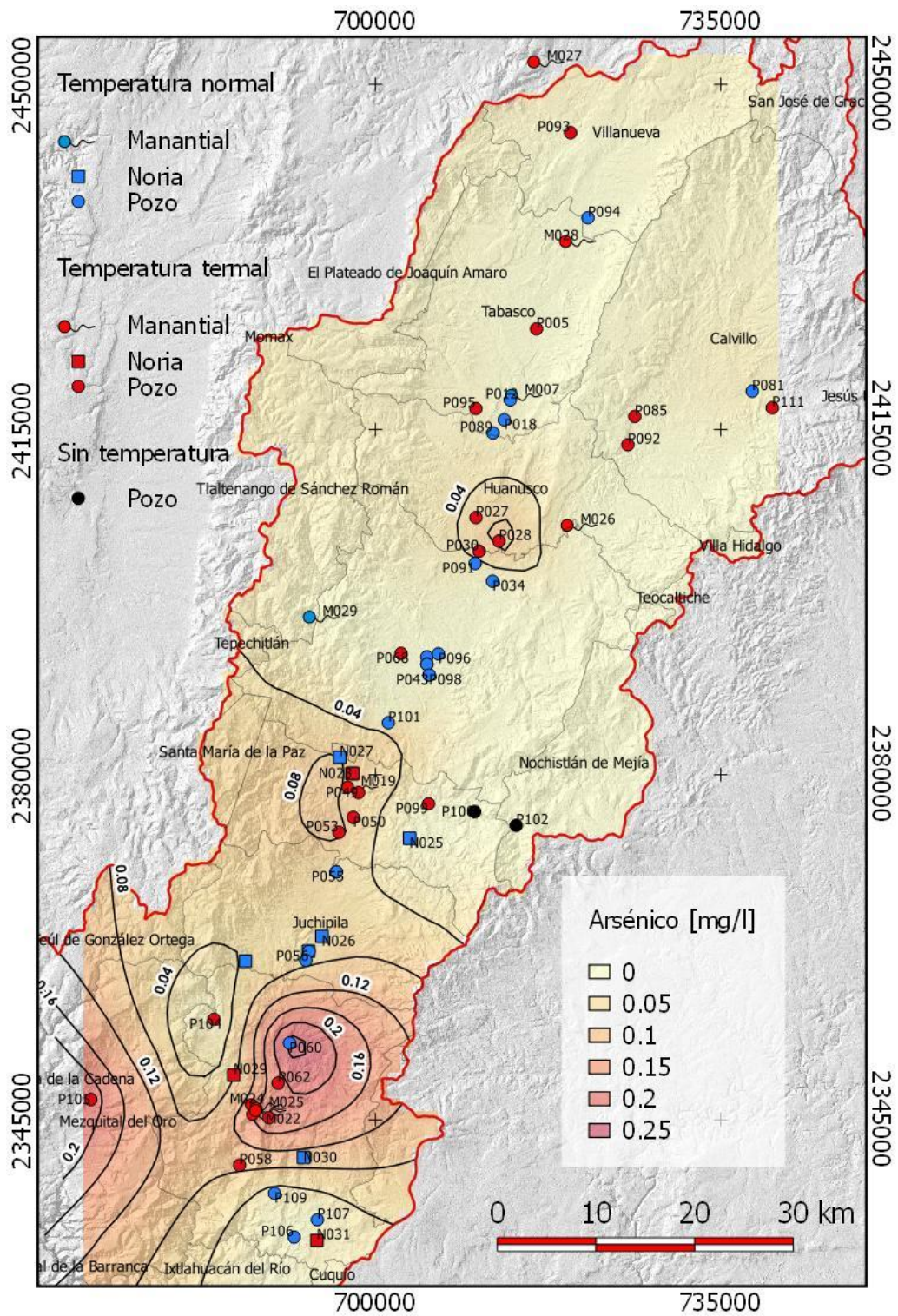


Figura 5.10. Mapa que muestra las concentraciones de arsénico en los aprovechamientos muestreados en la zona de estudio.

Hierro

La Figura 5.11 deja ver que la mayor parte del área de estudio presenta valores inferiores a 0.02 [mg/l], llegando incluso hasta valores no detectables principalmente en el extremo norte y la parte oriente. Sin embargo, se encuentra el manantial M028, ubicado en el municipio de Tabasco, con un valor superior a los 0.04 mg/l y 30.3°C, el manantial M029, ubicado al poniente de Jalpa, con poco más de 0.02 mg/l y 22.4 °C, y el P055, ubicado entre Apozol y Juchipila, con 0.028 mg/l y 28.1°C.

A pesar de estas ligeras variaciones en los valores en esta zona, ninguno de estos aprovechamientos excede el límite permisible. Sin embargo, es hasta la zona sur, en el municipio de Moyahua de Estrada, en el área donde se concentran los manantiales termales que los valores comienzan a incrementar hasta sobrepasar el límite. La concentración máxima de hierro ocurre en el manantial M022, el cual tiene una temperatura de 47.1°C y 0.349mg/l.

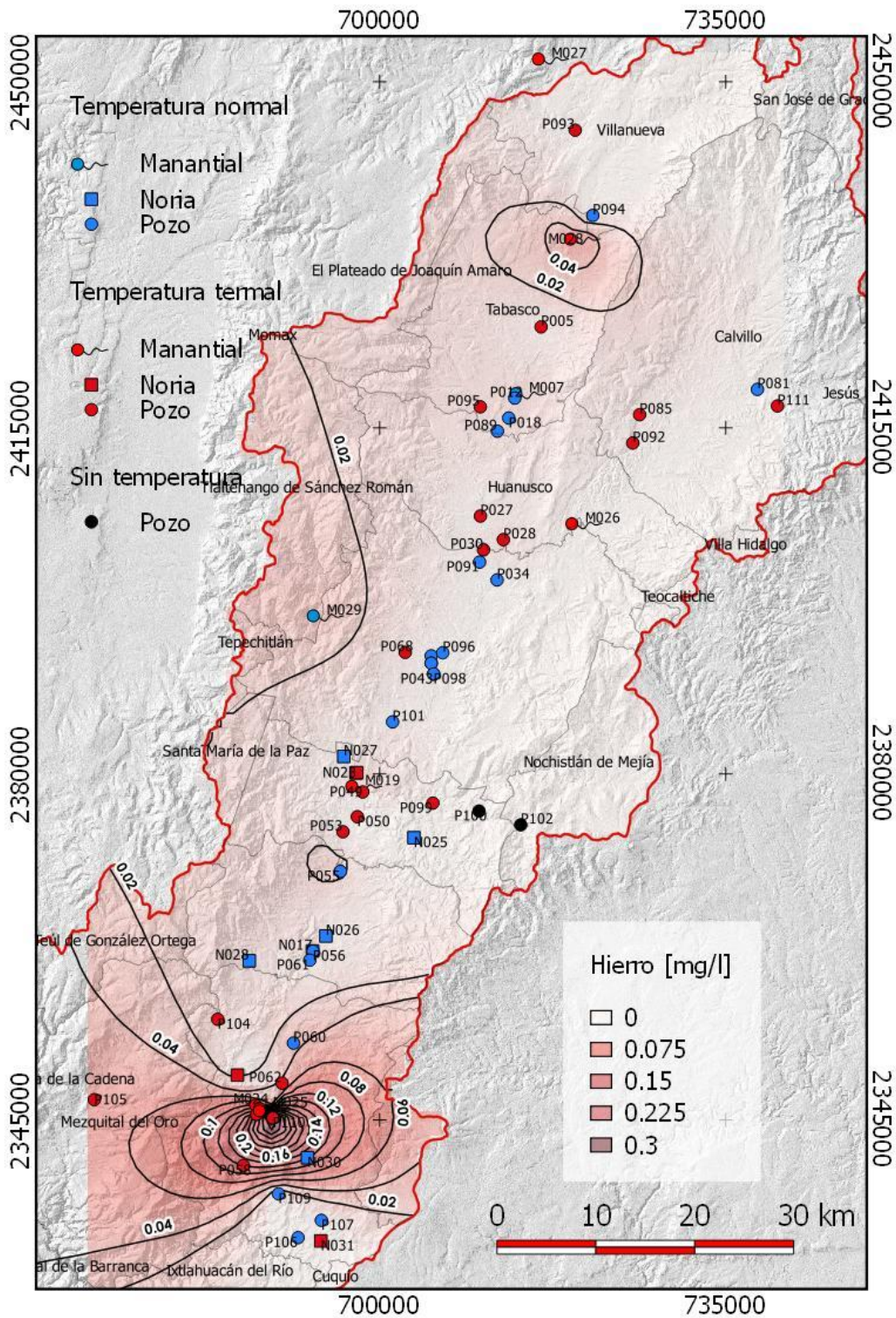


Figura 5.11. Mapa que muestra las concentraciones de hierro en los aprovechamientos muestreados en la zona de estudio.

Litio

Este elemento difiere un poco en su comportamiento del arsénico y el hierro, ya que como se muestra en la figura 5.12, en la parte norte y en la parte sur del graben se encuentran las concentraciones más altas. En el norte, en el municipio de Villanueva, el manantial termal M027 presenta la concentración máxima medida de 1.074 [mg/l] y una temperatura de 58.3[°C]. Hacia el sur los valores comienzan a disminuir por debajo de los 0.2 [mg/l], a excepción de la zona centro del municipio de Huanusco, en donde hay una concentración de aprovechamientos termales que presentan valores por arriba de los 0.2 [mg/l].

En la zona centro y sur del graben, los valores de litio comienzan a aumentar, principalmente en el área en donde se concentran los manantiales termales, hasta llegar a concentraciones superiores a los 0.8 [mg/l].

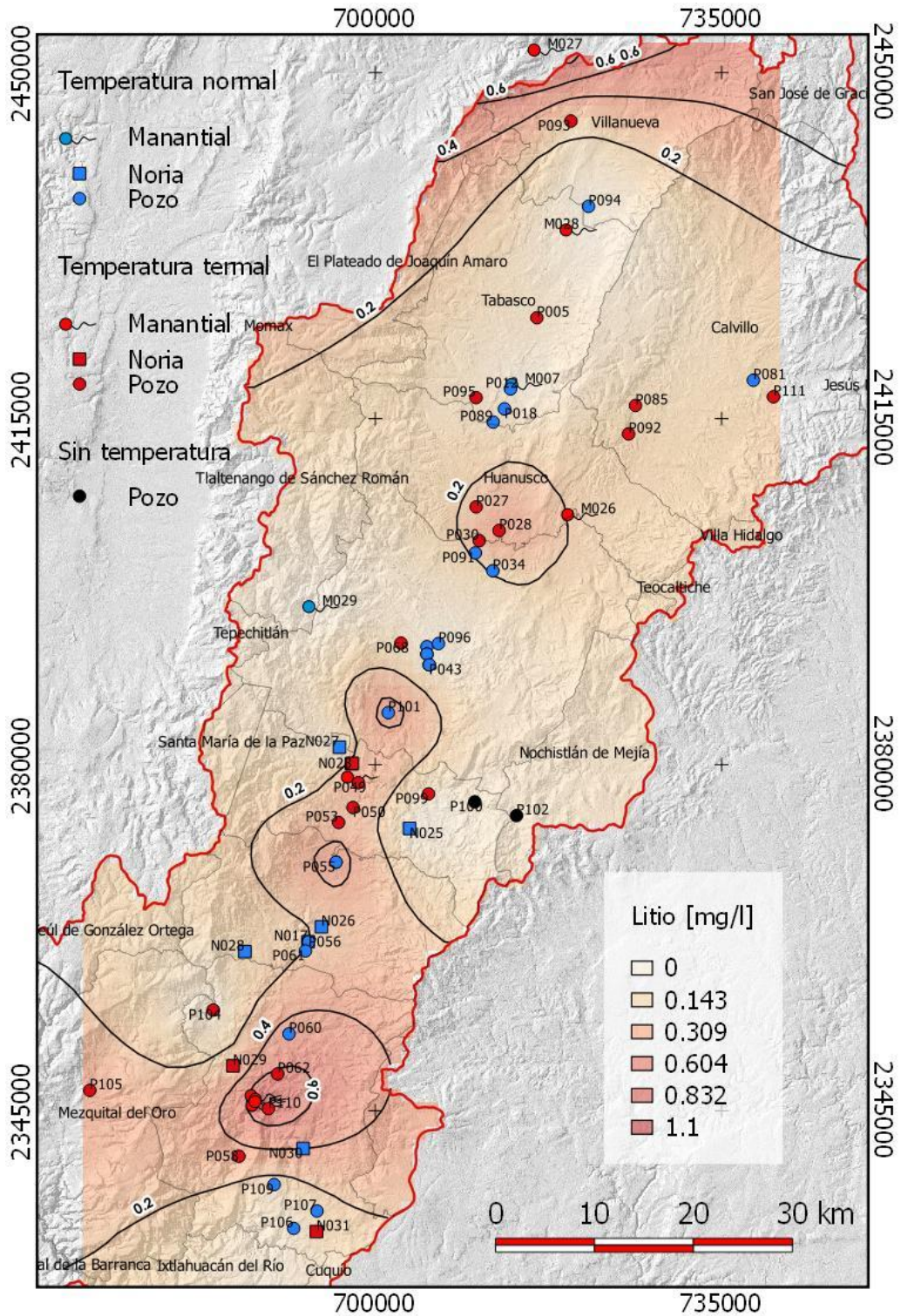


Figura 5.12. Mapa que muestra las concentraciones de litio en los aprovechamientos muestreados en la zona de estudio.

Azufre

El azufre se presenta en concentraciones mucho más elevadas que los demás elementos, con varias órdenes de magnitud de diferencia. Sin embargo, su comportamiento es muy similar a éstos. En la figura 5.13 se aprecia que las concentraciones menores están ubicadas en el norte y parte del centro del graben, con menos de 30 [mg/l], a excepción del P028, el cual presenta 54.07[mg/l] y 30.7[°C].

A partir del municipio de Juchipila, ubicado en la zona sur, las concentraciones de azufre comienzan a incrementar significativamente, especialmente en el municipio de Moyahua de Estrada en la zona en donde se concentran los manantiales termales, llegando a su valor máximo en el manantial M022, con 119.8[mg/l] y 47.15[°C].

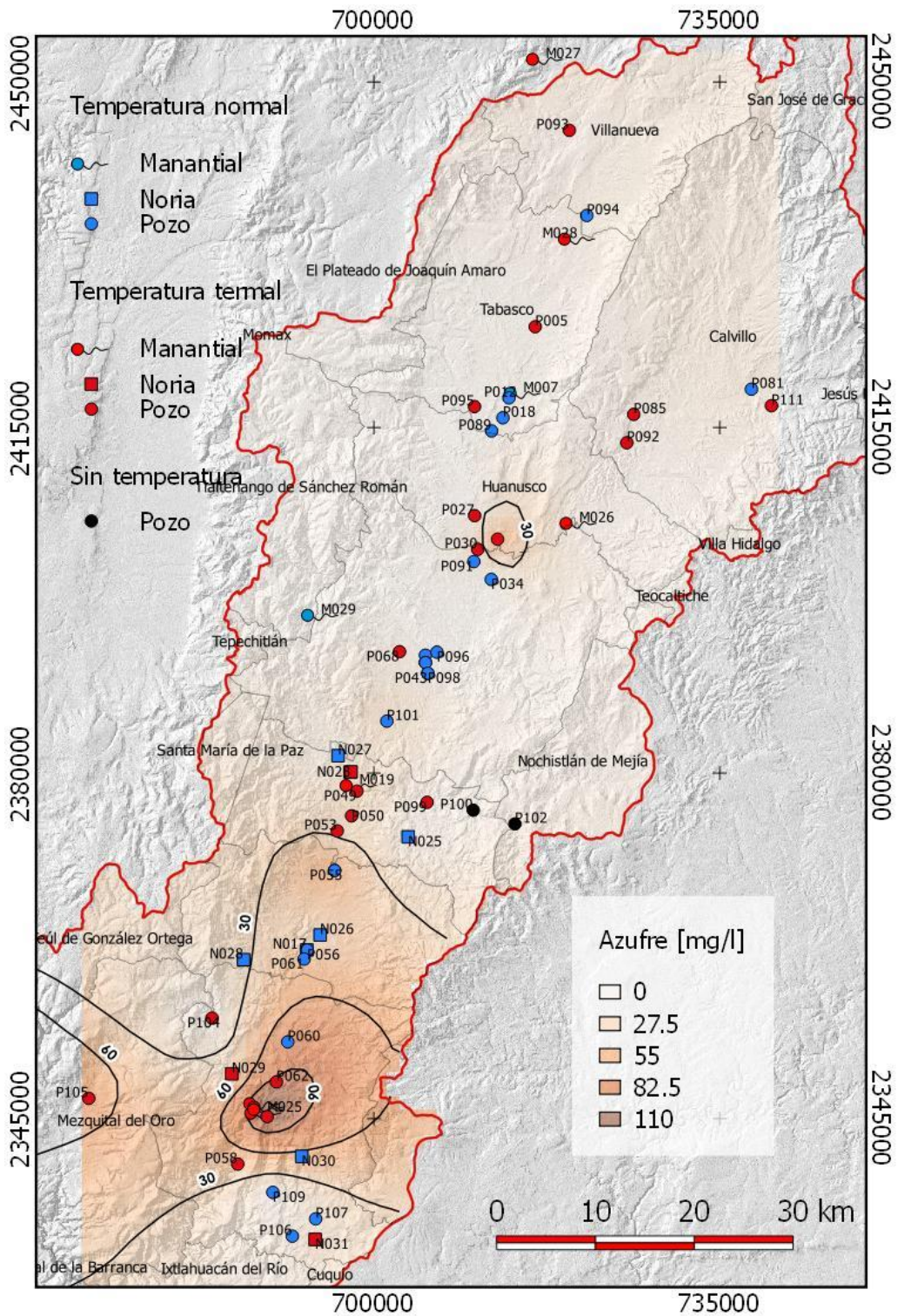


Figura 5.13 Mapa que muestra la distribución de las concentraciones de azufre en los aprovechamientos muestreados en la zona de estudio.

Fluoruros

Como se mencionó anteriormente, los fluoruros sobrepasan el límite permisible en la mayor parte de la zona de estudio. Los aprovechamientos que están por debajo de éste se distribuyen en la zona norte y sureste, y la mayoría son de temperatura normal.

Existen tres zonas que presentan los valores más altos (figura 5.14): la primera está ubicada en el municipio de Huanusco, compuesta por pozos de temperatura termal. Éstos presentan concentraciones que superan los 6[mg/l], en donde la máxima ocurre en el pozo P028, con 8.06[mg/l] y 30.7[°C].

La segunda zona se encuentra en el centro del graben, en el municipio de Apozol. Las concentraciones que están por arriba de 3[mg/l] se presentan en norias y pozos de temperatura normal, mientras que las concentraciones que están por arriba de los 6[mg/l] se presentan en norias y pozos termales.

La tercera zona se ubica en el sur, en el municipio de Moyahua de Estrada, ahí se presentan las concentraciones más altas, principalmente en los aprovechamientos termales, sin embargo, el valor más alto medido en esta zona se encuentra en el pozo P060, de temperatura normal, con 19.34[mg/l] y 29.5[°C].

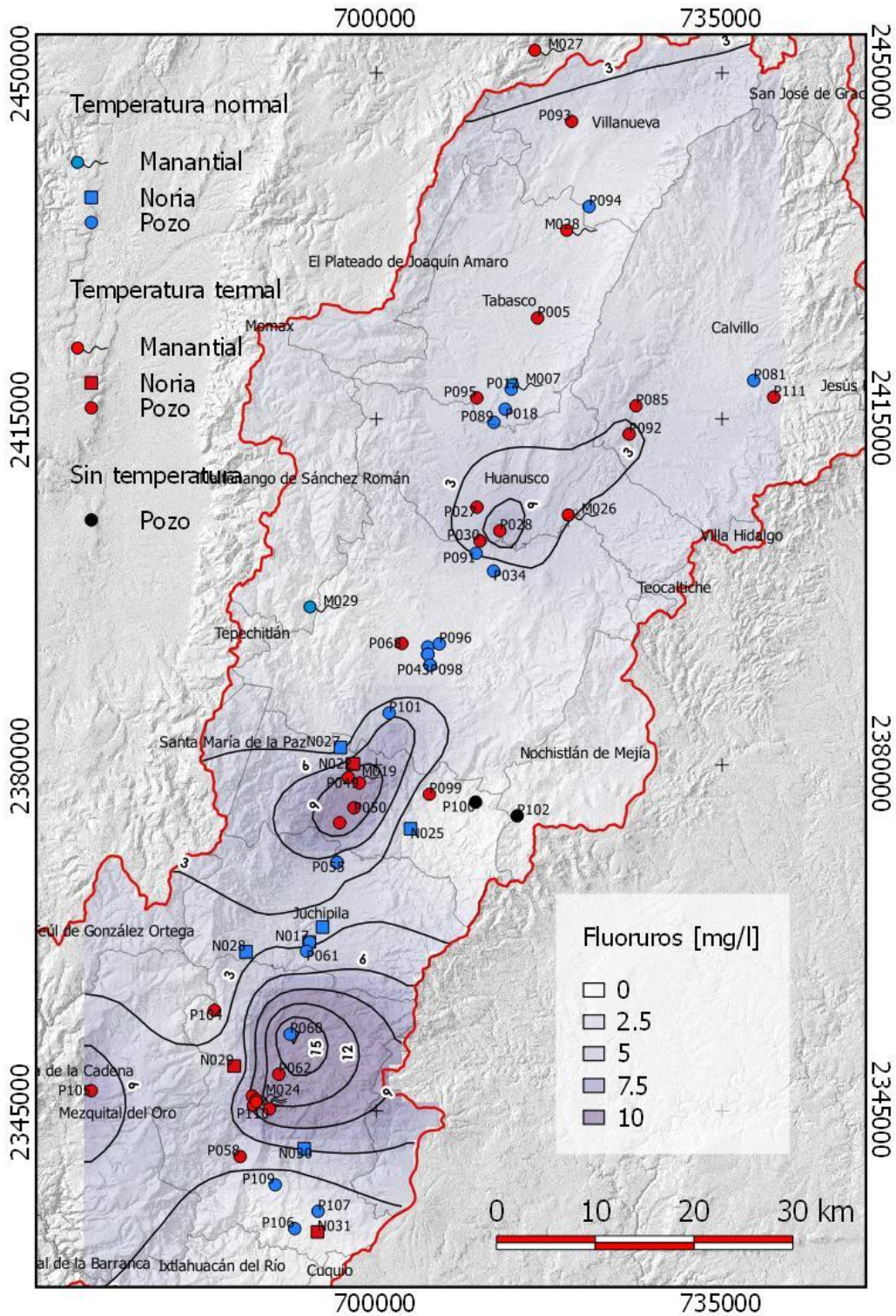


Figura 5.14. Mapa que muestra la distribución de las concentraciones de fluoruros en los aprovechamientos muestreados en la zona de estudio.

5.3.2.2.2 Correlación entre los constituyentes minoritarios y traza y los parámetros fisicoquímicos

Se obtuvieron los coeficientes de correlación que engloban las concentraciones de los constituyentes minoritarios (As, Fe, Li, Na, S y F⁻) y los parámetros fisicoquímicos (temperatura, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales, pH y Eh).

En la matriz de correlación para los aprovechamientos de temperatura normal (tabla 7 a)), se aprecia que los constituyentes relacionados con la temperatura son el litio y el azufre, con coeficientes de 0.6 y 0.5, respectivamente. La conductividad eléctrica y los sólidos disueltos totales se comportan de la misma manera y se relacionan de forma positiva con la mayoría de los constituyentes: el arsénico, el litio, el azufre y los fluoruros, con coeficientes de 0.9, 0.6, 0.8 y 0.8. El Eh se relaciona de manera negativa con el arsénico y los fluoruros, con un coeficiente de -0.5 para ambos. Por su parte, el pH se relaciona de manera positiva con el hierro, el litio y los fluoruros, todos con coeficiente de 0.5.

En cuanto a la matriz de correlación de los aprovechamientos termales (tabla 7 b)), la conductividad eléctrica y los sólidos disueltos totales se comportan de la misma manera al haber entre ellos un coeficiente de correlación de 1, ambos presentan una correlación positiva con la temperatura, con un coeficiente de 0.6, y con todos los constituyentes. El litio, el azufre y los fluoruros se relacionan de manera positiva con la temperatura, con coeficientes de 0.9, 0.6 y 0.6. El Eh se relaciona de manera negativa con el arsénico y los fluoruros, los dos con coeficiente de -0.6; y el pH sólo se relaciona positivamente con los fluoruros, con un coeficiente de 0.5.

En ambos casos se puede apreciar que tanto en aprovechamientos de temperatura normal o termal el litio, el azufre y los fluoruros están ligados a las variaciones de la temperatura del agua. La conductividad eléctrica y los sólidos disueltos totales poseen el mismo comportamiento tanto en el agua normal como en la termal y, por lo tanto, los elementos ligados a estos parámetros son los mismos para cada caso. Sin embargo, sólo en los aprovechamientos termales se aprecia que su comportamiento está relacionado con los cambios de temperatura en el agua.

Tabla 7. Matrices de correlación de los constituyentes minoritarios y los parámetros fisicoquímicos medidos en los aprovechamientos de temperatura normal (a) y termal (b).

	T	CE	SDT	Eh	pH	As	Fe	Li	S	F ⁻
T	1									
CE	0.4	1								
SDT	0.4	1.0	1							
Eh	-0.2	-0.4	-0.4	1						
pH	0.3	0.2	0.2	-0.1	1					
As	0.4	0.9	0.9	-0.5	0.3	1				
Fe	0.0	0.4	0.4	-0.2	0.5	0.6	1			
Li	0.6	0.6	0.6	-0.3	0.5	0.5	0.4	1		
S	0.5	0.8	0.8	-0.3	0.4	0.7	0.6	0.9	1	
F ⁻	0.4	0.8	0.8	-0.5	0.5	0.9	0.7	0.7	0.8	1

a)

b)

	T	CE	SDT	Eh	pH	As	Fe	Li	S	F ⁻
T	1									
CE	0.6	1								
SDT	0.6	1.0	1							
Eh	0.0	-0.2	-0.2	1						
pH	-0.1	-0.3	-0.3	-0.4	1					
As	0.4	0.6	0.6	-0.6	0.2	1				
Fe	0.2	0.6	0.6	-0.1	0	0.6	1			
Li	0.9	0.7	0.8	-0.1	-0.2	0.6	0.4	1		
S	0.6	0.7	0.9	-0.4	0	0.9	0.7	0.7	1	
F ⁻	0.6	0.5	0.5	-0.6	0.5	0.7	0.3	0.6	0.7	1

■ Buena correlación positiva
 ■ Buena correlación negativa

6. Discusión de los resultados

Con la finalidad de comprender los procesos hidrogeoquímicos en el acuífero asociados al termalismo, es importante indicar que la recarga se lleva a cabo de dos maneras: la primera es a través de los sistemas de fallas y fracturas localizados en las ignimbritas que conforman los hombros del graben, por las cuales se infiltra el agua procedente de la precipitación y viaja a diferentes profundidades tanto como el medio lo permita, hasta llegar al centro del graben, en donde adquiere una composición bicarbonatada sódica y es calentada debido a los procesos de decaimiento radiactivo de los elementos K, U y Th presentes en estas rocas. El semiconfinamiento que ocurre en algunas zonas del acuífero debido a la presencia de estratos de baja permeabilidad, junto con el aumento de la temperatura, promueven el ascenso del agua subterránea almacenada en esta unidad a través de las fallas y fracturas hasta alcanzar la superficie en forma de manantiales termales. También es posible captar estas aguas a través de los pozos y norias que se encuentran distribuidos a lo largo del graben.

La segunda forma ocurre en el relleno sedimentario, en donde se infiltra el agua meteórica y la procedente de retornos por riego de las actividades agrícolas. El agua infiltrada en este medio adquiere un movimiento horizontal al alcanzar la zona saturada. En esta unidad también existen zonas que presentan semiconfinamiento debido a la presencia de estratos de baja permeabilidad. Dependiendo del espacio transitado y del tiempo que tardan en circular estos flujos es como adquieren una composición bicarbonatada cálcica. La descarga de esta unidad ocurre a través de manantiales, pozos y norias que presentan temperatura normal y mezclas con agua procedente de la unidad fracturada.

El área de estudio se encuentra en una zona en donde el último registro de actividad volcánica data del Mioceno, por lo que las posibilidades de que la generación de calor se derive de esta actividad son muy bajas. Por otro lado, el Graben de Juchipila presenta dos características muy importantes: 1) Se encuentra en una zona que ha sufrido deformación extensional desde el Mioceno Temprano, y 2) los grandes volúmenes de rocas ignimbríticas expulsados a lo largo de toda la Sierra Madre Occidental contienen elementos radiactivos como U, Th y K. Webber et al., (1994) menciona que las ignimbritas del Graben de Juchipila son de

composición riolítica, y reporta en ellas concentraciones importantes de estos elementos. Es posible que la combinación de estas dos características explique el termalismo registrado en el acuífero, pues como se mencionó anteriormente, se ha registrado que el decaimiento de elementos radiactivos en rocas volcánicas como granitos, riolitas e ignimbritas es capaz de generar calor suficiente para calentar el agua subterránea. Ejemplos de este fenómeno son el acuífero de Juventino Rosas, en Guanajuato, el cual se aloja en riolitas, ignimbritas y sedimentos aluviales, lacustres y volcánicos, y presenta temperaturas de hasta 50°C (Morales- Arredondo et al., 2016); y las rocas graníticas de la cuenca de Cooper, Australia, en donde se alcanzan temperaturas de hasta 200°C a profundidades de 3 a 5 km (Boden, 2017). Por otro lado, la presencia de fallas y fracturas en las ignimbritas facilita el ascenso y la circulación de los fluidos termales hacia profundidades someras, y su posterior captación.

Las anomalías de temperatura se concentran en tres zonas principalmente: norte, centro y sur del Graben, esto coincide con lo mencionado por CONAGUA (2005), en donde se señala que los aprovechamientos que captan el agua de la unidad fracturada (ignimbritas) están localizados principalmente en el extremo norte del Graben, en los municipios de Villanueva y Tabasco, en el centro, en el municipio de Juchipila y en el extremo sur, en el municipio de Moyahua; todos estos con profundidades a partir de los 150 metros.

Las dos familias principales de agua subterránea que existen en el acuífero son: la familia bicarbonatada cálcica, a la cual pertenecen la mayoría de los aprovechamientos de temperatura normal y la familia bicarbonatada sódica, en la cual se encuentran la mayoría de los aprovechamientos termales. Sin embargo, existen aprovechamientos de temperatura normal que pertenecen a la familia de agua bicarbonatada sódica, los cuales alcanzan temperaturas de hasta 29.5 °C. El hecho de que estas temperaturas se encuentren muy cerca del termalismo y que dominen los iones mayoritarios característicos de los aprovechamientos termales, podría indicar una mezcla del agua subterránea proveniente de las dos unidades que conforman al acuífero. La misma situación ocurre con los aprovechamientos termales de tipo bicarbonatado cálcico. Éstos presentan temperaturas no superiores a los 31 °C, que, aunque ya son consideradas como termales, poseen iones mayoritarios característicos de los aprovechamientos de temperatura normal. Esto también podría indicar una posible mezcla del agua subterránea proveniente de las dos unidades hidrogeológicas.

Conforme la temperatura del agua subterránea se incrementa, se favorece la disolución de los minerales contenidos en las rocas y se incrementa la concentración de iones en solución, en particular del Na^+ , As , F^- , Fe y Li . Los constituyentes mayores que se encuentran disueltos en el agua subterránea y presentan coeficientes de correlación positivos con la conductividad eléctrica y los sólidos disueltos totales son el Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} y HCO_3^- . De estos iones, aquellos cuya concentración depende de la temperatura son el Na^+ , Cl^- y SO_4^{2-} . Debido a que no presentan concentraciones sobresalientes, la presencia de los cloruros puede estar ligada a las infiltraciones del agua de riego y en las fugas en la red de agua potable en zonas urbanas (CONAGUA, 2005). Las bajas concentraciones de Cl^- y SO_4^{2-} sugieren una ausencia de actividad volcánica (Armienta et al., 2014). El sodio y los sulfatos se encuentran presentes en ambas unidades, aunque la dependencia con los cambios de temperatura se incrementa en los aprovechamientos termales. El origen del Na^+ puede estar relacionado con la interacción del agua termal con la unidad fracturada y en menor medida con la granular, pues las ignimbritas están compuestas principalmente por feldespatos ricos en este elemento (sanidina, oligoclasa, andesina y anortoclasa) como reporta Webber et al. (1994); mientras que las areniscas y limolitas de la Formación Juchipila contienen fragmentos de sanidina y fragmentos volcánicos félsicos (Lahiere, 1982). La disolución del feldespato sódico libera Na^+ , OH^- , HCO_3^- y ácido silícico (H_4SiO_4) lo cual contribuye a la alcalinidad y el incremento del pH en el agua subterránea (Morales, Villanueva- Estrada, Rodríguez & Armienta, 2015).

Los nitratos sobrepasan el límite permisible en algunos aprovechamientos, sin embargo, no muestran relación con la temperatura, pues estos incrementos se presentan en aprovechamientos de temperaturas normales y termales. Es posible que éstos tengan un origen antropogénico como menciona CONAGUA (2005), dado que las principales actividades económicas de la región son la agricultura y la ganadería.

La relación de los bicarbonatos con los sólidos disueltos totales y la conductividad eléctrica se hace presente únicamente en los aprovechamientos de temperatura normal, sin embargo, los dos tipos principales de agua subterránea en el acuífero son de tipo bicarbonatado. Si bien las calizas son las principales aportadoras de Ca^+ y HCO_3^- , un fuerte indicador de la interacción de la roca con aguas termales es la gran cantidad de bicarbonatos. Usualmente su

concentración es incluso mayor que los cloruros. Este ion puede ser producto de la siguiente reacción:



El pH del agua del acuífero fluctúa entre 6.5 y 8.6, con un promedio de 7.7. Sin embargo, es necesario tomar en cuenta el efecto de la temperatura para este parámetro, pues conforme aumenta la temperatura la neutralidad se alcanza con valores más bajos de pH y viceversa (Freeze & Cherry, 1979). Por ejemplo, Hem (1985) describe que a 30°C la neutralidad ocurre con un pH de 6.42, por lo que el acuífero del Graben de Juchipila presenta valores ligeramente alcalinos. Es posible que el alto contenido de HCO_3^- mitigue en gran parte la acidificación. El agua de tipo bicarbonatada sódica suele tener un alto pH y favorece el incremento de fluoruros (Nordstrom, 2011), lo cual se refleja en el coeficiente de relación positivo que existe entre ambos parámetros.

La presencia de calcio en el agua reduce la solubilidad de los fluoruros y favorece la sobresaturación del agua respecto a la fluorita, propiciando su precipitación. Por el contrario, al reducirse la presencia de calcio, se favorece la disolución de fluoruros, de ahí el enriquecimiento de fluoruros en el agua termal, la cual es de tipo bicarbonatada sódica. Esto implica que el comportamiento de los fluoruros en el acuífero está relacionado a algún proceso que libera Na^+ y remueve Ca^+ , como la alteración de feldespatos y la precipitación de calcita con el aumento de la temperatura.

Los valores de Eh que presenta el acuífero se encuentran dentro del rango propuesto por Clark (2015) para el agua subterránea, los cuales varían entre -0.5 V y 1 V y generan condiciones reductoras. El Servicio Geológico Mexicano (2018) describe en el área de estudio numerosas alteraciones minerales de carácter hidrotermal asociadas a yacimientos epitermales en las rocas volcánicas, las cuales contienen sulfuros (principalmente pirita), óxidos (hematita), clorita, entre otros. Se ha reportado que con valores bajos de Eh y con pH cercanos al neutro (condiciones que se alcanzan en el acuífero del Graben de Juchipila) se favorece la desorción del arsénico de los óxidos minerales, en este caso aquellos presentes en las áreas mineralizadas. Las zonas de alteración en la zona de estudio están alojadas principalmente en fallas y fracturas, al igual que la mayoría de los manantiales termales. Los fluidos calientes favorecen la alteración de estos minerales y la disolución del arsénico, lo

cual se ve reflejado en los coeficientes de correlación positivos del arsénico con el azufre y con el hierro. De igual manera, el incremento de arsénico puede estar relacionado con la disolución de los silicatos contenidos en las rocas volcánicas.

Existe una correlación negativa entre el Eh y la concentración de arsénico, lo cual podría indicar que la arsenita (As (III)) es la especie dominante en este acuífero, pues ésta es más estable en condiciones reductoras (Bundschuh, Armienta, Birkle, Bhattacharya, Matsschullat & Mukherjee, 2009).

El aprovechamiento P060 presenta una temperatura promedio de 29.5 °C y pertenece al grupo de aguas de tipo bicarbonatada sódica, por lo que probablemente se trate de una mezcla. Sin embargo, es de suma importancia destacar que también presenta las más grandes anomalías en conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales, pH, Na⁺, HCO₃⁻, SO₄²⁻, As y F⁻. Éste se encuentra ubicado en una granja que se dedica a la cría de ganado porcino, bovino y ovino. En este lugar, grandes cantidades de estiércol, alimento y detergente se encuentran distribuidos en el suelo, así como otros desechos provenientes de los animales, por lo que puede ocurrir que estos factores influyan en la calidad del agua que se obtiene del pozo, además de su cercanía con los demás aprovechamientos que presentan las anomalías termales y químicas más altas. Por esta razón, los valores arrojados por este pozo deben tratarse con suma precaución.

7. Conclusiones

1. El acuífero del Graben de Juchipila se conforma por dos unidades hidrogeológicas principales: una unidad fracturada conformada por ignimbritas emplazadas durante el Oligoceno- Mioceno, en la cual se almacena agua termal de tipo bicarbonatada sódica, y una unidad granular perteneciente a la Formación Juchipila, la cual se conforma por rocas sedimentarias de origen lacustre y fluvial, y por sedimentos aluviales y volcánicos intercalados con la unidad fracturada en algunas zonas, en la cual se almacena agua con temperatura ambiente de tipo bicarbonatada cálcica.
2. El agua termal ($T > 30^{\circ}\text{C}$) procede de la unidad conformada por las ignimbritas, sin embargo, el agua procedente del medio granular presenta en su mayoría temperaturas normales que incluyen mezclas con agua termal.
3. El decaimiento radiactivo de los elementos U, Th y K contenidos en las ignimbritas que pertenecen a la unidad fracturada calienta el agua subterránea, mientras que la presencia de fallas y fracturas en estas rocas facilita el ascenso y la circulación de los fluidos termales hacia profundidades someras.
4. El aumento de la conductividad eléctrica y los sólidos disueltos totales en el agua subterránea se debe a la disolución de algunos minerales al aumentar la temperatura, en especial de los feldespatos.
5. Las aguas de carácter termal se caracterizan por el aumento considerable en la concentración del sodio, arsénico, hierro, litio y fluoruros. Sin embargo, los valores de arsénico y fluoruros sobrepasan los límites permisibles establecidos por la NOM-127-SSA1-1994 en la mayor parte del acuífero.
6. La presencia de arsénico está relacionada con las alteraciones minerales que contienen sulfuros y óxidos, ubicadas en las fallas y fracturas de las rocas volcánicas, así como de la disolución de los silicatos contenidos en las rocas volcánicas.
7. La concentración de fluoruros aumenta en el agua de tipo bicarbonatada sódica y disminuye en el agua de tipo bicarbonatada cálcica, lo cual implica que su presencia está relacionada con algún proceso que libera Na^+ y remueve Ca^+ , como la alteración de feldespatos y la precipitación de calcita con el aumento de la temperatura.

8. Las grandes anomalías obtenidas en el P060 deben tratarse con suma precaución, ya que éstas podrían deberse a algún proceso de contaminación.
9. Finalmente, la información generada en este trabajo resulta de gran utilidad para identificar zonas de mayor temperatura en el acuífero del Graben de Juchipila.

7.1 Recomendaciones

- Con la finalidad de conocer más a detalle la composición de las descargas termales provenientes del medio fracturado y de las descargas de temperatura normal que representan mezclas de ambas unidades, se recomienda realizar perforaciones de pozos con diámetro pequeño (5") distribuidos en la zona norte, centro y sur del acuífero, en los cuales sea posible obtener los cortes litológicos para ranurar únicamente en la unidad de interés, y realizar muestreos específicos.
- Calcular la temperatura del sistema mediante la aplicación de geotermómetros, así como realizar estudios isotópicos que permitan conocer el nivel de mezcla entre las dos unidades que presenta el agua subterránea.
- Realizar pruebas de bombeo en estos pozos o en aquellos en los que se tenga la certeza de que el agua extraída pertenece a una unidad en específico es de suma importancia para conocer los parámetros hidráulicos de cada unidad, y así poder generar un modelo conceptual que defina con claridad el funcionamiento del acuífero.
- Así mismo, se debe prestar atención a las altas concentraciones de arsénico y fluoruros distribuidas en el acuífero, pues una gran cantidad de los pozos y norias que existen en la zona son utilizados para abastecimiento público- urbano, lo cual puede implicar grandes afectaciones a la salud para las poblaciones en la zona de estudio.

8. Bibliografía

- Aguirre- Díaz, G., Labarthe- Hernández, G., Tristán- González, M., Nieto- Obregón, J. & Gutiérrez- Palomares, I. (2008). The Ignimbrite Flare- Up and Graben Calderas of the Sierra Madre Occidental, Mexico. *Developments in Volcanology*. 10
- Alencaster, G. & de Cserna, Z. (1961). Paleontología del Triásico Superior de Sonora Parte 1, Estratigrafía del Triásico Superior de la parte central del Estado de Sonora. *Paleontología Mexicana (11)*
- Albu, M., Banks, D., & Nash, H. (1997). *Mineral and Thermal Groundwater Resources*. Reino Unido: Springer.
- Anderson, T. H. & Silver, L. T. (1979). The role of the Mojave- Sonora megashear in the tectonic evolution of northern Sonora. *The Geological Society of America*.
- Armienta, A. M., Rodríguez, R., Ceniceros, N., Cruz, O., Aguayo, A., Morales, P. & Cienfuegos, E. (2014). Groundwater quality and geothermal energy. The case of Cerro Prieto Geothermal Field, México. *Renewable Energy* 63
- Boden, D. (2017). *Geologic Fundamentals of Geothermal Energy*. Nuevo Mexico, Estados Unidos: CRC Press.
- Bundschuh, J., Armienta, M. A., Birkle, P., Bhattacharya, P., Matschullat, J., & Mukherjee, A. B. (2009). *Natural Arsenic in Groundwaters of Latin America*. Wiltshire, Gran Bretaña: CRC Press.
- Cameron, K. L., Cameron, M. & Barreiro, B. (1986). Origin of voluminous mid- Tertiary ignimbrites of the Batopilas region, Chihuahua: Implications for the formation of continental crust beneath the Sierra Madre Occidental. *Geofísica Internacional (25)* 1.
- Cameron, K. L., Nimz, G. J., Kuentz, D., Niemeyer, S. & Gunn, S. (1989). Southern Cordilleran basaltic andesite suite, southern Chihuahua, Mexico; a link between Tertiary continental arc and flood basalt magmatism in North America. *Journal of Geophysical Research*, 94.
- Campa, M., & Coney, P. (1983). Tectono- stratigraphic terranes and mineral resource distributions in Mexico. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 20(6), 1040- 1051.
- Carranza- Castañeda, O., Aranda- Gómez, J., Wang, X., & Iriondo, A. (2013). The Early- Late Hemiphilian (Hn2) Faunal Assemblage from Juchipila Basin, State of Zacatecas, Mexico, and its Biochronologic Correlation with Other Hemiphilian Faunas in Central Mexico. *Contributions in Science*, 521, 13- 49.
- Centeno- García, E., Guerrero- Suastegui, M., & Talavera- Mendoza, O. (2008). The Guerrero Composite Terrane of western Mexico: Collision and subsequent rifting in a supra- subduction zone. *The Geological Society of America Special Papers*, 436.

- Clark, I. (2015) *groundwater Geochemistry and Isotopes*. Florida, Estados Unidos: CRC Press.
- Comisión Nacional del Agua (2005). *Actualización Hidrogeológica del Acuífero Jalpa-Juchipila en Zacatecas*.
- Comisión Nacional del Agua (2015). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Jalpa- Juchipila (3209), Estado de Zacatecas*.
- Comisión Nacional del Agua (2018). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Jalpa- Juchipila (3209), Estado de Zacatecas*.
- Ferrari, L., Valencia- Moreno, M., Bryan, S. (2007). Magmatism and tectonics of the Sierra Madre Occidental and its relation with the evolution of the western margin of North America. *The Geological Society of America* (422).
- Freeze, A. R., Cherry J. A. (1979). *Groundwater*. Ontario, Canadá: Prentice Hall.
- González- León, C. M. (1997). Sequence stratigraphy and paleogeographic setting of the Antimonio Formation (Late Permian- Early Jurassic), *Sonora, México*. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* (14).
- Gosnold, W. (1985). Heat flow and ground water flow on the Great Plains of the United States. *Journal of Geodynamics*, 4.
- Gupta, H. & Roy, S. (2007). *Geothermal Energy: An alternative resource for the 21st century*. Elsevier Science.
- Hasterok, D., & Webb, J. (2017). On the radiogenic heat production of igneous rocks. *Geoscience Frontiers*, 8.
- Hem, J., D. (1985) *Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water*. Virginia, Estados Unidos: U. S. Geological Survey.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2017). *Anuario Estadístico y geográfico de Zacatecas 2017*. Aguascalientes: INEGI.
- Kresic, N., & Stevanovic, Z. (2018). *Groundwater hydrology of springs*. Massachusetts, Estados Unidos: Elsevier.
- Lahiere, L. (1982). *Petrology of lacustrine deposits, Juchipila Quadrangle, Zacatecas, Mexico*. (Tesis de Maestría). Portland State University, Oregon, Estados Unidos.
- Márquez, M., Ruiz, R., Valdez R., Blanco F. & Pérez, V. (2007). *El medio natural de la cuenca del Río Juchipila*. Zacatecas: Universidad Autónoma Chapingo, Campus Zacatecas.
- Martínez Reséndiz, E. (2016). *Petrología y geoquímica del vulcanismo máfico del Mioceno en la porción sur de la Sierra Madre Occidental* (Tesis de Licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.

- McKee, J. W., Jones N. W. & Anderson, T. H. (1988). Las Delicias basin: a record of the late Paleozoic arc volcanism in northeastern Mexico. *Geology* (16).
- Morales- Arredondo, I., Rodríguez, R., Armienta, A. & Villanueva- Estrada, R. E. (2016). A low-temperature geothermal system in central Mexico: Hydrogeochemistry and potential heat source. *Geochemical Journal* (50).
- Morales, I., Villanueva- Estrada, R. E., Rodríguez, R., & Armienta M. A. (2015). Geological, hydrogeological, and geothermal factors associated to the origin of arsenic, fluoride, and groundwater temperature in a volcanic environment “El Bajío Guanajuatense”, Mexico. *Environmental Earth Sciences*, 74.
- Nieto- Samaniego, Á., Alaniz- Álvarez, S. & Labarthe- Hernández, G. (1997). La deformación Cenozoica porlaramídica en la parte meridional de la Mesa Central, México. *Revista Mexicana De Ciencias Geológicas*, 14(1).
- Nieto- Samaniego, A., Ferrari, L., Alaniz- Alvarez, S., Labarthe- Hernández, G. & Rosas-Elguera, J. (1999). Variation of Cenozoic extensión and volcanism across the southern Sierra Madre Occidental volcanic province, Mexico. *Geological Society of America Bulletin*, 111(3).
- Nordstrom, D. K. (2011) Quality of groundwater resources: Arsenic and fluoride. *Geosciences*, 13.
- Press, F., & Biehler, S. (1964). Inferences on Crustal Velocities and Densities from P Wave Delays and Gravity Anomalies. *Journal of Geophysical Research*, 69(14).
- Prol- Ledesma, R. M., & Morán- Zenteno D. J. (2018). Heat flow and geothermal provinces in Mexico. *Geothermics*, 78.
- Rinehart, J. S., (1980). *Geysers and Geothermal Energy*. Nueva York, Estados Unidos: Springer- Verlag.
- Sedlock, R., Ortega- Gutiérrez, F., & Speed, R. (1993). Tectonostratigraphic Terranes and Tectonic Evolution of Mexico. *The Geological Society of America Special Papers*.
- Stefánsson, A. & Arnórsson, S. (2002). Gas pressures and redox reaction in geothermal fluids in Iceland. *Chemical Geology*, 190.
- Tarback, E. J. & Lutgens, F. K. (2005). *Ciencias de la Tierra. Una introducción a la geología física*. Madrid, España: Pearson Prentice Hall.
- Webb, J.R., Sullivan, T.J., & Jackson, B. (2004). *Assesment of atmospheric desposition effects on national forests. Protocols for Collection of Supplemental Stream Water and Soil Composition Data for the MAGIC Model*. Asheville, Carolina Del Norte, Estados Unidos: USDA Forest Service.

Webber, K., Fernandez, L., & Simons, W. (1994). Geochemistry and mineralogy of the Eocene- Oligocene volcanic sequence, Southern Sierra Madre Occidental, Juchipila, Zacatecas, Mexico. *Geofísica Internacional*, 33(1).

Wollenberg, H., & Smith, A. (1964). Radioactivity and Radiogenic Heat in Sierra Nevada Plutons. *Journal of Geophysical Research*, 69(16).

Yang, J. (2014). *Geothermal Energy, Technology and Geology*. Nueva York, Estados Unidos: Nova Science.

Referencias web

Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. (2005). *Sistema para la Consulta del Cuaderno Estadístico Municipal de Juchipila, Zacatecas 2005*. Recuperado de <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/espanol/sistemas/cem05/estatal/zac/m023/index.htm>

Servicio Meteorológico Nacional (2010). *Información Climatológica por Estado*. Recuperado de <http://smn.cna.gob.mx/es/informacion-climatologica-ver-estado?estado=zac>.

Servicio Geológico Mexicano. (2018). *Carta geológico- minera Jalpa F13- D27*. Recuperado de <https://www.sgm.gob.mx/CartasPdf/GeologicasL.jsp>

9. Apéndices

Tabla 8. Resultados de las mediciones de temperatura en pozos, norias y manantiales, en los meses de junio y diciembre de 2017, y junio de 2018.

CLAVE	X	Y	JUNIO 2017 [°C]	DICIEMBRE 2017 [°C]	JUNIO 2018 [°C]	PROMEDIO [°C]
CNA-B-208	701755	2384167			39.8	
CNA-B-36	709527	2402753			28.68	
CNA-B-72	720864	2405091			36.19	
M007	715149	2418449			26.2	
M019	698550	2378720		43		
M022	688907	2345525	48			
M024	688801	2346496	61			
M025	689219	2346139	39			
M026	720819	2405289			38.3	
M027	717426	2452301			58.3	
M028	720656	2434091			30.3	
M029	694657	2395966			22.4	
M030	689203	2345894			39.9	
N017	693229	2362066	26.2			
N022	697621	2380085		34		
N023	697702	2380102		38		
N025	703483	2373518			25.1	
N026	694572	2363574			28.6	
N027	696386	2381744			27.8	
N028	686823	2361069			27.9	
N029	685627	2349504			31.8	
N030	692712	2341141			26.1	
N031	694069	2332727			31	
P005	716350	2425203			33	
P012	713688	2417998			29.04	
P018	713077	2415978			27.04	
P027	710212	2406064			30.68	
P028	712532	2403677			30.7	
P030	710527	2402644			30.48	
P034	711896	2399601			28.47	
P041	705234	2391919		26		
P043	705467	2390079		26		
P049	698302	2378149	45	48	44	45.67
P050	697761	2375642			33.18	

CLAVE	X	Y	JUNIO 2017 [°C]	DICIEMBRE 2017 [°C]	JUNIO 2018 [°C]	PROMEDIO [°C]
P053	696306	2374123			31.5	
P055	696031	2370114	32		28.1	
P056	693271	2362052	26.2			
P058	686232	2340354	32			
P060	691296	2352741	32		27.15	29.58
P061	692950	2361133	32	26	25	27.67
P062	690145	2348688		67		
P068	702610	2392275		38		
P069	705230	2391177		26		
P081	738239	2418878			24.4	
P085	726320	2416322			33.89	
P089	711932	2414646			29.46	
P091	710127	2401407			28.38	
P092	725628	2413448			34.9	
P093	719800	2445106			30.9	
P094	721575	2436477			27.6	
P095	710202	2417116			30.3	
P096	706398	2392231			27.4	
P097	705233	2391178			25.9	
P098	705477	2390086			26.1	
P099	705397	2377016			30.7	
P101	701326	2385241			29.5	
P103	696050	2370109			29.5	
P104	683636	2355150			32.1	
P105	671149	2347021			36.4	
P106	691759	2333058			25.2	
P107	694119	2334811			29.7	
P109	689783	2337492			26.4	
P110	689207	2345167			33	
P111	740269	2417201			39	

Tabla 9 Resultados de las mediciones de conductividad eléctrica en pozos, norias y manantiales, en los meses de junio y diciembre de 2017, y junio de 2018.

CLAVE	X	Y	JUNIO 2017 [$\mu\text{S/cm}$]	LAB JUNIO 2017 [$\mu\text{S/cm}$]	DICIEMBRE 2017 [$\mu\text{S/cm}$]	JUNIO 2018 [$\mu\text{S/cm}$]	PROMEDIO [$\mu\text{S/cm}$]
CNA-B-208	701755	2384167				625.7	
CNA-B-72	720864	2405091				411	
M007	715149	2418449				363	
M019	698550	2378720		842.2			
M022	688907	2345525	1541	1528			
M024	688801	2346496		1523			
M025	689219	2346139	1241 1104				
M026	720819	2405289				392	
M027	717426	2452301				1091	
M028	720656	2434091				441.3	
M029	694657	2395966				434.8	
M030	689203	2345894				1155	
N017	693229	2362066	796				
N022	697621	2380085			843		
N023	697702	2380102			884		
N025	703483	2373518				426.2	
N026	694572	2363574				833	
N027	696386	2381744				606.2	
N028	686823	2361069				545.5	
N029	685627	2349504				888.6	
N030	692712	2341141				496.1	
N031	694069	2332727				1117	
P005	716350	2425203				390.8	
P012	713688	2417998				447	
P018	713077	2415978				326	
P027	710212	2406064				393	
P028	712532	2403677				711	
P030	710527	2402644				493	
P034	711896	2399601				327	
P041	705234	2391919			439		
P043	705467	2390079			441		
P049	698302	2378149	656			655.5	655.75
P050	697761	2375642				562	
P053	696306	2374123				581	
P055	696031	2370114	665			575	620
P056	693271	2362052	796				
P058	686232	2340354	548				

CLAVE	X	Y	JUNIO 2017 [$\mu\text{S/cm}$]	LAB JUNIO 2017 [$\mu\text{S/cm}$]	DICIEMBRE 2017 [$\mu\text{S/cm}$]	JUNIO 2018 [$\mu\text{S/cm}$]	PROMEDIO [$\mu\text{S/cm}$]
P060	691296	2352741	1561			1368	1464.5
P061	692950	2361133	855			1008	931.5
P068	702610	2392275			574		
P069	705230	2391177			431		
P081	738239	2418878				548	
P085	726320	2416322				390	
P089	711932	2414646				391	
P091	710127	2401407				516	
P092	725628	2413448				415.4	
P093	719800	2445106				401.9	
P094	721575	2436477				497.9	
P095	710202	2417116				371.7	
P096	706398	2392231				468.8	
P097	705233	2391178				441.3	
P098	705477	2390086				441.3	
P099	705397	2377016				540.6	
P100	710072	2376217				427.6	
P101	701326	2385241				623.1	
P102	714290	2374828				414.8	
P103	696050	2370109				654.9	
P104	683636	2355150				450.9	
P105	671149	2347021				686.8	
P106	691759	2333058				696.1	
P107	694119	2334811				661.6	
P108	689621	2326126				451	
P109	689783	2337492				617.8	
P110	689207	2345167				918.5	
P111	740269	2417201				488.2	

Tabla 10. Resultados de las mediciones de la concentración de sólidos disueltos totales en pozos, norias y manantiales en los meses de junio y diciembre de 2017, y junio de 2018.

CLAVE	X	Y	JUNIO 2017 [ppm]	LAB JUNIO 2017 [ppm]	DICIEMBRE 2017 [ppm]	JUNIO 2018 [ppm]	PROMEDIO [ppm]
CNA-B-208	701755	2384167				307.1	
CNA-B-36	709527	2402753				217	
CNA-B-72	720864	2405091				169	
M007	715149	2418449				178.4	
M019	698550	2378720		413.2			
M022	688907	2345525	747	749			
M024	688801	2346496	615	746.9			
M025	689219	2346139	552				
M026	720819	2405289				192.6	
M027	717426	2452301				535.3	
M028	720656	2434091				216.8	
M029	694657	2395966				213.6	
M030	689203	2345894				566	
N017	693229	2362066	399				
N022	697621	2380085			422		
N023	697702	2380102			442		
N025	703483	2373518				209.3	
N026	694572	2363574				408.7	
N027	696386	2381744				297.5	
N028	686823	2361069				267.8	
N029	685627	2349504				435.9	
N030	692712	2341141				230.4	
N031	694069	2332727				547.9	
P005	716350	2425203				191.9	
P012	713688	2417998				223	
P018	713077	2415978				163	
P027	710212	2406064				196	
P028	712532	2403677				356	
P030	710527	2402644				247	
P034	711896	2399601				163	
P041	705234	2391919			220		
P043	705467	2390079			226		
P049	698302	2378149	330			321.7	325.85
P050	697761	2375642				281	
P053	696306	2374123				290	
P055	696031	2370114	333	201.5		287	310
P056	693271	2362052	361	518			

CLAVE	X	Y	JUNIO 2017 [ppm]	LAB JUNIO 2017 [ppm]	DICIEMBRE 2017 [ppm]	JUNIO 2018 [ppm]	PROMEDIO [ppm]
P058	686232	2340354	275				
P060	691296	2352741	730	1005		684	707
P061	692950	2361133	428			494.6	461.3
P068	702610	2392275			287		
P069	705230	2391177			215		
P081	738239	2418878				274	
P085	726320	2416322				195	
P089	711932	2414646				196	
P091	710127	2401407				258	
P092	725628	2413448				212.9	
P093	719800	2445106				197.4	
P094	721575	2436477				244.4	
P095	710202	2417116				182.6	
P096	706398	2392231				230.2	
P097	705233	2391178				216.7	
P098	705477	2390086				216.7	
P099	705397	2377016				258	
P100	710072	2376217				210	
P101	701326	2385241				305.8	
P102	714290	2374828				203.7	
P103	696050	2370109				321.4	
P104	683636	2355150				221.4	
P105	671149	2347021				337	
P106	691759	2333058				341.6	
P107	694119	2334811				324.7	
P108	689621	2326126				221.5	
P109	689783	2337492				303.2	
P110	689207	2345167				450.6	
P111	740269	2417201				239.8	

Tabla 11. Resultados de las mediciones de los valores de pH en pozos, norias y manantiales en los meses de junio y diciembre de 2017, y junio de 2018.

CLAVE	X	Y	JUNIO 2017	LAB JUNIO 2017	DICIEMBRE 2017	JUNIO 2018	PROMEDIO
CNA-B-208	701755	2384167				8.17	
CNA-B-36	709527	2402753				7.18	
CNA-B-72	720864	2405091				7.5	
M007	715149	2418449				8.58	
M019	698550	2378720		8.8			
M022	688907	2345525	7.7	8			
M024	688801	2346496	7.6	8.1			
M025	689219	2346139	8.17				
M026	720819	2405289				7.78	
M027	717426	2452301				6.86	
M028	720656	2434091				8.13	
M029	694657	2395966				7.62	
M030	689203	2345894				8.39	
N017	693229	2362066	6.87				
N022	697621	2380085			7.76		
N023	697702	2380102			7.74		
N025	703483	2373518				8.2	
N026	694572	2363574				7.2	
N027	696386	2381744				7.37	
N028	686823	2361069				7.21	
N029	685627	2349504				7.13	
N030	692712	2341141				7.45	
N031	694069	2332727				7.1	
P005	716350	2425203				7.75	
P012	713688	2417998				8.37	
P018	713077	2415978				8.02	
P027	710212	2406064				7.9	
P028	712532	2403677				6.88	
P030	710527	2402644				7.65	
P034	711896	2399601				7.38	
P041	705234	2391919			7.15		
P043	705467	2390079			7.23		
P049	698302	2378149	8.2			8.31	8.26
P050	697761	2375642				8.39	
P053	696306	2374123				8.91	
P055	696031	2370114	8.04	8.4		8.19	8.12
P056	693271	2362052	7.61	7.7			

CLAVE	X	Y	JUNIO 2017	LAB JUNIO 2017	DICIEMBRE 2017	JUNIO 2018	PROMEDIO
P058	686232	2340354	8.75				
P060	691296	2352741	8.64	8.9		8.69	8.67
P061	692950	2361133	7.08			7.81	7.45
P068	702610	2392275			8.02		
P069	705230	2391177			7.19		
P081	738239	2418878				7.01	
P085	726320	2416322				7.86	
P089	711932	2414646				7.42	
P091	710127	2401407				7.16	
P092	725628	2413448				7.6	
P093	719800	2445106				7.68	
P094	721575	2436477				7.31	
P095	710202	2417116				7.71	
P096	706398	2392231				7.55	
P097	705233	2391178				7.51	
P098	705477	2390086				7.45	
P099	705397	2377016				7.48	
P100	710072	2376217				8.4	
P101	701326	2385241				8.39	
P102	714290	2374828				7.8	
P103	696050	2370109				8.2	
P104	683636	2355150				7.67	
P105	671149	2347021				8.23	
P106	691759	2333058				7.08	
P107	694119	2334811				7.19	
P108	689621	2326126				7.89	
P109	689783	2337492				7.21	
P110	689207	2345167				7.79	
P111	740269	2417201				7.54	

Tabla 12. Resultados de las mediciones de los valores de potencial de oxidación- reducción en pozos, norias y manantiales en los meses de junio y diciembre de 2017, y junio de 2018.

CLAVE	X	Y	JUNIO 2017 [V]	LAB JUNIO 2017 [V]	DICIEMBRE 2017 [V]	JUNIO 2018 [V]	PROMEDIO [V]
CNA-B-208	701755	2384167				0.1319	
CNA-B-36	709527	2402753				0.864	
CNA-B-72	720864	2405091				0.0812	
M007	715149	2418449				0.1584	
M019	698550	2378720		0.1207			
M022	688907	2345525	0.133	0.1294			
M024	688801	2346496	0.0816	0.1316			
M025	689219	2346139	0.1115				
M026	720819	2405289				0.2414	
M027	717426	2452301				0.2257	
M028	720656	2434091				0.1813	
M029	694657	2395966				0.1482	
M030	689203	2345894				0.1319	
N017	693229	2362066	0.14				
N022	697621	2380085			0.045		
N023	697702	2380102			0.0721		
N025	703483	2373518				0.1583	
N026	694572	2363574				0.1626	
N027	696386	2381744				0.1483	
N028	686823	2361069				0.151	
N029	685627	2349504				0.1592	
N030	692712	2341141				0.1316	
N031	694069	2332727				0.1272	
P005	716350	2425203				0.1537	
P012	713688	2417998				0.057	
P027	710212	2406064				0.0801	
P028	712532	2403677				0.0923	
P030	710527	2402644				0.0248	
P034	711896	2399601				0.0656	
P041	705234	2391919			0.0956		
P043	705467	2390079			0.1566		
P049	698302	2378149	0.143			0.1144	0.1287
P050	697761	2375642				0.0689	
P055	696031	2370114	0.145	0.1564			
P056	693271	2362052	0.14	0.1727			
P060	691296	2352741	0.055	0.1297			
P061	692950	2361133	0.1493			0.1322	0.14075

CLAVE	X	Y	JUNIO 2017 [V]	LAB JUNIO 2017 [V]	DICIEMBRE 2017 [V]	JUNIO 2018 [V]	PROMEDIO [V]
P068	702610	2392275			0.0455		
P069	705230	2391177			0.1061		
P081	738239	2418878				0.0931	
P085	726320	2416322				0.0246	
P089	711932	2414646				0.0558	
P091	710127	2401407				0.0878	
P092	725628	2413448				0.2536	
P093	719800	2445106				0.2379	
P094	721575	2436477				0.2081	
P095	710202	2417116				0.1585	
P096	706398	2392231				0.1473	
P097	705233	2391178				0.1461	
P098	705477	2390086				0.1466	
P099	705397	2377016				0.1583	
P100	710072	2376217				0.0536	
P101	701326	2385241				0.1396	
P102	714290	2374828				0.057	
P103	696050	2370109				0.1529	
P104	683636	2355150				0.1499	
P105	671149	2347021				0.0566	
P106	691759	2333058				0.1419	
P107	694119	2334811				0.1282	
P108	689621	2326126				0.1256	
P109	689783	2337492				0.1358	
P110	689207	2345167				0.142	
P111	740269	2417201				0.1372	