



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS  
POTOSÍ**



FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS, INGENIERÍA Y MEDICINA  
PROGRAMA MULTIDISCIPLINARIO DE POSGRADO EN CIENCIAS  
AMBIENTALES

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
**MAESTRÍA CIENCIAS AMBIENTALES**

**CARACTERIZACIÓN AMBIENTAL DEL MANANTIAL “OJO DE  
AGUA”, MOCTEZUMA, S.L.P. Y ACCIONES PARA SU  
CONSERVACIÓN Y USO**

PRESENTA:

**ALEJANDRA GARDEA LÓPEZ**

**DIRECTOR DE TESIS:**

DR. ANTONIO CARDONA BENAVIDES

**CO-DIRECTOR DE TESIS:**

DR. JUAN ANTONIO REYES AGÜERO

**ASESORA:**

DRA. SILVIA ROMERO CONTRERAS

**21 de noviembre de 2019**

## CRÉDITOS INSTITUCIONALES

---

### SE AGRADECE AL:

Proyecto aprobado dentro de la Convocatoria CONACYT del Programa Apoyos Complementarios para el Establecimiento y Consolidación de Laboratorios Nacionales 2019 con el título "Consolidación de Laboratorio Nacional de Espectrometría de Masas con Aceleradores (LEMA)" con número de registro 299073.

## AGRADECIMIENTOS

---

A mi familia, que siempre creyó en mí, me apoyó incondicionalmente en esta etapa de mi vida y siempre me hicieron sentir acompañada a pesar de la distancia.

Al Dr. Cardona por aceptarme como tesista y darme su voto de confianza a pesar del tiempo que me quedaba en el programa. Gracias por su tiempo, dedicación y enseñanzas.  
Al Dr. Reyes por escucharme, apoyarme y animarme a no dejarme caer ante los obstáculos.

A la Dra. Silvia Romero por guiarme en el proceso del análisis social, lo cual fue muy complejo para mí.

Al Dr. Hermann Rocha por sus comentarios y observaciones.

A todo el eficiente equipo del PMPCA quienes me instruyeron, ayudaron, tuvieron paciencia y sobre todo siempre me sacaron una sonrisa: Laura, Lore, Gaby, Maru, Ara, Zory y doña Mago.

Al Dr. Alfredo Ávila, quien fue el primero en abrirme las puertas para ingresar en el posgrado, gracias por el tiempo y el apoyo brindado.

Al Dr. Fortanelli quien fue el mejor coordinador y siempre tuvo tiempo para escucharnos y orientarnos.

A René, quien me enseñó que el arte no tiene que estar desligado de mi vida profesional.

A las grandes amistades que hice en el posgrado y siempre estuvieron para mí, apoyándome y motivándome: Norma, Estrella, Kary, Dalia, Sher, Nat, Gigi y Eva.

A mis amigas de La Paz, quienes siempre se encargaron de darme ánimo a pesar de la distancia: Mony, Gore, Yesi, Tania, Anni y Sara.

A mis amigos del cubículo que no sólo me ayudaron, sino que me hicieron sentirme bienvenida en el equipo: Sócrates, Cristian, Isidro y Darío.

A Jorge quien además de ser mi amigo fue mi paciente asesor con los SIG.

A la maestra Lupita y a la Dra. María Elena, cuyo apoyo y amabilidad hicieron que pasara momentos muy agradables en el laboratorio, además de que estuvieron siempre al tanto de mi trabajo y mi progreso.

Al equipo de laboratorio quienes me tuvieron paciencia y enseñaron todo lo que necesitaba: Sofy, Jarvis, Julio y Migue.

A mi súper equipo de campo, ya que sin ellos no hubiera sacado a tiempo la cobertura vegetal: Diana, Pedrito, Manuel, Memo, Fer y sobre todo Lulú quien se encargó de capacitarnos a todos.

Le agradezco a la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, por brindarme la oportunidad de continuar y conseguir expandir más mis estudios.

## DEDICADO...

---

A mi familia quien siempre creyó en mí y me apoyó en cada momento, especialmente mis padres, mi abuelita coco y mi hermano.

*“ Mares tranquilos nunca hicieron buenos marineros ”.*

---

# ÍNDICE DE CONTENIDO

---

CRÉDITOS INSTITUCIONALES	
AGRADECIMIENTOS	4
DEDICATORIA	6
RESUMEN	11
ABSTRACT	13
INTRODUCCIÓN	15
<b>1. JUSTIFICACIÓN</b>	<b>17</b>
<b>2. OBJETIVO GENERAL</b>	<b>18</b>
2.1 Objetivos específicos	18
<b>3. ANTECEDENTES</b>	<b>19</b>
3.1 Distribución del agua	19
3.2 Situación del agua en el nivel mundial	20
3.3 Situación del agua en el nivel nacional	22
3.4 Las zonas áridas	29
3.5 Reseña histórica de Moctezuma	30
<b>4. MARCO CONCEPTUAL</b>	<b>33</b>
4.1 El agua subterránea y el ciclo hidrológico	33
4.2 Teoría de los Sistemas de Flujo de Agua Subterránea	34
4.3 Manantiales	39
<b>5. LOCALIZACIÓN, CARACTERIZACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL MEDIO FÍSICO</b>	<b>43</b>
5.1 Localización, extensión y vías de comunicación	43
5.2 Demografía	46
5.3 Clima	47
5.4 Vegetación	48

5.5 Características y uso del suelo	50
5.6 Fisiografía	52
5.6.1 Provincia fisiográfica	52
5.6.2 Sub-provincia fisiográfica	54
5.7 Hidrografía	55
5.7.1 Hidrología superficial	55
5.7.2 Hidrología subterránea	59
<b>6. GEOLOGÍA</b>	<b>64</b>
6.1 Marco geológico	64
6.2 Estratigrafía	65
6.2.1 Rocas sedimentarias	65
6.2.1 Rocas volcánicas	71
<b>7. METODOLOGÍA</b>	<b>82</b>
7.1 Etapa de gestión	82
7.2 Etapa de campo	83
7.2.1 Censo de aprovechamientos	83
7.2.2 Medición de profundidad y nivel estático	86
7.2.3 Medición de parámetros hidrogeoquímicos	87
7.2.4 Toma de muestras de agua	93
7.2.5 Identificación y control de las muestras	96
7.3 Cobertura superficial	97
7.4 Aplicación de entrevistas semi-estructuradas	101
7.5 Actividades de laboratorio	102
7.5.1 Análisis químicos y fisicoquímicos	102
7.6 Etapa de gabinete	106
7.6.1 Identificación de la relación de flujo de agua subterránea	106
7.6.2 Análisis del agua	106
7.6.3 Cobertura superficial del suelo	107
7.6.4 Análisis de series de tiempo	108
7.6.5 Análisis cualitativo	110
<b>8. RESULTADOS</b>	<b>111</b>
8.1 Identificación de los sistemas de flujo de agua subterránea	111
8.2 Caracterización hidrogeoquímica	117
8.2.1 Balance iónico	120
8.2.2 Análisis estadístico	121

8.2.3 Diagramas de Piper (1944)	130
8.2.4 Diagramas de Stiff (1951) y evolución de las familias de agua	145
8.2.5 Aprovechamientos con aguas termales	151
8.3 Evaluación de la calidad del agua para uso público-urbano con respecto a la NOM-127-SSA1-1994	152
8.4 Análisis de la cobertura vegetal en las zonas de recarga del manantial	162
8.4.1 Determinación de la zona de recarga	162
8.4.2 Cobertura superficial	166
8.5 Análisis de series de tiempo de fenómenos meteorológicos	171
8.6 Identificación del nivel de interés y participación de la población de Moctezuma en relación con el tema de protección y conservación del manantial	172
<b>9. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS</b>	178
9.1 Modelo conceptual del funcionamiento de manantial "Ojo de Agua"	178
9.2 Calidad del agua	186
9.3 Relación entre cobertura vegetal y zonas de recarga	187
9.4 Visión social de la problemática ambiental	192
<b>10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	197
<b>BIBLIOGRAFÍA CITADA</b>	200
<b>ANEXOS</b>	212

## RESUMEN

---

*Palabras Clave:* Teoría de los sistemas de flujo, Agua subterránea, Cobertura vegetal, Percepción social, Límites permisibles.

Con el fin de comprender el funcionamiento del manantial “Ojo de Agua” del municipio de Moctezuma, SLP, México, se realizó un estudio multidisciplinario el cual contempló los diversos elementos ambientales que interactúan con el agua subterránea, basado en la Teoría de los Sistemas de Flujo de Agua Subterránea (TSF) propuesta por Tóth (1963); dentro de los elementos ambientales que se estudiaron se incluyen el suelo y la vegetación asociada al área de recarga, la geología y sus estructuras que determinan la dirección, movimiento y química del agua y la sociedad que influye o se ve afectada en/ con la problemática ambiental del manantial.

El trabajo consistió de cuatro etapas; la primera fue la etapa de gestión, en donde se establecieron fechas, solicitaron permisos y se hizo la vinculación con la población en conjunto con los funcionarios del Ayuntamiento de Moctezuma; también se hizo el diseño de formatos necesarios para la recolección de la información de campo, se definió el área de estudio y se recopiló la información necesaria de la misma. La segunda etapa fue la de campo, que consistió de varias fases: a) la toma de muestras de muestras de agua y parámetros hidrogeoquímicos *in situ* de los aprovechamientos censados, la cual se realizó en tres campañas de muestreo (septiembre 2018, noviembre 2018 y febrero-marzo 2019), b) el muestreo de cobertura vegetal en el área de recarga potencial del manantial por medio del método de step-point (Raymond and Merton, 1957) de febrero a abril de 2019 y c) la aplicación de entrevistas semi-estructuradas a la población y personajes clave en la cabecera municipal de Moctezuma, por medio de un muestreo por conveniencia, de febrero a marzo de 2019. La tercera etapa fue la etapa de laboratorio en donde se llevaron a cabo los análisis químicos y fisicoquímicos de las muestras de agua superficial y subterránea por medio del espectrómetro de emisión óptica ICP-OES y del espectrómetro de masas ICP-MS. Y finalmente la etapa de procesamiento de datos en donde se realizó el análisis de la información recolectada en campo y laboratorio con ayuda de distintos programas de cómputo especializados.

Se obtuvo un total de 39 muestras en 25 aprovechamientos que incluyen bordos, manantiales, norias y pozos, con las cuales se identificó la dirección de flujo del agua subterránea de poniente a oriente, la calidad del manantial con base en la NOM-127-

SSA1-1994, que resultó de buena calidad para el manantial, el área de recarga potencial del manantial ubicada en la parte poniente del manantial en el anticlinorio Santa Catarina y ocho familias de agua que fueron bicarbonatada-mixta (HCO<sub>3</sub>-MIX), bicarbonatada-cálcica (HCO<sub>3</sub>-Ca), bicarbonatada sódica (HCO<sub>3</sub>-Na), mixta mixta (MIX-MIX), mixta cálcica (MIX-Ca), mixta sódica (MIX-Na), sulfatada mixta (SO<sub>4</sub>-MIX) y clorurada cálcica (Cl-Ca).

Se realizaron 150 parcelas de cobertura vegetal en el área de recarga potencial con las que obtuvo el porcentaje que va de 47.2 a 52.8 %, con el cual se definió que el ecosistema no es considerado como “saludable”.

Las entrevistas realizadas tanto a pobladores de la cabecera de Moctezuma como de las autoridades municipales fueron una herramienta muy útil para identificar posibles factores que pudieron haber provocado la disminución del manantial y para conocer el nivel de interés de la gente con respecto a la problemática ambiental. También ayudaron a identificar que la percepción de la gente con respecto a que la disminución de la lluvia era uno de los factores que había causado la problemática del manantial, no era correcta ya que con análisis de series de tiempo de precipitación y temperatura del área de Moctezuma se demostró que no había tendencia en un periodo de 1970 a 2016.

Finalmente, se pudo observar que uno de los pozos (El Picacho) que se utiliza para el abastecimiento de agua de Moctezuma, presenta una composición química similar a la del manantial, lo que sugiere que ambos pueden tener conexión en el sistema de flujo subterráneo y la extracción del pozo puede tener influencia sobre el manantial.

## ABSTRACT

---

*Keywords:* Flow systems theory, Groundwater, Plant cover, Social perception, Permissible limits.

In order to understand the functioning of the "Ojo de Agua" spring in the municipality of Moctezuma, SLP, Mexico, a multidisciplinary study was carried out which contemplated the various environmental elements that interact with groundwater, based on the Theory of Groundwater Flow Systems (TGFS) proposed by Tóth (1963); The environmental elements studied include the soil and vegetation associated with the recharge area, the geology and its structures that determine the direction, movement and chemistry of the water and the society that influences or is affected by the environmental problems of the spring.

The work consisted of four stages; the first one was the management stage, in which dates were established, permits were requested and the link with the population was made together with the officials of the Municipality of Moctezuma; the design of the necessary formats for the collection of field information was also made, the area of study was defined and the necessary information was compiled. The second stage was the field stage, which consisted of several phases: a) the sampling of water samples and hydrogeochemical parameters in situ from the censused uses, which was carried out in three sampling campaigns (September 2018, November 2018 and February-March 2019), b) the sampling of vegetation cover in the area of potential recharge of the spring by means of the step-point method (Raymond y Merton, 1957) from February to April 2019 and c) the application of semi-structured interviews to the population and key figures in the municipal capital of Moctezuma, by means of a convenience sampling, from February to March 2019. The third stage was the laboratory stage where chemical and physicochemical analyses of surface and groundwater samples were carried out by means of the ICP-OES optical emission spectrometer and the ICP-MS mass spectrometer. And finally, the data processing stage where the analysis of the information collected in the field and laboratory was performed with the help of different specialized computer programs.

A total of 39 samples were obtained in 25 exploitations that include embankments, springs, wells and wells, with which the flow direction of the groundwater was identified from west to east, the quality of the spring based on NOM-127-SSA1-1994, which was of good quality for the spring, the potential recharge area of the spring located in the

western part of the spring in the Santa Catarina anticlinatory and eight families of water that were bicarbonated-mixed ( $\text{HCO}_3$ -MIX), bicarbonate-calcium ( $\text{HCO}_3$ -Ca), sodium bicarbonate ( $\text{HCO}_3$ -Na), mixed (MIX-MIX), calcium mix (MIX-Ca), sodium mix (MIX-Na), mixed sulphate ( $\text{SO}_4$ -MIX) and calcium chloride (Cl-Ca).

There were 150 plots of vegetation cover in the potential recharge area with which it obtained a percentage ranging from 47.2 to 52.8 %, with which it was defined that the ecosystem is not considered as "healthy".

The interviews conducted with the inhabitants of Moctezuma and the municipal authorities were a very useful tool to identify possible factors that could have caused the decrease of the spring and to know the level of interest of the people with respect to the environmental problem. They also helped to identify that people's perception that the decrease in rainfall was one of the factors that had caused the problem of the spring, was not correct because analysis of time series of precipitation and temperature of the Montezuma area showed that there was no trend in a period from 1970 to 2016.

Finally, it could be observed that one of the wells (located in the town of El Picacho) used to supply water to Moctezuma has a chemical composition similar to that of the spring, which suggests that both may have a connection in the underground flow system and the extraction from the well may have an influence on the "Ojo de agua" spring, being a factor in the environmental problem.

## INTRODUCCIÓN

---

La problemática del agua no radica únicamente en su disponibilidad, sino también en su calidad, la cual se ve afectada por cambios negativos en el ciclo hidrológico originados por causas naturales y/o artificiales. Dentro de las causas naturales se encuentran el cambio climático, la disminución de precipitaciones y la pérdida de cobertura vegetal que pueden o no, tener relación entre sí. La actividad antrópica es la principal fuente de origen de estos cambios negativos, debido a que causan contaminación y disminución de la infiltración de recarga de acuíferos provocados por el mal manejo de aguas residuales, deforestación, cambio de uso de suelo y extracción excesiva de aguas subterráneas. Todos estos factores repercuten en el deterioro de los ecosistemas y en la posibilidad de utilizar el recurso en actividades de uso y consumo humano.

El agua subterránea es la mayor reserva de agua dulce del planeta y, a diferencia de la superficial, esta es menos vulnerable a la contaminación antrópica. Específicamente para las regiones áridas y semiáridas, el recurso subterráneo representa la mayor fuente de abastecimiento y en algunas ocasiones la única. Sin embargo, debido al estilo de vida de la sociedad moderna, la actividad industrial, el aumento poblacional, el cambio climático y la falta de conciencia de la población, entre otros, se espera que en el futuro estas regiones enfrenten graves problemas hídricos (Carrillo-Rivera y Cardona, 2012).

La persistencia del mal manejo del agua subterránea provoca inconvenientes como intrusión marina, subsidencia y erosión del terreno que ponen en riesgo a las poblaciones, pérdida de biodiversidad, modificación del paisaje e impactos en la salud pública (Velez, 1999; Monforte and Cantú, 2009; Sahuquillo, 2009; Carrillo-Rivera and Cardona, 2012). El agua, aunque es bien sabido que es un recurso elemental para la vida, en ocasiones se le da la poca importancia debido a que en muchos lugares es una sustancia muy común y de relativamente fácil acceso, especialmente las aguas subterráneas; es probable que la falta de conciencia sea explicada por el hecho de que las fuentes de estas aguas son invisibles y no pueden tener el mismo impacto sobre los sentidos como un lago, río o cascada (Price, 2003).

Es por esto que, el conocimiento del sistema de agua subterránea es un prerrequisito básico si se quiere aplicar una adecuada gestión del recurso, pertinente a las necesidades de cada localidad. Dentro de los elementos que deben integrarse para obtener un entendimiento sistémico del agua subterránea y su ambiente se encuentran

las propiedades fisico-químicas del agua, la geología con las que ésta interacciona, la geología estructural y geomorfología que determina su movimiento, los elementos bióticos que puedan relacionarse con la recarga y descarga y posibles factores antrópicos que influyan en el recurso. Aunado a esto, debe también considerarse la normatividad correspondiente a cada país.

En México, más de la mitad del país corresponde a regiones áridas y semiáridas, en donde las condiciones climáticas provocan que la evaporación potencial sea elevada y la ocurrencia de cuerpos superficiales sea escasa o nula. En éste tipo de climas es común la existencia de manantiales, que, aunque son cuerpos de agua que se ven en la superficie, corresponden a una descarga de agua subterránea.

En el municipio de Moctezuma, San Luis Potosí, la población y las autoridades se han alarmado por el notorio descenso en el nivel de agua del manantial conocido localmente como "Ojo de Agua". Debido a esto, desde aproximadamente el año 2002 el agua ha sido insuficiente, por lo que el gobierno municipal se ha encargado de traer de otras comunidades como el Picacho (pozo inaugurado en 2008) y Garabatillos (pozo inaugurado en 2003). Sin embargo, aunque el problema de abastecimiento de agua de uso público-urbano fue parcialmente solucionado con la inauguración de nuevos pozos, la disminución del manantial continúa. Además, considerando que el manantial es el único atractivo turístico de Moctezuma, la sequía ha causado también problemas económicos principalmente para los comerciantes.

El presente trabajo surge de la necesidad de generar conocimiento técnico, confiable y de calidad que permita funcionar como una herramienta que soporte la toma de decisiones, ya que no existen estudios previos específicos para el área del manantial Moctezuma, motivo por lo que no se ha podido llegar a una solución pertinente.

# 1. JUSTIFICACIÓN

---

La presión en los sistemas hídricos, así como el drástico aumento de los niveles de contaminantes en los recursos aire, agua y suelo, se han vuelto más difíciles de remediar, por lo que la sociedad moderna se ha puesto cada vez más exigente ante las autoridades, presionando para que exista un mayor compromiso ambiental, así como una legislación cada vez más firme y específica.

En Moctezuma entre los años 1990 y 2000 la CONAGUA realizó un análisis en donde advierte que el "Ojo de Agua" estaba llegando a su límite para la extracción por lo que se recomendó buscar opciones alternas para proveer de agua a la cabecera municipal ya que en un futuro esta iba a ser insuficiente, advertencia que en su momento fue desoída. Ahora que ya se tienen algunos años con problemas de abastecimiento de agua agravado con sequías recientes, las autoridades han puesto su atención en poder recuperar el manantial; sin embargo, es difícil llegar a una solución viable sin estudios ambientales-hidrológicos que puedan servir como base para conocer lo que ocurre con el manantial. Sin información de calidad se carece de un adecuado plan de manejo para aprovechar el recurso. El estudio de las aguas subterráneas de la zona de interés permitirá conocer el potencial hídrico, el funcionamiento del o los sistemas hídricos, la calidad de las aguas y, sobre todo, proporcionará información confiable para una mejor planificación y gestión del uso óptimo del recurso.

## 2. OBJETIVO GENERAL

---

Caracterizar y analizar los problemas ambientales relacionados con el aprovechamiento y manejo del manantial “Ojo de Agua” en el Municipio de Moctezuma, San Luis Potosí para desarrollar una propuesta de conservación sostenible del recurso hídrico.

### 2.1 Objetivos específicos

1. **Identificar** los sistemas de flujo subterráneo en la zona de estudio.
2. **Evaluar** la calidad del agua de abastecimiento en las principales comunidades del municipio de Moctezuma, con respecto al uso público-urbano.
3. **Analizar** la cobertura vegetal en la zona de recarga del manantial “Ojo de Agua”.
4. **Identificar** el nivel de interés y de participación de la población en general del municipio de Moctezuma, en relación con el tema de la protección y conservación del manantial.

### 3. ANTECEDENTES

---

#### 3.1 Distribución del agua

El agua en la Tierra se encuentra distribuida de manera heterogénea; aproximadamente el 97.5 % es salada (mares y océanos) y el 2.5 % restante es agua dulce (Freeze y Cherry, 1979). Sin embargo, sólo el 0.26 % del agua dulce es accesible para consumo humano. Considerando que éste 0.26 % es el 100 % del agua que puede extraerse, el agua subterránea corresponde al 98 %, mientras que el otro 2 % corresponde a agua superficial y humedad (figura 1), por lo que se puede entender que el agua subterránea es una reserva fundamental de agua dulce en el planeta.

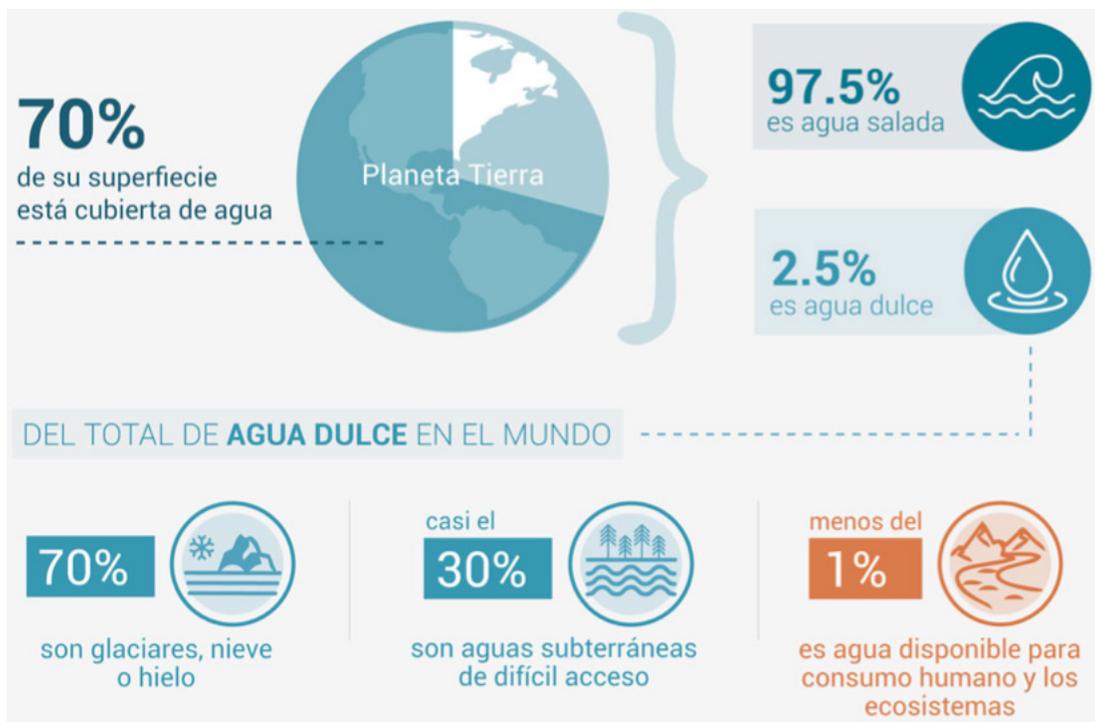


Figura 1. Reserva mundial de agua dulce a nivel mundial. Tomado de AGUA.org.mx, Centro Virtual de Información del Agua, 2017.

El agua subterránea provee casi la mitad de toda el agua potable en el mundo, según el World Water Assessment Programme (2015), aproximadamente 2.5 billones de personas dependen exclusivamente de éste recurso y alrededor del 43 % es utilizada para riego agrícola, lo cual es indispensable para contribuir a la seguridad alimentaria de millones de personas (UNESCO, 2017).

### 3.2 Situación del agua en el nivel mundial

Para explicar la situación del agua en el nivel mundial, se usaron los documentos emitidos por la Organización de las Naciones Unidas (ONU) y sus dependencias, ya que sus estudios se enfocan en los problemas actuales y futuros, en los ámbitos social, económico y ambiental, además de proponer estrategias para su solución. El agua está en el epicentro del desarrollo sostenible y es fundamental para el desarrollo socioeconómico, la producción y uso de energía, la producción de alimentos, los ecosistemas saludables y para la supervivencia misma de los seres humanos. Siendo de vital importancia para reducir la carga mundial de enfermedades, mejorar la salud, la educación y la productividad económica de las poblaciones (Nakamura, 2006; ONU, 2016, 2017).

El crecimiento poblacional mundial (7727 millones de habitantes en 2019 según la Worldometers) el desarrollo industrial, los avances tecnológicos y la modificación de las actividades de producción han provocado una mayor demanda de los recursos hídricos para el desarrollo económico y de salud del ser humano. Por este motivo, la ONU, se ha preocupado por la situación de aprovechamiento del agua, destinando así, diversas investigaciones sobre el recurso. Dentro de los datos recabados en 2017 se destacan los siguientes aspectos:

- 1) 2.1 billones de personas carecen de acceso a servicios de agua potable gestionados de manera segura.
- 2) 4.5 billones de personas carecen de servicios de saneamiento gestionados de forma segura.
- 3) 340,000 niños menores de cinco años mueren cada año por enfermedades diarreicas.
- 4) La escasez de agua ya afecta a cuatro de cada diez personas.
- 5) El 90 % de los desastres naturales están relacionados con el agua.

6) El 80 % de las aguas residuales retornan al ecosistema sin ser tratadas o reutilizadas.

7) Alrededor de dos tercios de los ríos transfronterizos del mundo no tienen un marco de gestión cooperativa.

8) La agricultura demanda el 70 % de la extracción mundial de agua.

9) Aproximadamente el 75 % de todas las extracciones de agua industrial se utilizan para la producción de energía.

Debido a lo anterior, la Asamblea General de las Naciones Unidas reconoció el derecho de todos los seres humanos a tener acceso a agua suficiente para el uso doméstico y personal (entre 50 y 100 L/día *per cápita*) con una calidad segura, aceptable y asequible (el agua no debe costar más del 3 % de los ingresos del hogar) y, además, accesible físicamente (la fuente debe estar mínimo a 1,000 m del hogar y el tiempo necesario para su recogida no debería superar los 30') (ONU,2017).

Durante la Cumbre de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo Sostenible con sede en Nueva York (2015) fue aprobada la Agenda 2030 la cual incluye los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), el objetivo 6 demanda «Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos». Sus metas incluyen tanto los aspectos del ciclo del agua como los sistemas de saneamiento y además se relaciona con otros ODS, principalmente con salud, educación, crecimiento económico y ambiente (ONU, 2017), ya que el agua es un vínculo importante entre la sociedad-ambiente. Para alcanzar las metas ODS, es necesario implementar una gobernanza del agua con una correcta gestión y participación social (CNA, 2015); se entiende como gobernanza del agua al conjunto de sistemas políticos, sociales, económicos y administrativos implementados para desarrollar y manejar los recursos hídricos y la entrega de servicios sanitarios en los diferentes niveles de la sociedad (Global Water Partnership, 2002).

El correcto seguimiento de una gobernanza del agua ayuda a crear marcos e instituciones legales y reglamentación pertinente, procesos de planificación, toma de decisiones y sobre todo, seguimiento (FAO, 2019) con el fin de llegar a soluciones viables. Sin embargo, esto aún no es posible, lo que ha provocado problemas como:

1) Aumento en la perforación de pozos y sistemas de bombeo durante el último medio siglo.

2) Sobreexplotación de acuíferos, el cual se estima que corresponde a un 20% en nivel mundial.

3) Agotamiento del recurso.

4) Contaminación de acuíferos.

5) Asignación no equitativa.

Todos estos problemas son producto de la falta de apoyo e información en los procesos de decisión relativos al manejo y uso del agua subterránea (UNESCO, 2017), por lo que se deduce que en el área de la gestión de éste recurso aún hay mucho en que trabajar.

Existen trabajos, como el de Re (2015) que proponen el término de “socio-hidrogeología”, cuyo objetivo es proporcionar prácticas de gestión con un apoyo sólido que incluye además de los datos hidrogeológicos, una base de datos más completa con una evaluación de las repercusiones socioeconómicas por la problemática del agua subterránea, para así promover la inclusión de la dimensión social en las investigaciones hidrogeológicas. Esto significa garantizar que los resultados de las investigaciones científicas no sólo se basen en las necesidades reales y en el conocimiento local, sino que también se difundan adecuadamente a los usuarios finales. Dicho trabajo considera que los aspectos clave de la socio-hidrogeología incluyen: 1) la evaluación del impacto de las actividades humanas en los recursos de aguas subterráneas, 2) la evaluación del impacto socioeconómico de los recursos de aguas subterráneas (y sus cambios en cantidad y calidad) sobre la vida humana y bienestar, 3) la identificación de las partes interesadas involucradas, sus relaciones y posibles conflictos existentes, 4) promoción de un mejor uso de los resultados de un estudio hidrogeológico y 5) la búsqueda de la disminución de la brecha entre la ciencia y la práctica desmitificando a la ciencia y los científicos.

### **3.3 Situación del agua en el nivel nacional**

En México, la encuesta Intercensal del INEGI (2015) arrojó un total de 119.9 millones de habitantes con el 23 % de población rural; durante las últimas décadas, la población rural ha ido descendiendo significativamente y a su vez las localidades urbanas han ido acelerando su crecimiento, lo que ha implicado fuertes presiones sobre el ambiente urbano por el incremento de infraestructura y de la demanda de servicios, entre ellos la demanda del recurso hídrico (CONAGUA, 2016).

En el país existen normas y leyes para lograr el uso sostenible del recurso hídrico y, quien se encarga de administrar y preservar las aguas nacionales y bienes inertes, es la Comisión Nacional del Agua o CONAGUA, en corresponsabilidad con los tres órdenes de gobierno (federal, estatal y municipal) y la sociedad en general (SEMARNAT, 2018). Este órgano descentralizado de la SEMARNAT ha identificado 731 cuencas hidrológicas, las cuales son las unidades del terreno definidas por la división natural de las aguas debido a la conformación del relieve; estas cuencas a su vez administrativamente se encuentran organizadas en 37 Regiones Hidrológicas (RH) (figura 2) que representan los límites naturales de las grandes macrocuencas de México y son empleadas para el calcular el agua renovable; finalmente, éstas últimas se agrupan para conformar las unidades básicas para la gestión de los recursos hídricos (figura 3), las cuales respetan la división política municipal para facilitar la administración e integración de datos socioeconómicos, dividiéndose en trece regiones:

I. Península de Baja California

II. Noroeste

III. Pacífico Norte

IV. Balsas

V. Pacífico Sur

VI. Río Bravo

VII. Cuencas Centrales del Norte

VIII. Lerma-Santiago-Pacífico

IX. Golfo Norte

X. Golfo Centro

XI. Frontera Sur

XII. Península de Yucatán

XIII. Aguas del Valle México.



Figura 2. Regiones Hidrológicas de México. Tomado de CONAGUA 2016.



Figura 3. Regiones Hidrológico-Administrativas tomado de CONAGUA 2016.

De acuerdo con el cálculo de la precipitación normal 1981-2010, México recibe anualmente 449,471 millones m<sup>3</sup> de agua en forma de precipitación. Con los últimos cálculos hidrológicos disponibles al 2015, se estima que el 72.5 % de esa precipitación se evapotranspira, debido principalmente a que en más de la mitad del territorio nacional predominan las zonas áridas y semiáridas (González-Abraham *et al.*, 2012; CONAGUA, 2016) el 21.2 % se escurre por ríos y arroyos y el 6.3 % restantes se infiltra y recarga acuíferos. Tomando además en cuenta las entradas y salidas de agua con respecto a los países vecinos, se cuenta con 446,777 millones de m<sup>3</sup> de agua dulce renovable al año (también llamada disponibilidad natural media).

Los ríos y arroyos del país constituyen una red hidrográfica de 633,000 km de longitud. Por los cauces de los 51 ríos principales fluye el 87 % de la escorrentía superficial de la república y sus cuencas cubren el 65 % de la superficie territorial continental del país. Para el caso del agua subterránea, su importancia se manifiesta en la magnitud del volumen utilizado por los principales usuarios. El 38.9 % del volumen total concesionado para consumo o usos consuntivos (figura 4), pertenece a este origen subterráneo.

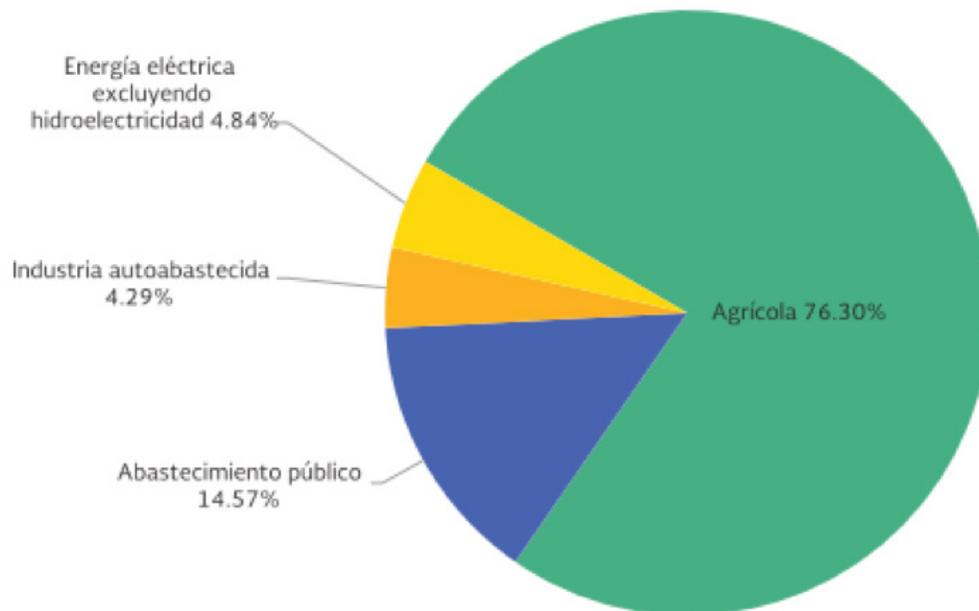
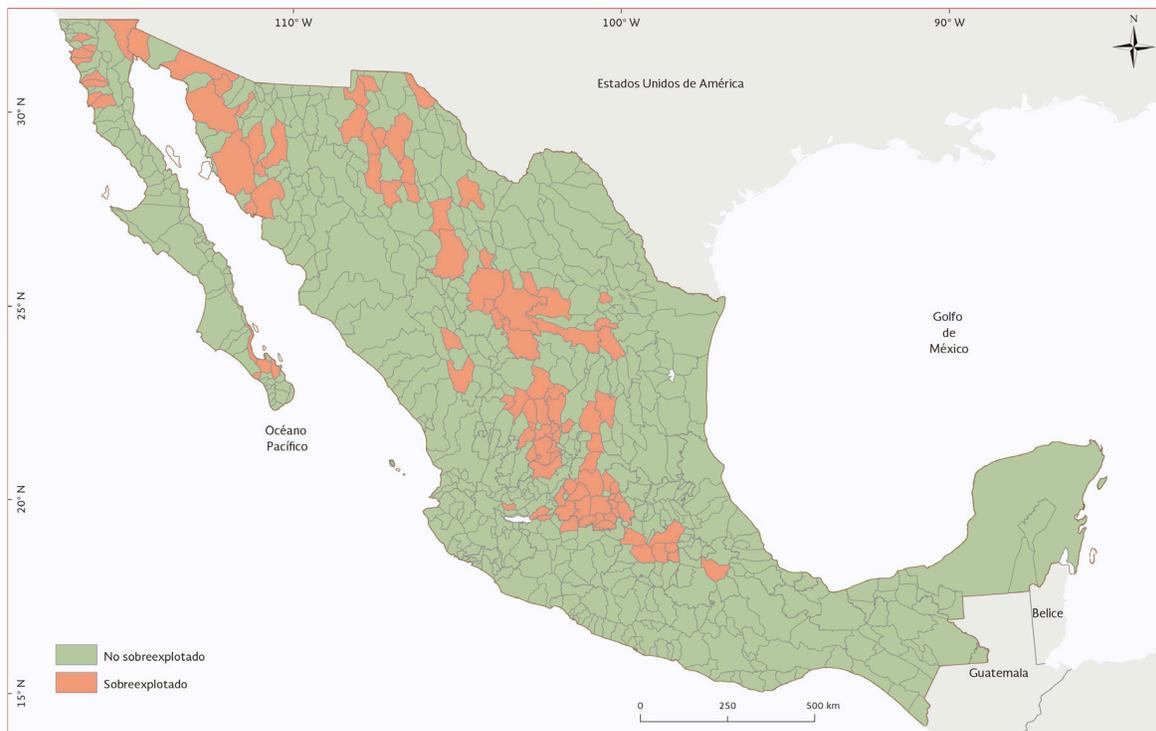


Figura 4. Distribución de volúmenes concesionados por usos agrupados consuntivos, tomado de CONAGUA 2016.

Para fines de la administración del agua subterránea, el país se divide en 653 acuíferos (DOF, 2015b). En función de la relación extracción/recarga, la CONAGUA definió el número de acuíferos que se consideran sobreexplotados, de los cuales se identificaron 105 en esta condición (figura 5). Para ese mismo año se identificaron 32 acuíferos con presencia de suelos salinos y agua salobre, localizados principalmente en la Península de Baja California y en el Altiplano Mexicano (que incluye la parte oeste del estado de San Luis Potosí). En estas regiones existen condiciones de poca precipitación pluvial, altos índices de radiación solar y por tanto de evapotranspiración, así como la presencia de aguas congénitas y de minerales evaporíticos de fácil disolución. En el caso de los acuíferos costeros, se registraron 18 con intrusión marina (figura 6) (CONAGUA, 2016).



Fuente: CONAGUA (2016)

Figura 5. Condición de los acuíferos en 2015. Tomado de CONAGUA 2016.

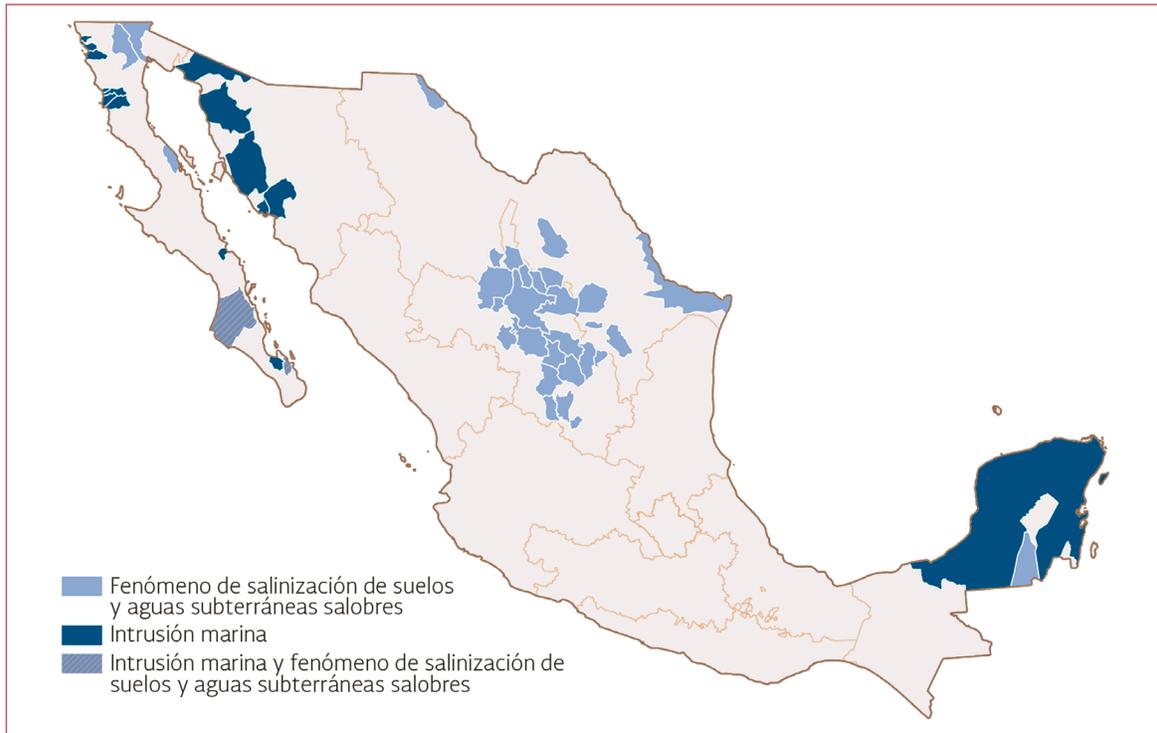


Figura 6. Acuíferos con intrusión marina y/o salinización de suelos y aguas subterráneas salobres.  
Tomado de CONAGUA 2016.

Con el fin de revertir la sobreexplotación de los acuíferos y cuencas de México, restaurar el equilibrio hidrológico y salvaguardar el abastecimiento público y el desarrollo socioeconómico, el Gobierno Federal dispone de diversos ordenamientos: vedas, reglamentos, reservas y rescates (CONAGUA, 2016). Estos ordenamientos restringen la extracción del agua subterránea en diversas zonas del país (figura 7).

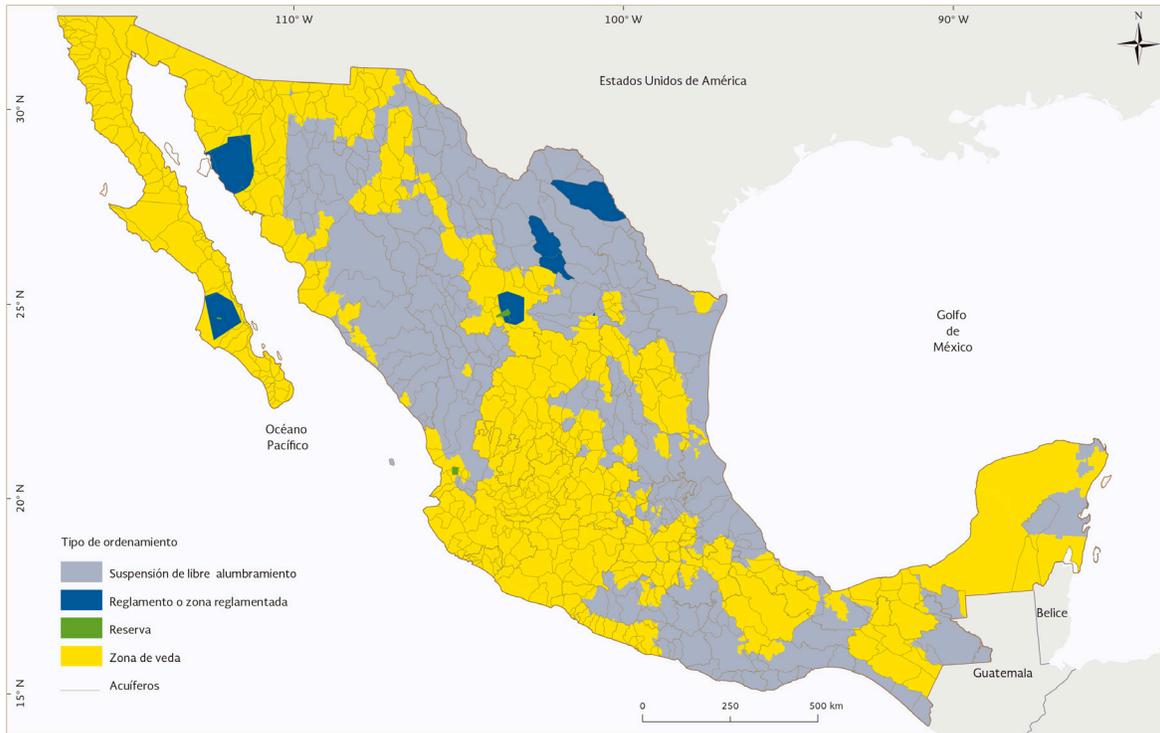


Figura 7. Ordenamientos de agua subterránea en 2015. Tomado de CONAGUA 2016.

México participó activamente en la Cumbre de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo Sostenible en Nueva York con el fin de aprobar la Agenda para el Desarrollo Sostenible, siendo uno de los países más activos en los foros de consulta, participando y liderando el proceso de negociación (ONU MÉXICO, S.D.) Para los Objetivos de Desarrollo del Milenio establecidos en el año 2000, los cuales tuvieron la finalidad de reducir la pobreza extrema para 2015, México cumplió la meta del objetivo 7 “Garantizar la sostenibilidad del medio ambiente”, la meta 7C establecía reducir a la mitad la proporción de personas sin acceso sostenible a fuentes mejoradas (aquella que está protegida contra la contaminación exterior, especialmente de materia fecal) de agua potable entre el año de referencia 1990 y el 2015 (CONAGUA, 2016). Para 2015, el 96% de la población nacional (96 % urbana y 92 % rural) tenía acceso a fuentes mejoradas de agua potable (CONAGUA, 2016).

### 3.4 Las zonas áridas

Los ecosistemas áridos y semiáridos ocupan al menos un tercio de la superficie terrestre, y es probable que se expandan debido a la desertificación inducida por la actividad humana (Reynolds J.F. *et al.*, 2005). En este tipo de ambientes la disponibilidad del agua constituye el principal factor limitante para la productividad primaria y tiene efectos directos e indirectos sobre los procesos ecosistémicos, culturales y socio económicos; en estos, el ingreso de agua a través de las precipitaciones, además de ser escaso, es altamente variable en el tiempo y en el espacio (Noy-Meir, 1973).

El agua subterránea en las zonas áridas representa la principal o incluso, la única fuente de agua asequible para uso humano. Las características del ciclo hidrológico en estas regiones son peculiares debido a que se caracterizan por presentar una precipitación anual baja (0-400 mm año<sup>-1</sup>), altas temperaturas (hasta 50°C en algunas zonas) y altas tasas de evaporación potencial (hasta 4,000 mm año<sup>-1</sup>), siendo esta mayor que la precipitación (Ezcurra, 2006). En estas zonas, los cambios de uso de la tierra y la pérdida creciente de cobertura vegetal desencadenan procesos progresivos de desertificación (Barchuk, 1988). Estas pérdidas de cobertura ocasionan la reducción en la productividad biológica, la alteración de los ciclos biogeoquímicos e hidrológicos, pérdidas económicas (Tongway *et al.*, 2004) y modifica los flujos de evaporación, escorrentía e infiltración (Noy-Meir, 1973). Ludwig *et al.* (2004) propone que la cobertura del suelo es un indicador de la "salud" de los ecosistemas, para lo cual se utilizan modelos de umbrales como alternativos a los modelos de equilibrio; estos representan las condiciones necesarias para modificar la estructura y función del ecosistema más allá de los límites de su resiliencia ecológica (capacidad de respuesta a un disturbio) desarrollando estados alternativos (Folke *et al.*, 2004).

La resiliencia de los ecosistemas áridos y semiáridos se refuerza en la capacidad de los parches de retención de recursos (parches de vegetación) (Barchuk, 1988; Scheffer *et al.*, 2009), debido a que las raíces de la vegetación conservan el suelo y el agua a través de dos medios: 1) las raíces pueden proteger directamente el desprendimiento del suelo y aumentar la infiltración, lo que reduce la escorrentía y la pérdida de suelo (Gyssels *et al.*, 2006) y 2) las raíces pueden mejorar las propiedades del suelo al aumentar los niveles de materia orgánica, aumentar la cantidad de agregados estables del suelo y estabilizar las estructuras de la capa del suelo y posteriormente reducir la tasa de desprendimiento del suelo. Así, la importancia de la cobertura del suelo radica en que ayuda determinar la acumulación de flujo superficial y la recarga de acuíferos (CONAGUA, 2016). Sin embargo, muchos de los paisajes áridos y semiáridos se caracterizan por tener una cubierta de vegetación espacialmente discontinua, que refleja la limitada disponibilidad de agua y

nutrientes, afectando la escorrentía y las áreas de fuentes y sumideros de sedimentos (Imeson y Prinsen, 2004).

Para el caso específico del estado de San Luis Potosí, su altiplano se encuentra conformado por zonas áridas y semiáridas hacia la porción norte, centro y oeste, lo que significa que los recursos de agua subterránea son limitados. La recarga natural actualmente es relativamente baja y la extracción ha producido diversos efectos no deseados en el ambiente como: 1) abatimiento progresivo del nivel del agua en pozos, 2) cambios en la calidad del agua extraída, 3) hundimientos del terreno (o subsidencias) y 4) disminución del caudal base de ríos y manantiales en cuencas, entre otros (Cardona-Benavides *et al.*, 2006).

### 3.5 Reseña histórica de Moctezuma

Los orígenes del municipio de Moctezuma son inciertos ya que existen variaciones en las fechas por diferentes estudios (Aguilar M., 2018). La fecha hasta el momento más aceptada de su fundación es en el año de 1552. En ese entonces el lugar se llamaba “San Jerónimo del Agua Hedionda” (Pedraza M., 1995), por el olor proveniente de agua acumulada en fosas naturales (Aguilar M., 2018).

Al momento de la conquista española en el siglo XVI, los huachichiles habitaban el área, éstos eran nómadas, cazadores-recolectores (formaban parte de lo que los españoles denominaron la Gran Chichimeca). La conquista plena de su territorio por parte de los españoles fue difícil mientras duró la guerra chichimeca (1550-1598); pero al firmarse la paz, por obra del capitán mestizo Miguel Caldera, empezaron a formarse en la región algunos asentamientos humanos con ayuda de los “regalos de paz” (carne, granos, ropa, herramientas...), que la Corona repartía gratuitamente a los indios pacificados (Montejano, 1994).

En agosto de 1591 Juan de la Hija, como capitán protector de los naturales de Venado y Charcas, llevó del Cuicillo, Zac. a 400 familias tlaxcaltecas destinados a Charcas y Venado con el fin de asentar allí varias colonias por mandato del virrey Don Luis de Velasco con el propósito de colonizar a los huachichiles (ya que aún eran muy conflictivos y violentos) (Montejano, 1994; Pedraza M., 1995; Aguilar M., 2018). Las familias tlaxcaltecas se distribuyeron en el área, fundándose primeramente el “barrio de Tlaxcala” (el más antiguo de Moctezuma) y Venado; sin embargo la tierra asignada a cada familia para sembrar y el agua fueron insuficientes, por lo que algunos indios (tanto tlaxcaltecas como huachichiles pacificados) migraron de manera ilegítima de Venado a San Jerónimo del Agua Hedionda y el Valle de San Antonio (Pedraza M., 1995; Aguilar M., 2018).

La inicial fracción de San Jerónimo de la Hedionda, subordinada a San Sebastián Ojo de Agua del Venado, se desarrolló muy despacio. Los indios tenían su propio gobierno, pero sujetos a un teniente de alcalde, representante del alcalde mayor de San Luis Potosí. Para 1674 la población no era muy grande, apenas se contaban con doce familias y siete solteros. Vivían muy contentos en aquel lugar, deleitoso por la abundancia de sus aguas; no tenían ninguna queja y acudían a la doctrina que cada mes impartían los religiosos del Venado (Montejano, 1994).

Entre los siglos XVI y XVII no se tienen registros sobre San Jerónimo del Agua Hedionda. A partir del siglo XVIII empezaron a formarse grandes haciendas en el área, siendo la hacienda de Las Cruces la principal de ellas la cual abarcaba parte de San Jerónimo del Agua Hedionda, Venado y Salinas. La hacienda había sido formada por la poderosa Casa Rul de los mineros de Guanajuato y duró desde finales del siglo XVIII, XIX y parte del XX, pues al ejecutarse las disposiciones agrarias después de la revolución mexicana, la hacienda de Las Cruces quedó fraccionada entre ejidatarios (Pedraza M., 1995).

En 1750 se inició la construcción de la actual iglesia parroquial y para 1754 se empezó a bautizar a los naturales. La población se desarrolló mucho y al parecer, las guerras de independencia no alteró mucho la tranquilidad de San Jerónimo del Agua Hedionda (Montejano, 1994). Ya consumada la independencia, el 19 de julio de 1826 el Congreso Constituyente del estado decretó la división del Estado en diez partidos y se ordenó que el partido de Venado estaría formado por las municipalidades de Venado, Charcas y Hedionda. En esa fecha se le cambió del nombre de San Jerónimo del Agua Hedionda a sólo "Hedionda" (Pedraza M., 1995).

El 22 de enero de 1863 se ordenó que el partido de Venado se denominara partido de Moctezuma, reconociendo por cabecera la ciudad de la Hedionda, que posteriormente se cambió el nombre a "Ciudad Moctezuma" para honrar al general José Esteban Moctezuma (1779-1838) (Pedraza M., 1995). El desarrollo de Moctezuma se aceleró en 1889 al inaugurarse el ferrocarril México-Laredo, que cruza todo el municipio de sur a norte (Montejano, 1994).

El "Ojo de Agua" se identificó como un manantial hasta inicios del siglo pasado; éste es una formación natural que ha sido vital para el desarrollo ya que ha abastecido por siglos la cabecera municipal de Moctezuma, siendo su uso principal para el ganado y el doméstico. Debido al crecimiento y desarrollo de Moctezuma, el manantial ha tenido diversas modificaciones para su mejor aprovechamiento. A partir de los años 30 del siglo XX se empezaron a hacer algunos pozos poco profundos de manera rústica para extraer más agua. Para los años 50 el ing. Alfonso Difur, hermano del entonces

presidente municipal, empezó a modificarlo como parque recreativo con veredas, áreas de descanso y juego y anuncios informativos (sobre la flora y fauna del lugar). En los años 60, se construyeron albercas y toboganes que aún existen. Fue en los años 70 que instalaron el sistema de bombeo eléctrico para la extracción de los acuíferos. En los 80 se construyeron salones que servían para eventos como festivales, bodas, XV años, etc. Empezó así el manantial, a tomar forma de balneario público como se conoce hasta ahora (Aguilar M., 2018).

La última fecha de remodelación fue en 2012, se realizó una reforestación (Aguilar M., 2018). La administración municipal (2012-2015) construyó una sección de albercas diseñada para que con la misma corriente del río las albercas se limpiaran, sin la necesidad de darles mantenimiento ni tener que extraer el agua sucia y reemplazarlas por nueva (como fueron las albercas construidas previamente); sin embargo, al terminar la construcción de estas albercas, la cantidad de agua del manantial disminuyó, con ello el cauce del río empezó a decrecer y hasta el momento el agua no ha vuelto a su nivel (Aguilar M., 2018).

## 4. MARCO CONCEPTUAL

---

### 4.1 El agua subterránea y el ciclo hidrológico

Se denomina ciclo hidrológico al movimiento del agua a través de los componentes del ecosistema: hidrósfera, atmósfera, litósfera y biósfera de manera continua y perdurable (Freeze y Cherry, 1979). La precipitación de lluvia o nieve es interceptada por la vegetación antes de llegar al suelo e infiltrarse en él. Posteriormente el agua fluye, de manera superficial (por escorrentía), o de manera subterránea entre las capas geológicas. Los flujos de agua, continúan vía transpiración (a partir de la pérdida de agua de los organismos) y evaporación (por la pérdida de agua por los componentes abióticos), en donde el agua pasa a la atmósfera, permaneciendo como humedad y eventualmente se condensa y precipita, iniciando nuevamente su recorrido. Los procesos básicos del ciclo hidrológico (precipitación, evapotranspiración y escorrentía) hacen posible la vida en la Tierra, ya que modera el clima y regulan procesos bióticos y abióticos así como funciones ambientales de los ecosistemas y controlan procesos y patrones de los paisajes terrestres (Campos, 1998).

El agua de lluvia que logra infiltrarse más allá de los horizontes del suelo y llegar al subsuelo eventualmente se puede almacenar y transmitir por medio de cualquier formación rocosa, formaciones rocosas hidráulicamente conectadas entre sí o material no consolidado denominados "acuíferos". Los acuíferos deben tener la suficiente porosidad para poder almacenar el agua y permeabilidad para permitir que ésta fluya a través del material que las contenga (Price, 2003; Stevanovic, 2011) para poder ser extraídas para su aprovechamiento contemplando además, que tenga la calidad adecuada para el uso al que se destine.

Entonces, se denomina agua subterránea al agua infiltrada proveniente de la precipitación y que alcanza el nivel de saturación (Cardona, 1990; Carrillo-Rivera *et al.*, 2008; Sogaard and Madsen, 2013); siendo un componente fundamental en el ciclo hidrológico. Debido a la dinámica del agua subterránea, durante su recorrido ocurren distintos procesos como: 1) procesos químicos: como disolución, hidratación, hidrólisis, óxido-reducción, precipitación química, intercambio de base, reducción de sulfatos, concentración y ultrafiltración y ósmosis, 2) procesos físicos: como la lubricación, la modificación en la presión de poro, transporte de agua, materia acuosa y no acuosa y calor (Tóth, 1999).

El agua subterránea representa una porción importante de los recursos potenciales de agua dulce en la Tierra, además que está protegida naturalmente, a diferencia del agua superficial que puede ser más expuesta a la contaminación. Su importancia también radica en que cumple una función ambiental indispensable debido a su contribución a los manantiales, caudales de ríos, lagos, humedales y estuarios, además de ser considerada como un agente geológico debido a los procesos en los que interviene.

El agua subterránea presenta una preocupación particular en las regiones áridas y semiáridas en donde el recurso hídrico es limitado, ya que puede ser la única o la principal fuente de agua para el consumo humano. Debido a las condiciones climáticas de estas zonas, la recarga del agua puede ser insuficiente, pues es una característica de los climas B, propios de las zonas áridas y semiáridas, el déficit de la precipitación con relación con la mayor evaporación potencial (García, 2004) lo que en conjunto con el rápido aumento en el consumo de agua debido al crecimiento poblacional e industrial (Al-rizouq *et al.*, 2019) provoca una disminución en la descarga de la misma, que genera problemas ambientales y sociales.

La ciencia que estudia el agua subterránea se conoce como hidrogeología, geohidrología o hidrología subterránea, la cual puede definirse como la parte de la hidrología que analiza el almacenamiento, circulación y distribución de las aguas terrestres en la zona saturada de las formaciones geológicas, teniendo en cuenta sus propiedades físicas y químicas, sus interacciones con el componente abiótico y biótico del ecosistema y sus reacciones a la acción del hombre (Custodio y Llamas, 1996).

## **4.2 Teoría de los Sistemas de Flujo de Agua Subterránea**

Para comprender el funcionamiento del agua subterránea una de las teorías más útiles es la Teoría de los Sistemas de Flujo de Agua Subterránea (TSF) propuesta por Tóth (1963); en ésta teoría se desarrolla un análisis sistémico y evaluación de la interacción del agua subterránea en conjunto con otros componentes del ambiente como vegetación, suelo, geología, geomorfología, química del agua, entre otros (Cardona, 1990). El funcionamiento del agua subterránea bajo el efecto gravitacional se rige por parámetros como el clima, topografía y referente geológico, los cuales permiten la formación de tres tipos de sistemas de flujo de agua subterránea: locales, intermedios y regionales (figura 8) (Peñuela-Arévalo and Carrillo-Rivera, 2013a; Fachinello *et al.*, 2015). Estos flujos presentan tiempos de residencia de agua subterránea diferentes, siendo menores los locales y mayores los regionales. Desde que el agua se infiltra, su composición química

va cambiando, de acuerdo con las condiciones del suelo, los materiales geológicos que atraviesa y sus componentes de flujo (Cardona, 1990); por ejemplo, para el caso de los flujos regionales, éstos presentan una mayor profundidad y distancia de recorrido, por lo que la interacción agua-roca es mayor, lo que provoca que el agua en su zona de descarga presente temperaturas, salinidades y pH mayores y contenido de oxígenos disueltos menores que en el flujo local (Carrillo-Rivera *et al.*, 2008; Peñuela-Arévalo and Carrillo-Rivera, 2013a).

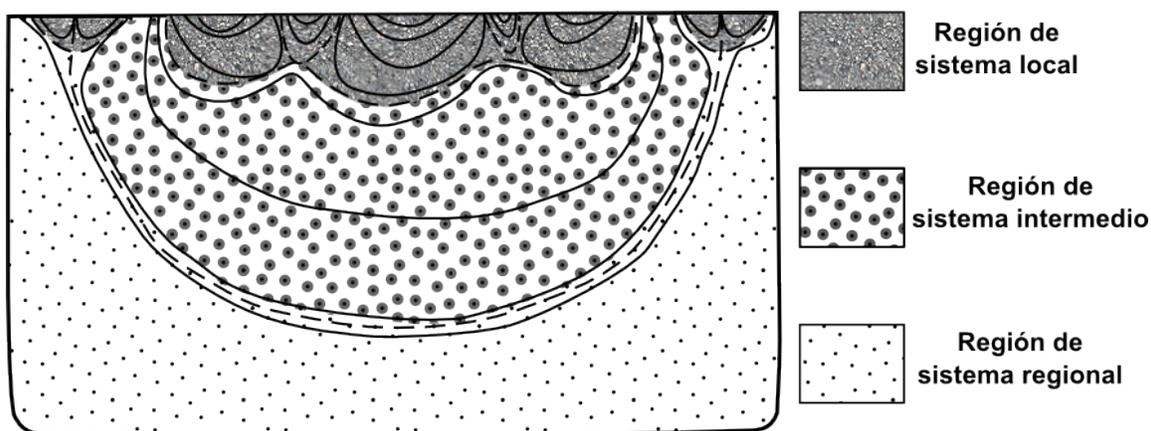


Figura 8. Sistemas de flujo de agua subterránea. Tomado y modificado de Freeze y Cherry 1979.

Considerando lo anterior, se comprende la importancia del estudio geoquímico del agua subterránea para estudiar la evaluación de flujo y la calidad de la misma, lo cual es indispensable para indagar sobre el origen y dirección de flujo. La composición geoquímica está controlada por varios factores como la evaporación, la disolución-precipitación, la erosión de los silicatos, la oxidación-reducción, las reacciones de absorción y de intercambio, la transformación de la materia orgánica y los procesos de mezcla (Carrillo-Rivera *et al.*, 2007; Sogaard and Madsen, 2013).

El agua subterránea va encontrando su equilibrio químico con las capas geológicas circundantes a medida que se va moviendo a través del subsuelo. El tipo de reacciones de equilibrio que van ocurriendo desde que el agua entra al subsuelo hasta que llega a su zona de descarga están determinadas por la composición inicial del agua y la geología específica del subsuelo, lo que en dependencia del caudal del agua y el tiempo de residencia y distancia de recorrido puede dar una composición final totalmente diferente (Sogaard y Madsen, 2013).

La TSF es indispensable para la comprensión de: 1) la disponibilidad de agua subterránea y 2) la interacción entre el agua subterránea y otros componentes del ambiente (Carrillo-Rivera *et al.*, 2008). Para comprender la complejidad de las aguas subterráneas es necesario considerar que un sistema hidrogeológico es dinámico ya que ocurren interacciones tanto en ésta como en su entorno natural (Tóth, 1999). Los elementos que pueden ser observados en superficie (manantiales, lagos...) son la evidencia y el resultado de los diferentes procesos que se originan dentro del sistema, desde que el agua se infiltra de la zona insaturada a la zona saturada (zona de recarga), posteriormente se transporta por el medio rocoso (tránsito) y finalmente emana a la superficie (zona de descarga), a éstos se les denomina componentes de flujo (figura 9) (Freeze y Cherry, 1979; Carrillo-Rivera *et al.*, 2008; Peñuela-Arévalo y Carrillo-Rivera, 2013a).

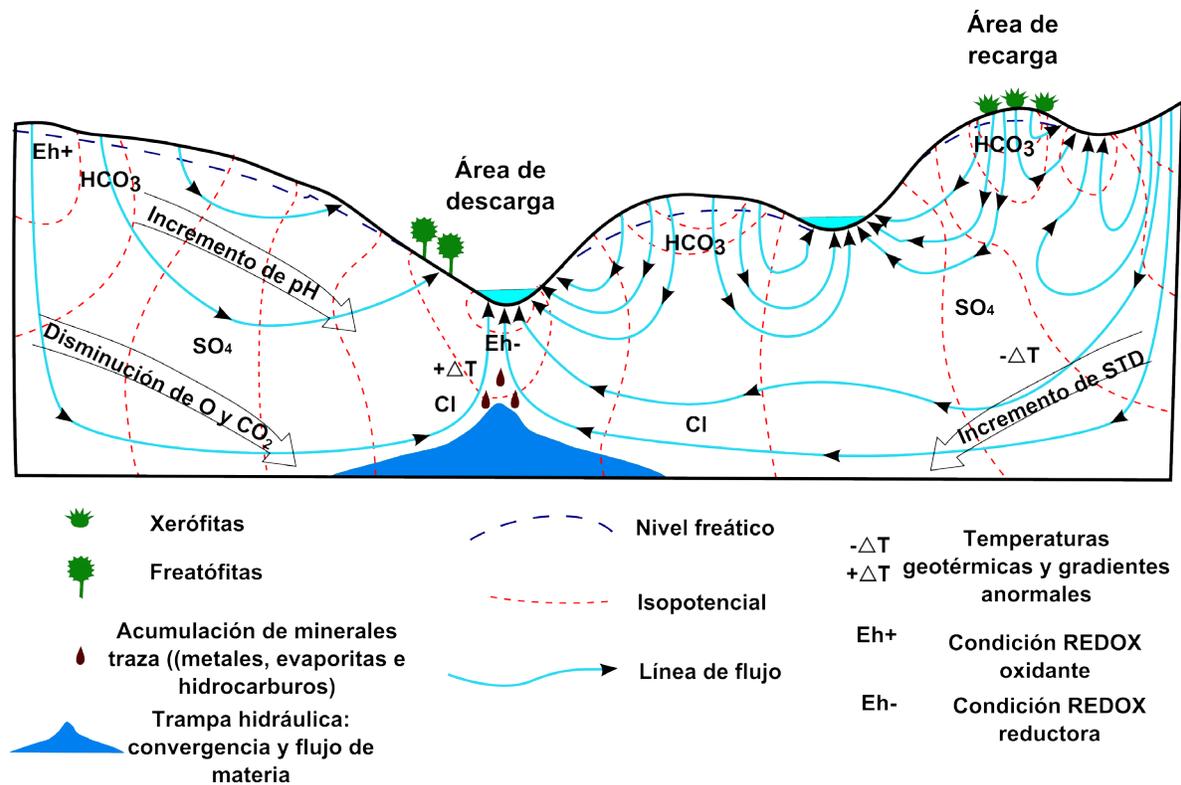


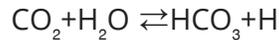
Figura 9. Modelo de los componentes del Sistema de Flujo Subterráneo. Tomado y modificado de Tóth, 2000.

La recarga de agua subterránea se produce solo cuando el agua fluye por debajo del suelo y se infiltra en la zona saturada (Yeh *et al.*, 2016). Esta puede ocurrir naturalmente por precipitación, corrientes superficiales, lagos y como un aporte antropogénico procedente del riego y la urbanización. Las zonas de recarga, a diferencia de las zonas de descarga, son más difíciles de identificar ya que su ocurrencia no muestra alguna evidencia física como un cuerpo de agua superficial. Los indicadores de éste componente pueden ser la conductividad hidráulica (ya que puede permitir la infiltración del agua de lluvia), una elevación topográficamente alta, un nivel freático somero, un suelo ácido y poco desarrollado con poca materia orgánica, baja concentración de sodio o sales y una vegetación xerófila (Peñuela-Arévalo y Carrillo-Rivera, 2013a). Aquí, la vegetación ejerce un papel importante sobre los flujos de entrada y salida de agua en el sistema (D'Odorico P *et al.*, 2010). Un ejemplo de ello son las plantas freatófitas, que juegan un rol indispensable al vincular las partes superficiales y subterráneas del ciclo hidrológico y de nutrientes.

Dos tipos de recarga son generalmente distinguidas: recarga directa y recarga indirecta. La recarga directa es el agua agregada al acuífero que excede los déficits de humedad del suelo y la evapotranspiración por filtración vertical directa de precipitación a través de la zona no saturada. La recarga indirecta resulta de la infiltración al nivel freático después de la escorrentía y la localización en las juntas, como estanques en áreas bajas, lagos o a través de lechos de cursos de agua superficiales. Las dos categorías distintas de recarga indirecta son: (1) la asociada con los cursos de agua superficial y (2) la forma localizada resultante de la concentración de agua en la superficie horizontal en ausencia de canales bien definidos. Además, la recarga se divide en recarga difusa y discreta. El primero se refiere a la infiltración de agua a través del subsuelo y el segundo a la recarga de agua subterránea a través de una red de aberturas localizadas (como rocas fracturadas) que pueden transportar rápidamente tanta agua como contaminantes (Stevanovic, 2011).

Durante el tránsito, varios factores afectan la ocurrencia y el movimiento de las aguas subterráneas, como la litología, la estructura geológica, la pendiente, el patrón de drenaje, la forma del terreno, el uso del suelo, la cobertura del suelo, el clima, la precipitación (cantidad, duración, intensidad, frecuencia), escorrentía y estancamiento del agua, evapotranspiración, propiedades hidráulicas del suelo, etc. (Stevanovic, 2011).

En un inicio el agua en el suelo es ácida debido a la reacción del CO<sub>2</sub> con el agua (por la concentración de CO<sub>2</sub> que hay en los poros), lo que provoca que el agua (ácida) sea agresiva con los silicatos y carbonatos.

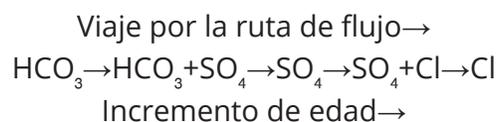


Esta reacción ácido-base, donde el dióxido de carbono presente en los poros del suelo reacciona con el agua infiltrada para formar el anión bicarbonato y el ion hidrógeno, los cuales tienden a acidificar el agua, lo que quiere decir que desde un inicio el agua se vuelve bicarbonatada (Freeze y Cherry, 1979).

Posteriormente, cuando el agua sale del suelo y llega a un acuífero ya el aporte de acidez normalmente disminuye o desaparece, volviendo al agua básica y perdiendo su capacidad para disolver carbonatos y alterar silicatos. Entonces, la evolución química del agua depende de los minerales con los que entre en contacto y la duración de dicho contacto (la cual depende de la velocidad del flujo subterráneo).

Lo que quiere decir que, a mayor tiempo de residencia, mayor será la salinidad del agua subterránea, aunque hay la excepción a la regla, por ejemplo, un agua que estuvo en contacto con cloruro sódico por un tiempo de residencia relativamente corto será más salina que un agua con un mayor tiempo de residencia que estuvo en contacto con cuarzo. Para el caso de las aguas que atraviesan formaciones calizas (como es el caso del presente trabajo), se adquirirá HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> y Ca (Freeze y Cherry, 1979).

Se conoce como secuencia de Chebotarev (1955) a la secuencia de evolución de iones principales, en la cual se explica de manera general que las aguas subterráneas tienden a evolucionar químicamente hacia la composición del agua de mar, en donde los cambios regionales en las especies de aniones dominantes son los siguientes:



Ocurriendo estos cambios conforme el agua se va moviendo desde zonas poco profundas de descarga activa a través de zonas intermedias donde el flujo es muy lento y el agua es vieja, debido a la solubilidad y abundancia de las sales en el subsuelo. Para el caso de la composición catiónica la secuencia análoga sería: Ca<sup>2+</sup>→Mg<sup>2+</sup>→Na<sup>+</sup>, sin embargo no es tan clara y es mayor el número de excepciones (Freeze y Cherry, 1979).

Las zonas de descarga son los sitios donde el agua mana en la superficie (que en México se llaman “ojos de agua”) y son un indicador importante del funcionamiento del agua subterránea debido a que estas ofrecen la información requerida en términos de física, química y características isotópicas relacionadas al área de recarga (Peñuela-Arévalo and Carrillo-Rivera, 2013b). Estas áreas de descarga representan la fase final de recorrido del flujo subterráneo, su composición química va cambiando desde que ésta se infiltra en la zona de recarga y hasta que mana en la de descarga; propiedades como la salinidad, temperatura, pH, OD (oxígeno disuelto) cambian (comúnmente aumentan) durante su recorrido y proporcionan una continuidad específica de caudal en el tiempo, la cual es condicionada por la presencia de cierto tipo de suelo y de una vegetación acorde con las variables del suelo-subsuelo, agua y ambiente en general (Peñuela-Arévalo and Carrillo-Rivera, 2013a).

Existen estudios en México relacionados con el análisis del funcionamiento del flujo subterráneo en los que se aplica la TSF de Tóth, como el trabajo de cuencas superficiales de San Luis Potosí (Cardona, 1990; Carrillo-Rivera *et al.*, 1996). En estos trabajos se propone la presencia de los tres sistemas de flujo y se identifica la descarga artificial (por medio de pozos) de flujos de tipo regional con ayuda de la hidrogeoquímica. Se estudiaron elementos como el litio (Li), el cual es un indicador de tiempo de residencia relativo (entre mayor sea su aparición sugiere un mayor tiempo de residencia y mayor recorrido del agua). También se identificaron elementos que pueden potencialmente afectar la salud humana, como el caso del fluoruro, que, además, es resultado de un inadecuado diseño y/u operación de pozos. El estudio de la presencia de ciertos elementos químicos en el agua extraída puede ayudar a comprender el funcionamiento de los sistemas de flujo para establecer la dinámica del agua subterránea en cualquier área de estudio y la definición de la jerarquía de los diferentes flujos presentes.

### 4.3 Manantiales

Se define manantial como un lugar en la superficie terrestre donde el agua subterránea se descarga desde el acuífero, creando un flujo visible. Esta descarga es causada por la diferencia en la elevación de la carga hidráulica en el acuífero y la elevación de la superficie de terreno donde se produce la descarga en conjunto con la geomorfología y estructuras geológicas (ya que el agua se mueve o asciende por donde encuentra camino (fallas, pliegues, tipo de roca) (Stevanovic, 2011). La descarga de los manantiales hacia la superficie terrestre ocurre debido a la fuerza de gravedad, con base en esto, se clasifican en dos grupos: 1) manantiales de gravedad, que emergen en condiciones no limitadas donde el nivel freático se cruza con la superficie terrestre (también conocidos como manantiales descendentes) (figura 10) y 2) manantiales artesianos que descargan

bajo presión debido a condiciones confinadas en el acuífero subyacente (manantiales ascendentes) (figura 11) (Stevanovic, 2011).

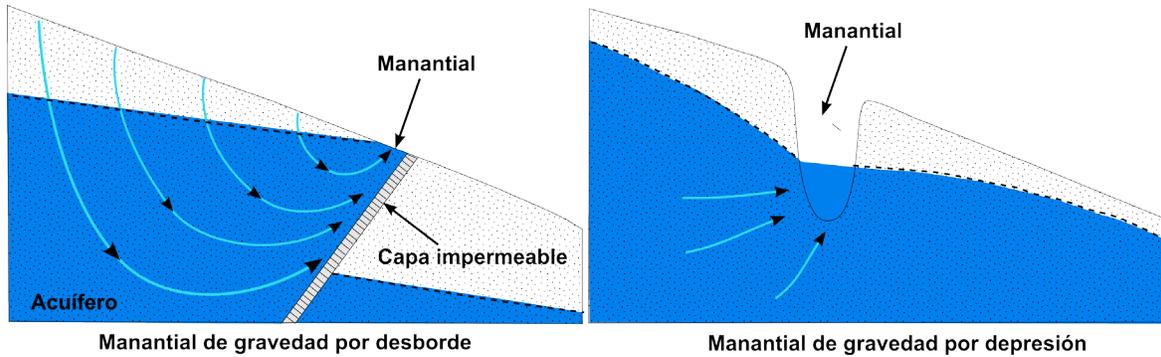


Figura 10. Ejemplos de manantiales por gravedad. Tomado y modificado de SMET and WIJK, 2002.

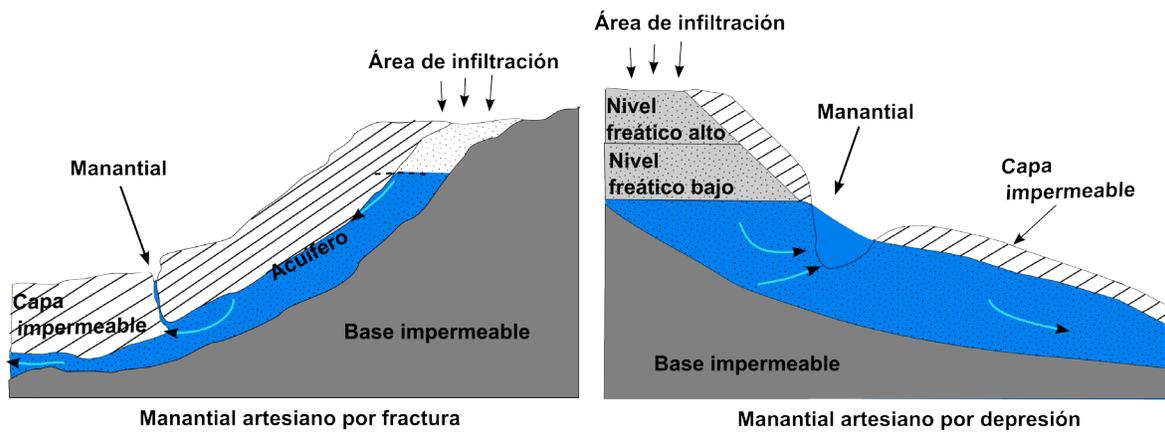


Figura 11. Ejemplos de manantiales artesianos. Tomado y modificado de SMET y WIJK, 2002.

Existen varias clasificaciones de manantiales, las cuales están basadas en diferentes características, siendo las clasificaciones más comunes: 1) Tasa de descarga y uniformidad, 2) carácter de la carga hidráulica que crea la descarga, 3) estructura geológica y geomorfológica que controla la descarga y 4) calidad y temperatura del agua (Stevanovic, 2011). Sin embargo, Springer y Stevens (2008) señalan que no hay una clasificación consistente o exhaustiva de sistemas de manantial. Así mismo, describieron 12 clases de manantiales con respecto a sus tipos de descargas en los que se incluyen la hidrogeología de su ocurrencia y los micro hábitats y ecosistemas que soportan.

Otra forma de clasificación de los manantiales es la que considera la temperatura también se conoce como “manantial termal”; un manantial termal tiene una temperatura más alta que la temperatura promedio anual del ambiente en la ubicación de descarga (Stevanovic, 2011; Sonney and Sonney, 2014). Según Ergorovy Luge (1967) la temperatura de las aguas subterráneas dependen de las condiciones climáticas y geotérmicas de la región dentro de los límites de la cual ellas se forman. Por lo general, se consideran termales en relación con la temperatura, aquellas aguas subterráneas que en su punto de salida poseen una temperatura superior 4°C o 5°C que la temperatura media anual.

Según Castany (1963), el agua termal se puede clasificar en cuatro familias:

Tabla 1. Clasificación de manantiales termales según Castany, 1963.

Tipo	Temperatura (°C)
Manantiales fríos	<20
Manantiales hipo-térmicos	Entre 20 y 35
Manantiales meso-térmicos	Entre 35 y C<50
Manantiales hiper-térmicos	>50

Aunque son pequeños en área, y generalmente están parcialmente aislados, los manantiales son hábitats altamente productivos y diversos que son reconocidos globalmente como puntos críticos de biodiversidad (Bogan *et al.*, 2014). Son un ejemplo arquetípico de una pequeña característica natural con un papel ecológico que se extiende más allá de su área (Hunter *et al.*, 2017). A menudo son los únicos hábitats acuáticos perennes o de larga duración en las regiones áridas.

Los manantiales en zonas áridas son ecológicamente análogos a las islas, ya que la fauna y flora que las habitan están prácticamente aisladas. El aislamiento de los manantiales de zonas áridas y su extensión limitada (y en ocasiones muy poco profunda) crea

condiciones que a menudo son inadecuadas para las especies acuáticas de hábitats fluviales, y como consecuencia, la biota en los manantiales ha evolucionado para adaptarse a estos ambientes inusuales (Davis, J.A., Kerezszy, A. Nicol, 2017). Actualmente, estos ecosistemas están ganando reconocimiento creciente, sin embargo, están en riesgo de diversas actividades antropogénicas, particularmente aquellas que involucran la extracción de agua subterránea (Davis, J.A., Kerezszy, A. Nicol, 2017).

El conocimiento del sistema de agua subterránea y la clasificación de los manantiales es indispensable para la conservación, gestión y restauración de los ecosistemas de manantiales y la protección del recurso subterráneo (Stevanovic, 2011).

## 5. LOCALIZACIÓN, CARACTERIZACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL MEDIO FÍSICO

### 5.1 Localización, extensión y vías de comunicación

El área de estudio se encuentra en el municipio de Moctezuma del estado de San Luis Potosí, México. El municipio tiene una extensión total de 1,285.50 km<sup>2</sup>, el cual corresponde al 2.10% del total de la superficie del estado. Moctezuma colinda al norte con el municipio de Venado, al este con Villa de Arista, al sureste con San Luis Potosí, al oeste con Salinas y al sur con Ahualulco y el estado de Zacatecas (CEFIM, 2012) (figura 12).

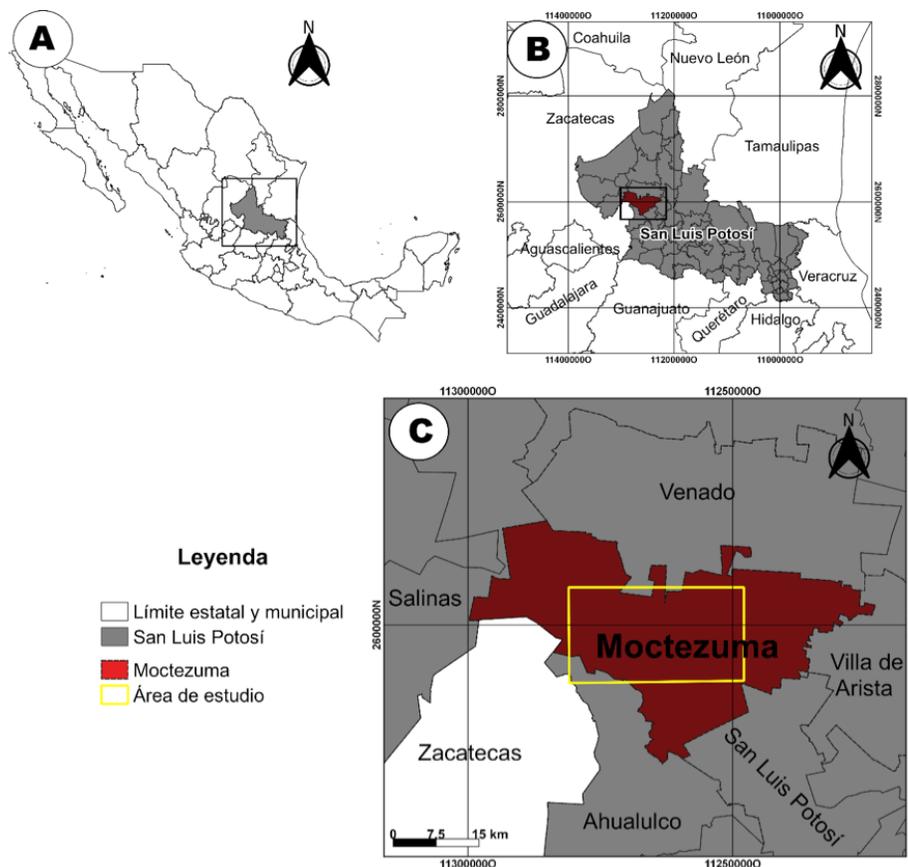


Figura 12. A) Estados Unidos Mexicanos, B) estado de San Luis Potosí y C) municipio de Moctezuma. El recuadro amarillo representa el área de estudio. Elaboración propia.

La cabecera municipal es la ciudad de Moctezuma y se encuentra los  $101^{\circ}05'$  de longitud oeste y  $22^{\circ}45'$  de latitud norte, con una altitud de 1,720 m (CEFIM, 2012). Específicamente, el área de estudio abarca un polígono rectangular de aproximadamente 700 km<sup>2</sup> en la parte E-SE de la cabecera municipal de Moctezuma. En el polígono se encuentran las localidades de Moctezuma, Cruces, Morados, Garabatillo, Santa Rita, Santa Teresa, Santa Catarina, Ejido Juárez, Los Ramírez, Las Alteñas, El Picacho, La Presa, San José del Grito El Pedernal y Los Tajos principalmente (figura 13).

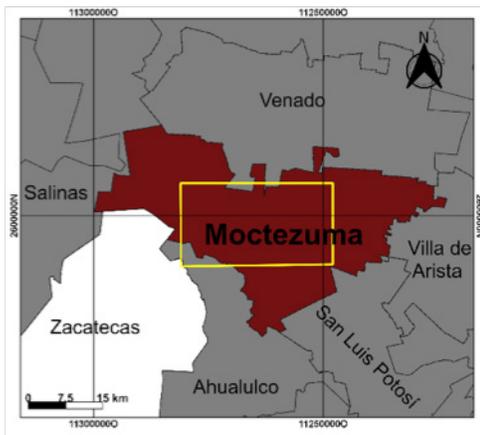
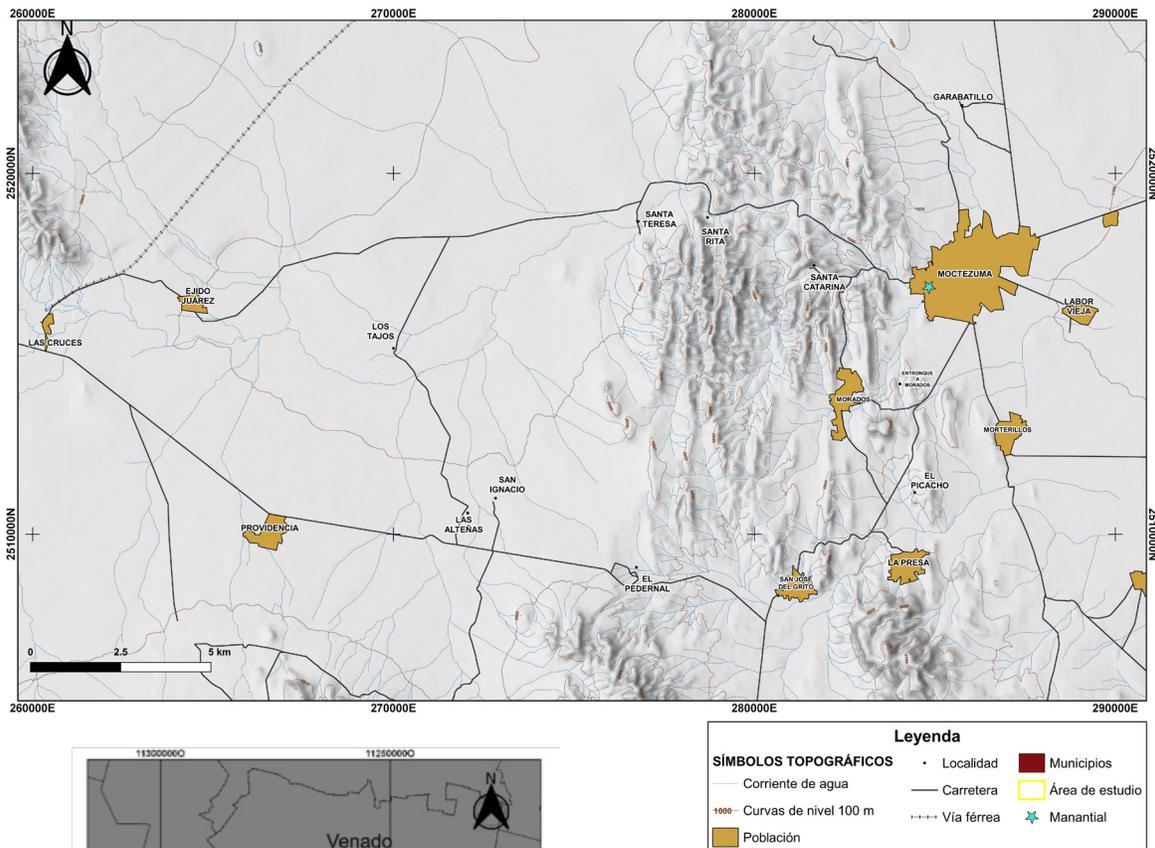


Figura 13. Mapa con las localidades principales del municipio de Moctezuma. Elaboración propia.

El área se sitúa dentro del Sistema Terrestre Ke1. Charcas, que Flores (1985) describe como plegamientos en forma de cordilleras amplias, cuestas alargadas, valles, planicies y con crestas. Dentro del polígono del área de estudio se pueden identificar algunos cerros conocidos como son: La Cal, Rincón los Coyotes, Rincón Verde, Huaracha, La Fundición, San Rafael, La Bola, De en medio y El Picacho principalmente (figura 14).

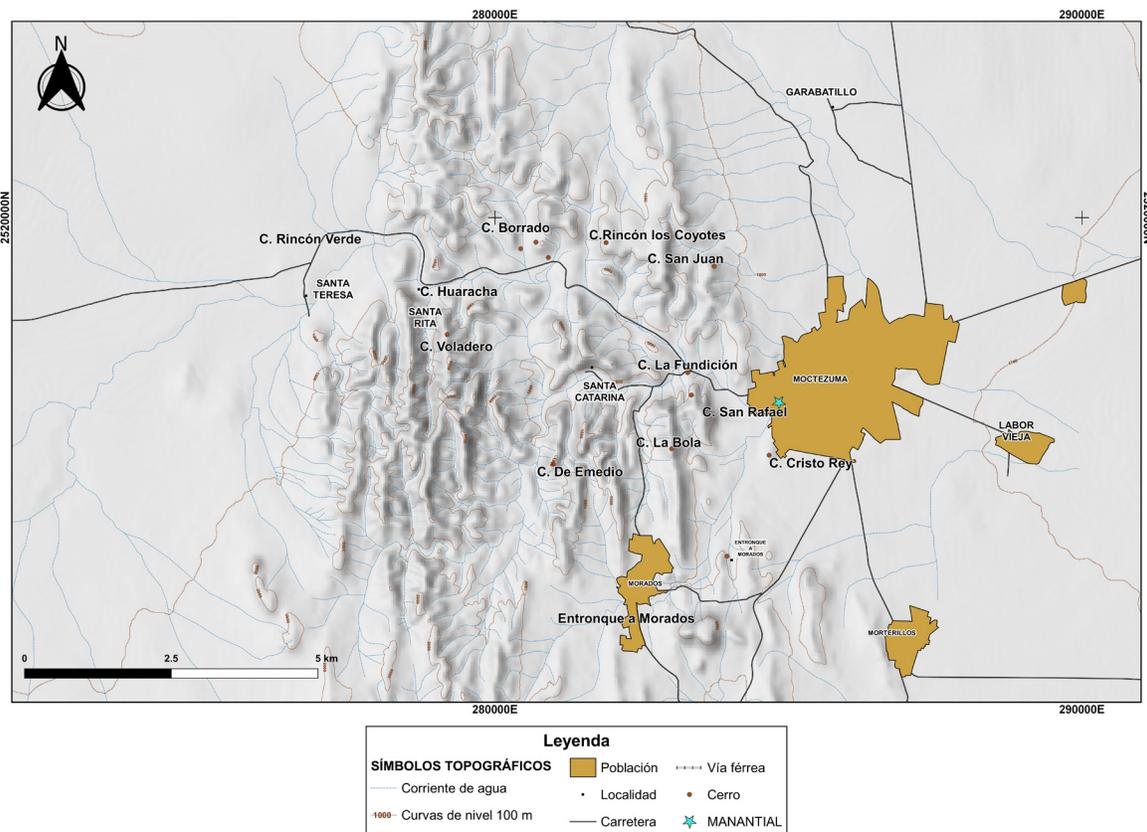


Figura 14. Mapa con los cerros principales en las inmediaciones a la cabecera municipal de Moctezuma. Elaboración propia.

La distancia de la capital del estado de San Luis Potosí, al municipio de Moctezuma es de aproximadamente 85 km y el acceso se realiza por la carretera federal Núm. 49, tramo San Luis Potosí-Zacatecas hasta el entronque en el kilómetro 25, y con la carretera federal Núm. 63 en el entronque a Charcas, y que pasa por la ciudad de Ahualulco.

Existen otras vías de comunicación, sin embargo, ésta se consideró como la ruta principal, por la facilidad de acceso a todos los caminos y veredas transitables a la zona de estudio.

## 5.2 Demografía

Según el Censo de INEGI (2015) El municipio de Moctezuma cuenta con una población total de 19,593 habitantes, de los cuales el 52.4 % corresponden a mujeres y 47.6% a hombres. La población ha tendido a aumentar durante las últimas décadas, sin embargo, éste crecimiento no ha sido significativo (figura 15).

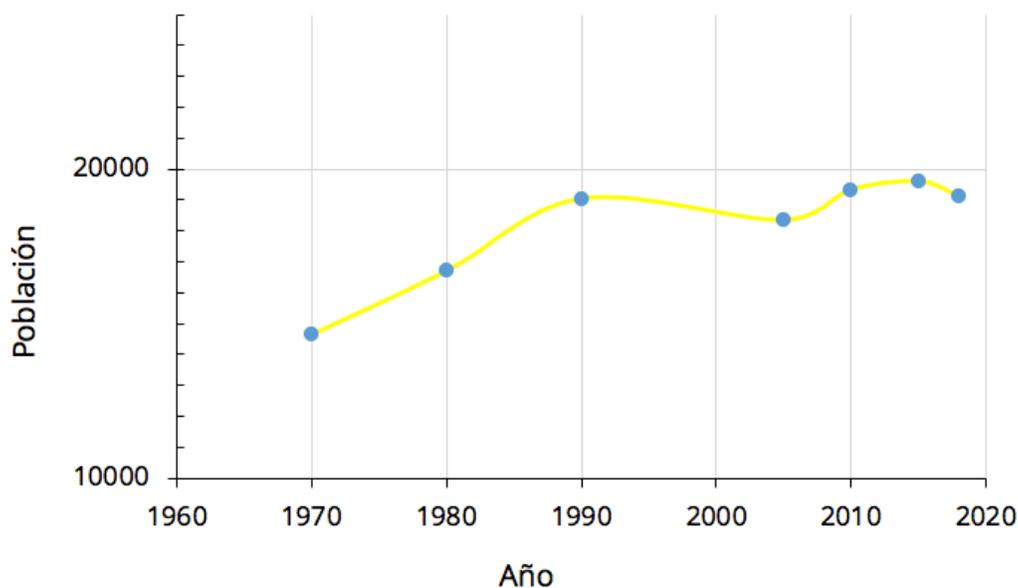


Figura 15. Población histórica de Moctezuma S.L.P

En lo que respecta a las características educativas, la población de 15 años y más presentan un nivel de escolaridad de: sin escolaridad 13.2%, básica 75.3%, media superior 8.7%, superior 2.6% y no especificado 0.2%.

Las características económicas son representadas por el 31.6% población económicamente activa (PEA), considerando a la población de 12 años y más. De la PEA el 22.4 % es representado por mujeres y el 77.6 % por hombres. Las personas económicamente inactivas son estudiantes (20.8 %), personas dedicadas al hogar (51.6 %), jubilados o pensionados (0.7%), personas con alguna limitación física o mental que les impide trabajar (5.2 %) y personas en otras actividades no económicas (21.7%).

En el Informe anual sobre situación de pobreza y rezago social 2018 de SEDESOL indica que el municipio se tiene un grado de rezago social medio.

De las localidades visitadas durante el estudio se encuentran Morados, Cruces, San José del Grito, Ejido Juárez y Morterillos, las cuales todas son localidades menores a 2,500 habitantes.

### 5.3 Clima

La fórmula climática de la zona de estudio es  $BSohx'(w)(l')gw''$  de acuerdo con la clasificación propuesta por Köppen modificada por E. García (2004), lo que corresponde a un clima seco de estepa y semi-cálido con lluvias de verano. La precipitación anual es de 325.1 mm, abarcando el periodo lluvioso de junio a septiembre (figura 16); la temperatura media anual es de 20.4°C (García, 2004). El mes más caliente es mayo con una temperatura media mensual de 23.4 y más frío es enero con 16.6. La sequedad del lugar depende principalmente de la escasa precipitación, la alta evapotranspiración, de la temperatura, de la poca persistencia de la lluvia y lo torrencial de la misma, así como de la naturaleza del suelo y de la cubierta vegetal (INEGI, 2010). Este tipo de clima provoca que el recurso hídrico superficial de la zona sea escaso e intermitente.

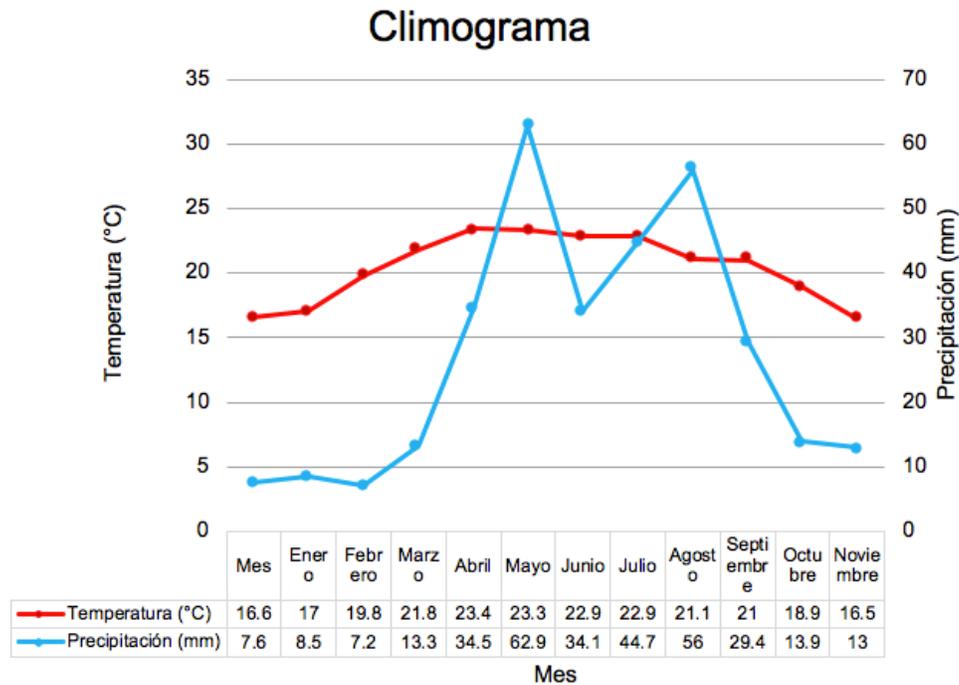


Figura 16. Climograma. Elaboración propia con base en García, 2004.

## 5.4 Vegetación

El área de estudio se encuentra ubicado en la región del Altiplano Potosino, que incluye los municipios de Catorce, Cedral, Charcas, Guadalcázar, Matehuala, Moctezuma, Salinas, Santo Domingo, Vanegas, Venado, Villa de Arista, Villa de Guadalupe, Villa Hidalgo, Villa de la Paz y Villa de Ramos. En esta región se desarrolla una comunidad biótica de matorral xerófilo, caracterizado por una vegetación adaptada para soportar largos periodos secos, este tipo de matorral incluye diversas comunidades vegetales con una fisionomía en la que predominan los arbustos de baja estatura y con baja densidad (Challenger, 2008; Mata, 2015). En el área de estudio se identificaron tres tipos principales de vegetación correspondientes al ecosistema de matorral xerófilo: 1) matorral desértico micrófilo, 2) matorral desértico rosetófilo y 3) matorral crasicale.

Cabe mencionar que el área de interés exclusiva para el muestreo de cobertura vegetal se realizó en el área que se identificó como de recarga potencial de agua subterránea

del manantial “Ojo de Agua”, Moctezuma, ubicada al oeste de la cabecera municipal de Moctezuma entre los cerros Rincón los Coyotes, Rincón Verde, Huaracha, La Fundición, San Rafael, La Bola, De en medio y a los alrededores del entronque a Morados (figura 17).

A continuación, se describen los tres tipos principales de vegetación (Rzedowski, 1965), las cuales están determinados por las diferentes altitudes, climas, substrato geológico y suelo:

**Matorral desértico micrófilo:** El matorral desértico micrófilo se caracteriza por la predominancia de arbustos de hoja pequeña (Delgado *et al.*, 2016). Se localiza en altitudes entre 1000 y 2300 m. Los suelos son característicamente de origen aluvial, descansando sobre material de relleno en valles o depresiones (por lo general depósitos profundos) o bien sobre depósitos más someros y algo pedregosos de las porciones inferiores de los abanicos aluviales en la base de los cerros. Los suelos en general suelen ser pobres en materia orgánica (2-4 %) y de color más bien claro, entre grisáceo, rojizo o castaño.

En el área de estudio se encuentran especies como *Prosopis juliflora* (mezquite), *Larrea divaricata* (gobernadora), *Agave salmiana ssp. crassispina* (maguey mezcalero), *Opuntia microdasys* (nopal), *Cylindropuntia imbricata* (cardenche), *Yucca filifera* (izote), *Yuca decipiens* (palma), *Echinocereous cinerascens* (alicoche), las cuales se observaron en todos los cerros recorridos.

**Matorral desértico rosetófilo:** Este tipo de vegetación se caracteriza por su fisionomía de arbustos espinosos con hojas dispuestas en rosetas (Mata, 2015), siendo importante por su extensión en el estado (~9 %) y en particular por las especiales útiles que incluye. El matorral desértico rosetófilo muestra una marcada preferencia para crecer sobre los estratos calizos, sobre laderas y descendiendo a las partes superiores de los abanicos aluviales, situados en la base de los mismos cerros. El suelo es típicamente poco profundo e interrumpido por afloramientos de roca, su color varía de grisáceo a negro y el contenido de materia orgánica es relativamente abundante (4-6 %). Un horizonte de caliche subyace con frecuencia en las laderas y en los abanicos aluviales.

De las especies que destacan se encuentran *Agave lechuguilla* (lechuguilla), *Agave striata*, *Hechtia glomerata*, *Yucca carnerosana* (palma samandoca), *Echinocactus platiacanthus* (biznaga) y *Euphorbia antisiphilitica* (candelilla).

**Matorral crasicauale:** Este tipo de matorral es representado por plantas de tallo carnoso/suculento, en general siendo cactáceas grandes (la altura depende de la especie que lo conforma). Se desarrolla principalmente sobre las laderas y planicies de cerros riolíticos

y basálticos y sobre los abanicos aluviales situados en la base de los mismos cerros; sin embargo, en el área de interés no había presencia de éste tipo de rocas; el matorral crasicaule registrado estaba sobre material calizo. Por lo regular se encuentran en altitudes que varían entre los 1000 y 2200 m.

Los suelos son por lo general someros y arenosos, de color castaño o rojizo grisáceo, ligeramente ácidos (pH 5.5-6.5), con 2 a 3 % de materia orgánica y sin carbonato de calcio. En el área de estudio predominan especies como *Opuntia streptacantha* (nopal cardón) y *Myrtillocactus geometrizans* (garamubillo).

## 5.5 Características y uso del suelo.

En la Provincia Mesa del Centro (donde se ubica la zona de estudio), se desarrollan suelos más o menos profundos de origen aluvial y coluvio-aluvial en llanuras y bajadas, debido al depósito de materiales derivados de rocas sedimentarias e ígneas. Los suelos someros de origen residual y coluvial tienen su formación sobre sierras de rocas calizas, lutitas, riolitas y tobas ácidas, así como sobre pequeñas mesetas de rocas ígneas y afloramientos dispersos de basalto. Las limitantes físicas que se presentan son las fases petrocálcica (caliche), lítica (roca) y en menor proporción pedregosa y gravosa; además, pequeñas áreas presentan limitantes por sales solubles y sodio (INEGI, 2010).

Los suelos en el área de Moctezuma son de origen sedimentario, de textura franco a franco arcilloso, con drenaje deficiente y permeabilidad moderada; en general el uso de suelo es aprovechado para la actividad pecuaria (CEFIM, 2012) (figura 18).

Los diferentes tipos de suelo también han evolucionado por la interacción que existe entre varios de sus agentes formadores, como la temperatura, humedad, el tipo de roca o material parental y la orografía que determina los suelos residuales o formados in situ y los que han sido transportados y depositados en las partes bajas y llanas por acción del agua, viento y gravedad; además de la vegetación, como un factor que aporta materia orgánica y los organismos que la transforman en humus (INEGI, 2010).

**Dentro del área de estudio se desarrollan cuatro tipos de suelo, descritos por INEGI (2010):**

### **Xerosoles (Xk y Xh):**

Este tipo de suelos se localizan en zonas áridas y semiáridas. Comúnmente son de profundidad moderada. Su origen es aluvial en las llanuras y coluvial en las bajadas. El material materno consiste de sedimentos que se han originado principalmente de roca

caliza, lo que da colores claros a estos suelos debido a la baja precipitación en la zona y al bajo contenido de materia orgánica; son de textura media. En el área de estudio se presenta acumulación secundaria de carbonatos de calcio (Xerosol cálcico) y otros que no manifiestan característica distintiva (Xerosol háplico). El pH de estos suelos varía de neutro a ligeramente alcalinos y la mayoría sobreyacen a una limitante física que está a menos de 100 cm de profundidad, siendo la fase petrocálcica (llamada localmente caliche) la que predomina en la Mesa del Centro. Estos suelos son fértiles en épocas de lluvia, productivos en las áreas de producción de cosechas (INEGI, 2010).

#### **Litsoles (L):**

Se distribuyen en las partes altas de las sierras, en lomeríos y algunas veces en bajadas. Son muy someros, menores de 10 cm de profundidad, sobreyacen directamente a la roca o a una fase dura, continua y presentan bastantes afloramientos rocosos. Son de origen residual, derivados en gran parte de rocas riolita-toba ácida y de caliza-lutita. Son de color grisáceo oscuro, con textura media y pH ligeramente alcalino. Por su escasa profundidad no se recomienda ningún tipo de uso para estos suelos, solo preservarlos para la vida silvestre (INEGI, 2010).

#### **Rendzinas (E):**

Son poco profundos y de desarrollo moderado, con menos de 50 cm de profundidad, con su fase lítica o petrocálcica (caliche), así como un horizonte superficial que descansa sobre material calcáreo. Presenta color oscuro o pardo rojizo, con alto contenido de materia orgánica y pH ligeramente alcalino, con predominio textura fina (arcillosa) y algunos con textura media. Son de origen residual y coluvial. Tienen potencialidad productiva para las actividades pecuarias y forestales (INEGI, 2010).

#### **Castañozems (Kh):**

Son de origen aluvial y tienen color que varía de pardo rojizo a parco oscuro, con textura media. Tienen buen contenido de materia orgánica y pH que varía de neutro a ligeramente alcalino; la reacción al ácido clorhídrico es fuerte por el alto contenido de carbonato de calcio en el perfil. Están limitados por fase petrocálcica (caliche) a menos de 50 cm de profundidad. Estos suelos no tienen limitantes, son muy fértiles y muy productivos cuando se les suministra riego. Algunos cuentan con un enriquecimiento secundario de carbonatos de calcio (Castañozem cálcico). En otros existe acumulación de arcilla por remoción de ella del horizonte u horizontes superiores y su deposición en otro más profundo, formando un horizonte argílico (Castañozem lúvico); cuando no existe otra característica distintiva en estos suelos (como en el caso del área de estudio) son denominados Castañozem háplico (INEGI, 2010).

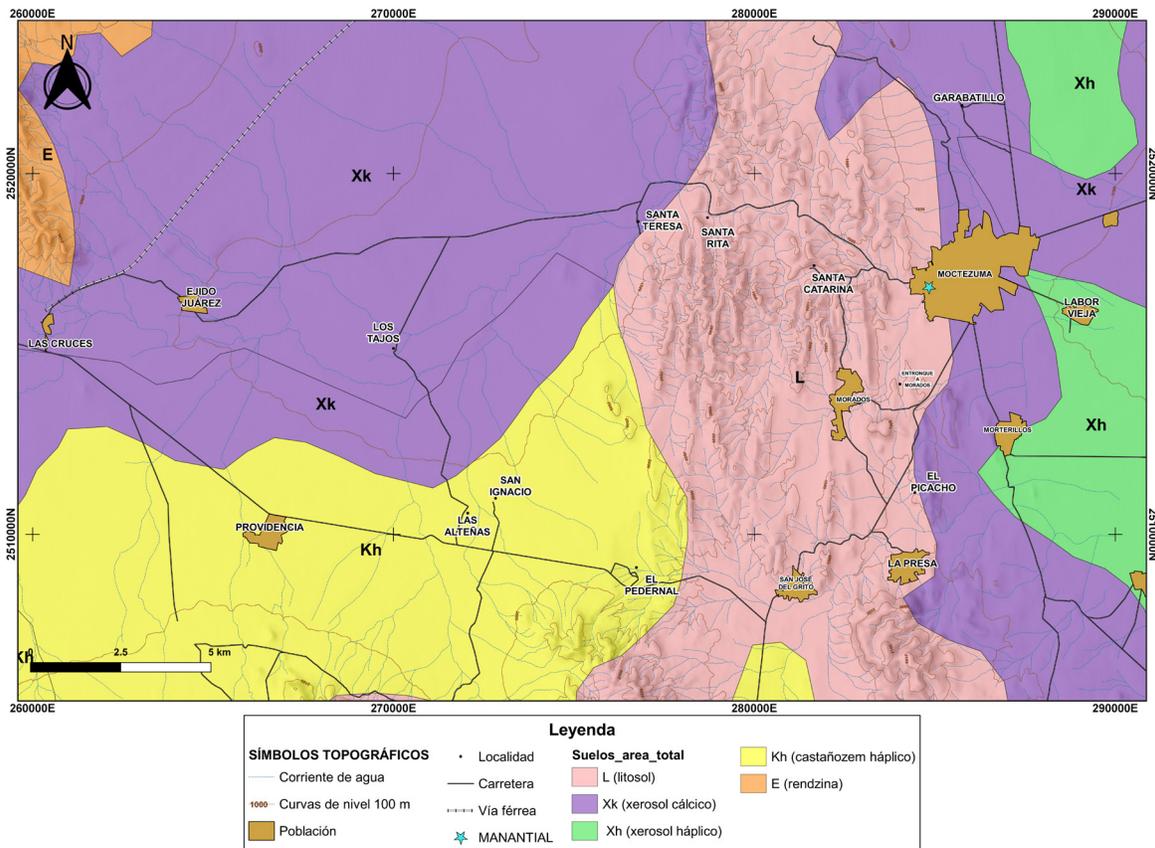


Figura 17. Distribución de tipos de suelo en el área de estudio.

## 5.6 Fisiografía

### 5.6.1 Provincia fisiográfica

El área de estudio se encuentra ubicado de acuerdo con la clasificación de Provincias fisiográficas establecidas por Raisz (1959), en la parte centro de la Provincia Mesa Central (MC) o Altiplano Mexicano según López-Ramos (1979). Dentro de esta provincia se encuentra en la Sub-provincia fisiográfica denominada Sierras y Llanuras Potosino-Zacatecanas (Servicio Geológico Mexicano, 2005a).

La MC se localiza en el centro-norte de México, en una región semidesértica, donde la mayoría de los estudios geológicos realizados han sido con el fin de conocer su potencial minero (Nieto-Samaniego *et al.*, 2005). Es una planicie elevada, con suaves lomeríos y terrenos prácticamente planos, con una elevación promedio de 1,700 msnm en la porción central y oriental. Aunque de la mitad de su superficie se encuentra por encima

de los 2,000 m y las elevaciones topográficas en su interior son moderadas, formando comúnmente desniveles inferiores a los 600 m. También se tienen sierras fuertemente plegadas, formadas por rocas sedimentarias con alturas de 1,700 a 2,250 msnm, así mismo afloran conglomerados y suelos aluviales con escaso drenaje (Servicio Geológico Mexicano, 2005a).

Esta provincia fisiográfica limita al norte y al este con la Sierra Madre Oriental (SMOr), al oeste con la Sierra Madre Occidental (SMOc) y al sur por el Eje Neovolcánico (figura 18); una característica significativa es que las provincias fisiográficas circundantes, tienen en general, relieves más pronunciados (Nieto-Samaniego *et al.*, 2005). La MC se caracteriza por formar una cuenca sedimentaria de más de 455,000 km<sup>3</sup> de sedimentos marinos del Jurásico Superior, Cretácico Inferior, Cretácico Medio y Cretácico Superior (Ortíz, 2008).

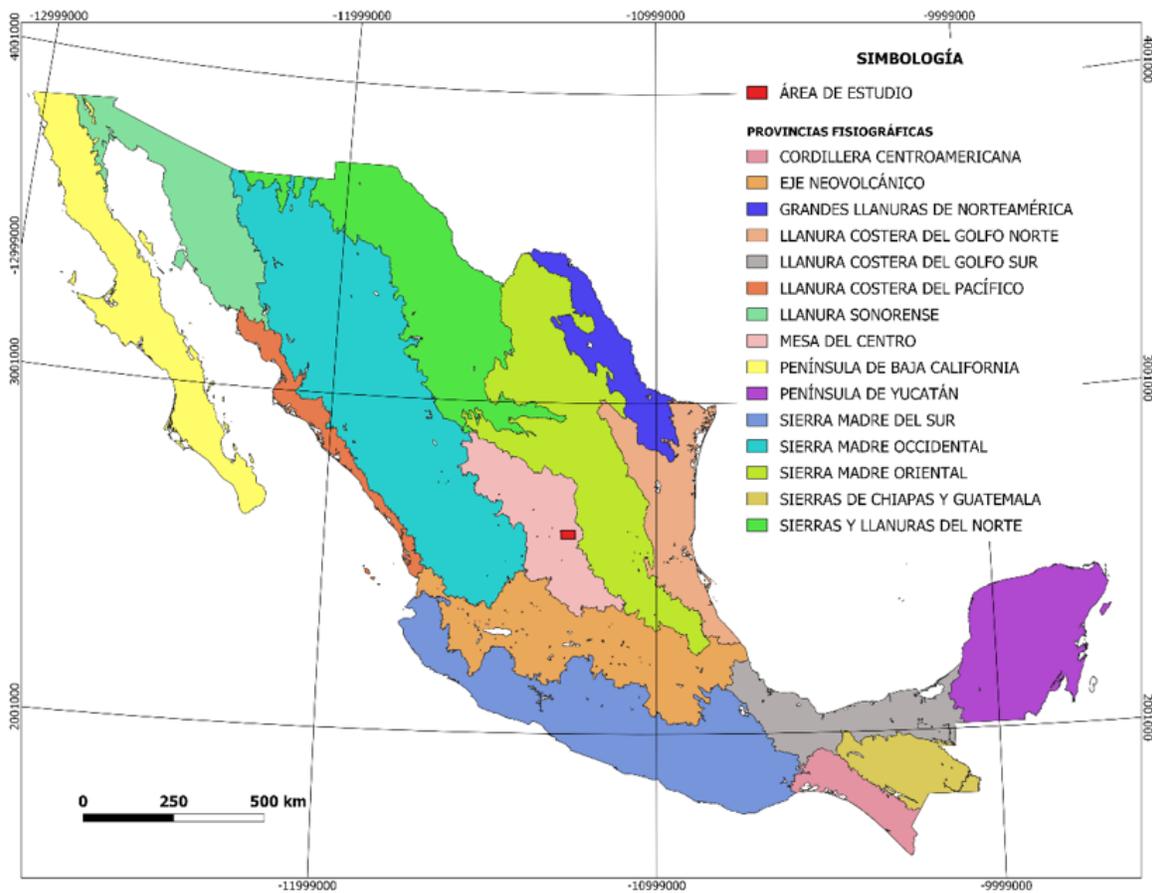


Figura 18. Provincias Fisiográficas. Tomado y modificado de Raisz, 1959.

En la MC se identifican dos regiones: la sur que presenta las mayores elevaciones por encima de los 2,000 msnm; es una región montañosa, cubierta en su mayor parte por rocas volcánicas cenozoicas, muestra un estado de erosión mucho más activo que la región norte, con desniveles más pronunciados y los rasgos estructurales, principalmente fallas normales, se observan menos erosionados. La región norte, es de mayor es una planicie extensa donde sobresalen serranías aisladas, principalmente de rocas marinas del Mesozoico (Tristán, 2008); muestra un estado de erosión más avanzado con grandes cuencas continentales (algunas endorreicas) rellenas de sedimentos aluviales y lacustres. En esta región las elevaciones se encuentran por debajo de los 2,000 msnm constituyendo así una meseta elevada, pero relativamente más baja que las regiones colindantes (Nieto-Samaniego *et al.*, 2005). El área de estudio se ubica en el sur de la región norte (casi en el límite con la región sur).

### 5.6.2 Sub-provincia fisiográfica

La sub-provincia Sierras y Llanuras Potosino-Zacatecanas comprende la porción centro-norte de la Provincia Mesa Central (figura 20). En ella dominan extensos terrenos áridos con lomeríos en el noroeste y sierras bajas al sureste; en ocasiones hay lomeríos dispersos en las zonas planas (INEGI, 2010); así mismo se encuentran algunas llanuras aluviales de cierta extensión, pero es la gran llanura desértica potosino-zacatecana la que predomina (Servicio Geológico Mexicano, 2005a). La litología predominante son rocas volcánicas, que cubren rocas sedimentarias con un drenaje rectangular, típico de rocas volcánicas, con topografía abrupta y con un ciclo de erosión juvenil. El área de estudio se encuentra en la parte oriental de esta sub-provincia; en ésta se levanta un conjunto de sierras compuestas por rocas sedimentarias marinas y continentales asociadas con mesetas lávicas (INEGI, 2010). Al oriente de la cabecera municipal Moctezuma se encuentra una gran llanura aluvial, y al noreste de ésta, otra llanura de piso rocoso (horizonte petrocálcico).

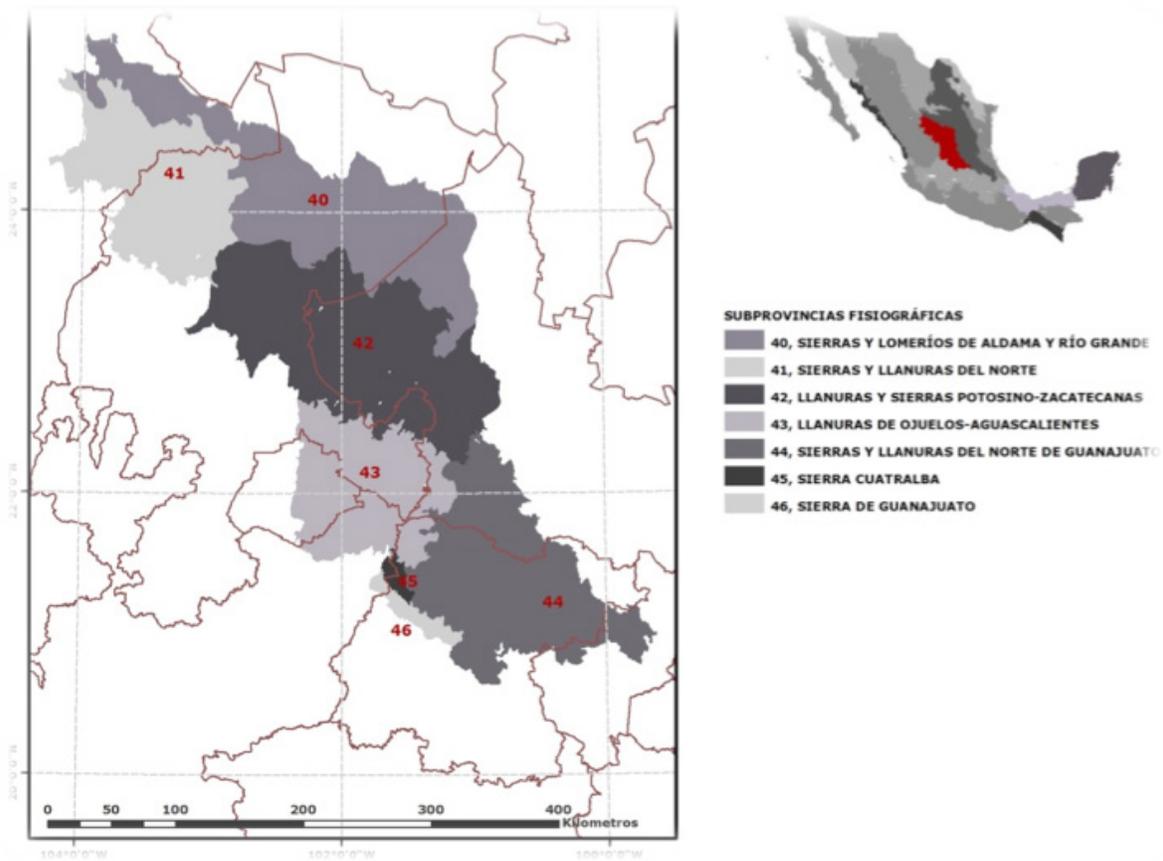


Figura 19. Subprovincias de la Mesa del Centro. Tomado de INEGI.

## 5.7 Hidrografía

### 5.7.1 Hidrología superficial

En el altiplano potosino las corrientes de agua superficial son de carácter intermitente formando un drenaje tipo enrejado, por lo regular se forman en la temporada de lluvias y su curso es reducido, ya que generalmente desaparecen en las llanuras, debido a filtración y evaporación (Aguillón-Robles, A., Tristán-González, 1981; INEGI, 2010). El aprovechamiento de acuíferos es la única solución para contar con agua para uso doméstico, industrial y agrícola.

El área de estudio se encuentra en la Región Hidrológica 37, El Salado (figura 20) y esta a su vez en las sub-cuencas RH37Fb y RH37Ga (figura 21). Esta región se constituye por una serie de cuencas cerradas que se caracterizan por la carencia de grandes corrientes superficiales (CEFIM, 2012).

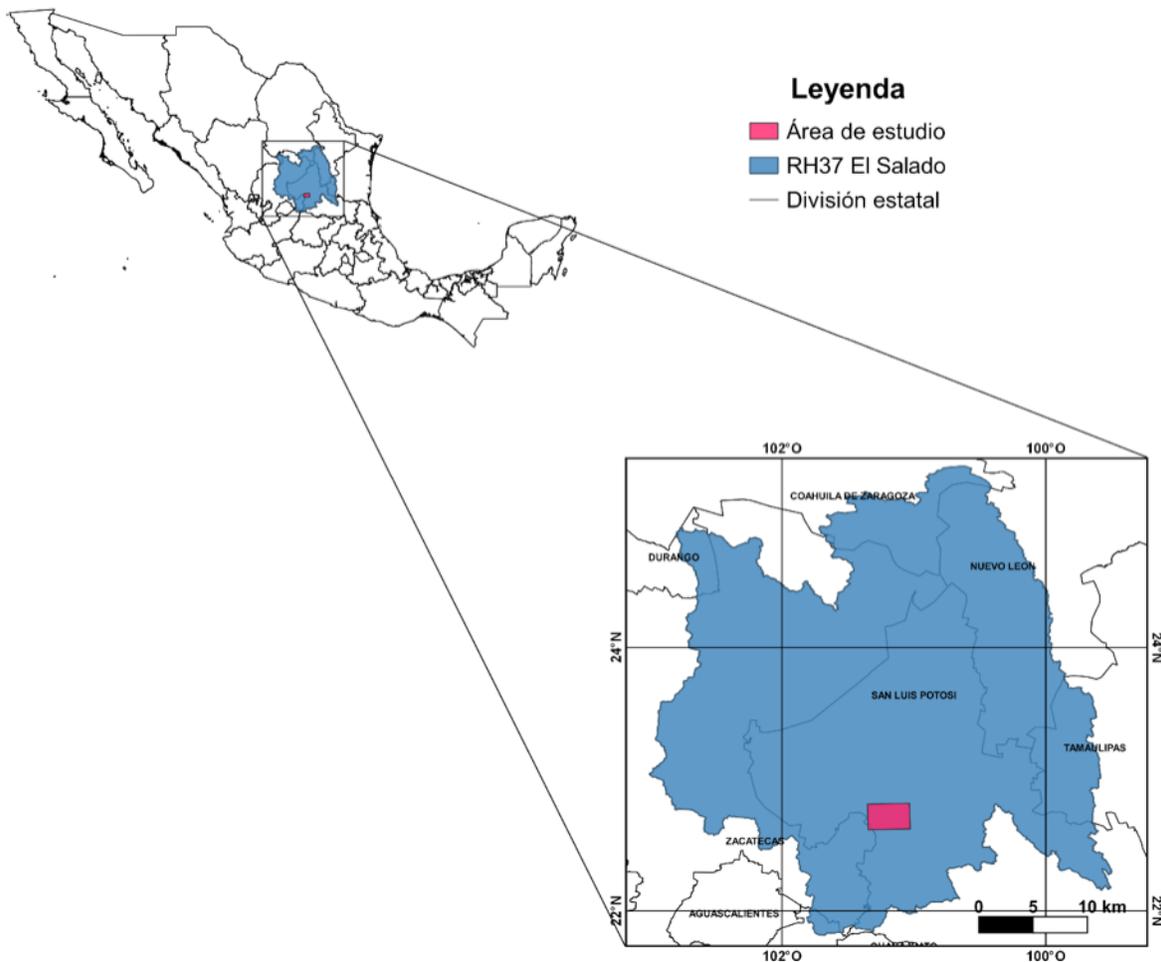


Figura 20. Región Hidrológica 37 El Salado. Elaboración propia.

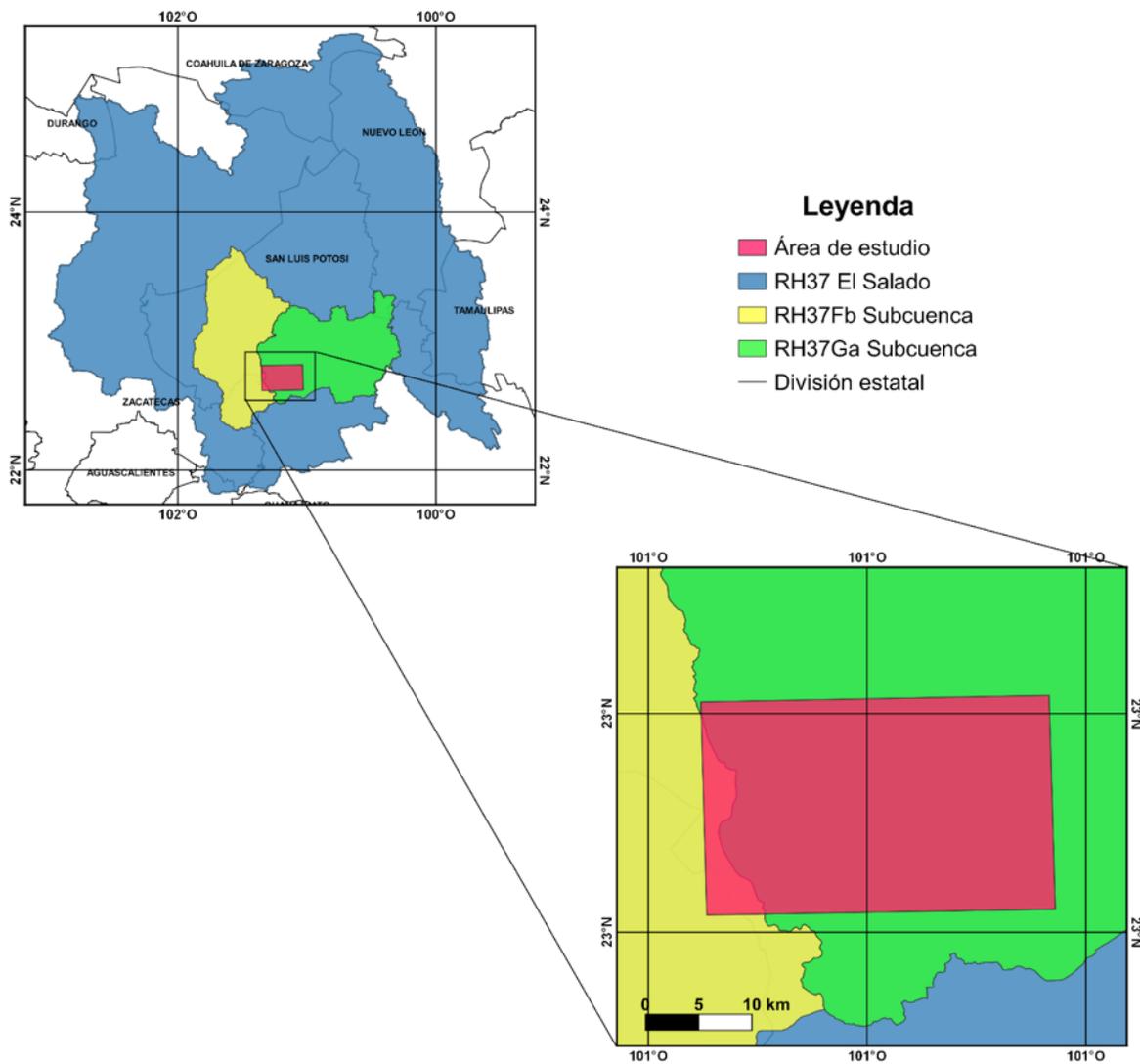
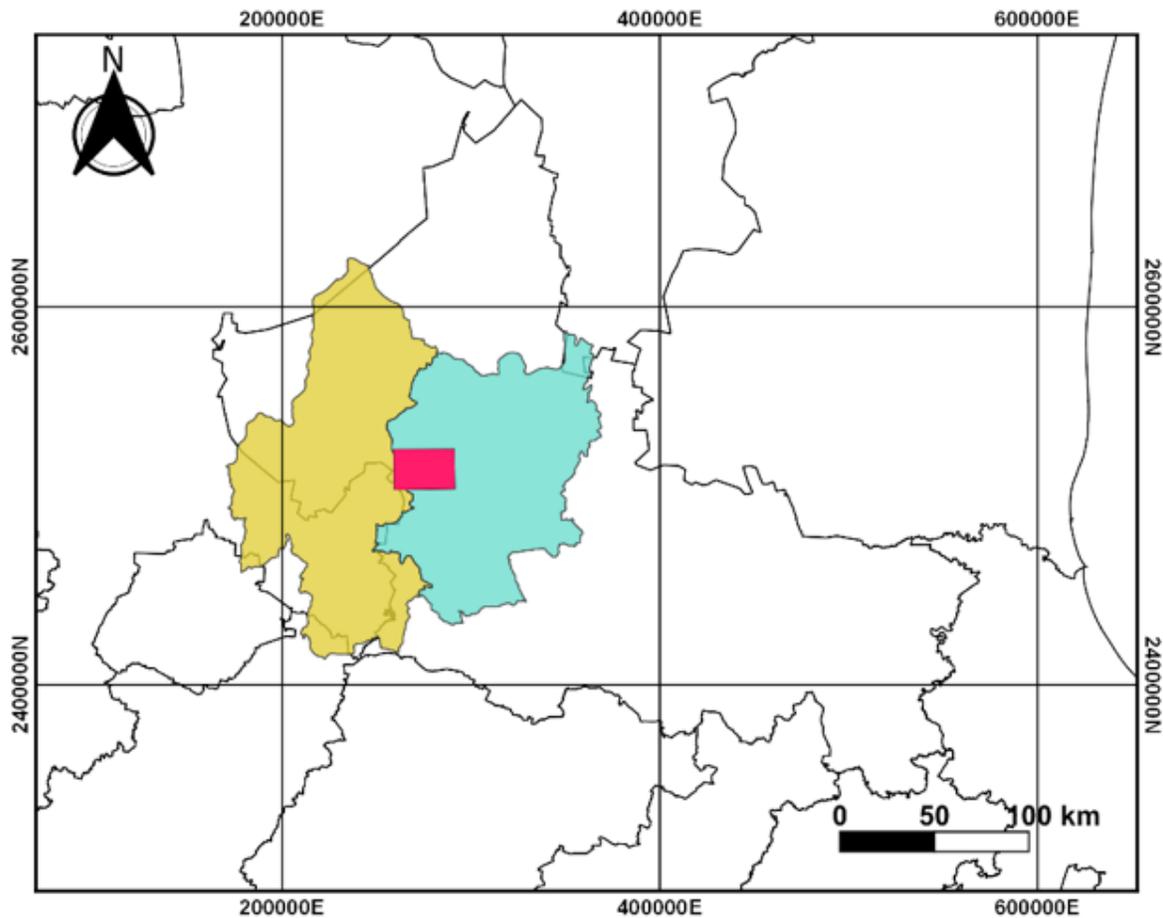


Figura 21. Subcuencas RH37Fb (color amarillo) y RH37Ga (color verde). Elaboración propia.

La extensión del municipio ocupa dos cuencas que se ubican en las porciones noroeste y noreste, las cuales son: Cuenca San Pablo y Cuenca Presa San José-Los Pilares (figura 22) (Servicio Geológico Mexicano, 2005a; INEGI, 2010). A continuación, se presenta una breve descripción de ambas:



### Leyenda

- |                    |                                |
|--------------------|--------------------------------|
| — División estatal | Cuencas                        |
| ■ Área de estudio  | ■ Presa San José - Los Pilares |
|                    | ■ Presa San Pablo              |

Figura 22. Cuenca Presa San José-Los Pilares (color azul) y Cuenca Presa San Pablo (color café).  
Elaboración propia.

## Cuenca San Pablo

Se localiza al occidente de la cabecera municipal de Moctezuma, y limita al norte con la cuenca Camacho Gruñidora, al noroeste con la cuenca Matehuala, al sureste con la cuenca San José-Los Pilares y al oeste con la cuenca Fresnillo Yesca (Servicio Geológico Mexicano, 2005a).

El rango de escorrentía anual oscila entre 10 y 20 mm, por lo que no existe infraestructura hidráulica para su aprovechamiento, contando únicamente con pequeños bordos, para uso doméstico y como abrevadero. La calidad del agua en los bordos es de salinidad media y baja en sodio, mientras que en las lagunas es de salinidad alta y alto contenido de sodio (Servicio Geológico Mexicano, 2005a; INEGI, 2010).

## Cuenca Presa San José-Los Pilares

Esta cuenca es la que predomina en el área de estudio, se encuentra ubicada en la porción noreste del municipio y limita al norte con la cuenca Matehuala, al este con la cuenca Sierra Madre, al sur y sureste con la Región Hidrológica Pánuco y al oeste-suroeste con la cuenca San Pablo.

La temperatura media anual de la región es de 16° a 22°C y la precipitación total anual es de 500 mm al norte de la cuenca y de 200 mm al sur de la misma. La escorrentía es menor de 10 mm (Servicio Geológico Mexicano, 2005a; INEGI, 2010).

Al norte de la cuenca existen algunos bordos que captan escorrentías para uso de abrevadero y doméstico. La calidad del agua varía desde salinidad media y alta en la parte norte de la cuenca, hasta salinidad media y baja en la porción sur (Servicio Geológico Mexicano, 2005a; INEGI, 2010).

### 5.7.2 Hidrología subterránea

Debido al escaso y transitorio recurso hidráulico superficial, el agua subterránea constituye la fuente principal para el abastecimiento doméstico y agrícola de la zona. Los acuíferos regionales son controlados por factores estructurales y estratigráficos asociados a la topografía, estrechamente relacionados por las provincias fisiográficas mencionadas anteriormente. El agua subterránea se encuentra en fosas tectónicas y en sinclinales de rocas sedimentarias. Las fosas tectónicas están rellenas con aluvión del Cuaternario y en algunos casos con sedimentos (INEGI, 2010).

Los acuíferos en rellenos aluviales son de tipo libre, aun cuando localmente pueden estar confinados o semiconfinados por los horizontes arcillosos consolidados. En los acuíferos que están en rocas calcáreas, el flujo regional es por carsticidad y fracturamiento; son de tipo confinado y semiconfinado al subyacer a estratos de lutita; los acuíferos en rocas volcánicas son también de tipo semiconfinado al subyacer a material aluvial de relleno (INEGI, 2010).

La recarga de los acuíferos contenidos en material aluvial se obtiene principalmente de las escorrentías que se originan en las sierras y lomeríos, por infiltración directa de las precipitaciones y por flujo subterráneo horizontal proveniente de cuencas o acuíferos adyacentes; mientras que la recarga en materiales consolidados (rocas sedimentarias e ígneas) ocurre a través de flujo regional horizontal y por infiltración en zonas de alta carsticidad e intenso fracturamiento. Por otra parte, la descarga en general ocurre por flujo subterráneo horizontal, extracción por bombeo, salidas de manantiales y por evapotranspiración en niveles freáticos someros (INEGI, 2010).

La cantidad y tipo de sales disueltas en el agua están en relación directa con el origen y solubilidad de las rocas o materiales con los que entra en contacto al momento de infiltrarse y circular a través de ellas. La calidad del agua de los acuíferos presenta notables variaciones en la entidad, se sitúa dentro de un rango promedio de 436 a 1,987 ppm de sólidos totales disueltos, aunque existen áreas localizadas en la MC y la SMO, en donde los acuíferos alcanzan concentraciones mayores a 4,000 ppm (INEGI, 2010).

Una de las características del Altiplano Potosino es que posee numerosos manantiales termales y zonas de manifestación termal, que ponen en evidencia la relación que tiene el agua al circular a través de las rocas volcánicas plutónicas, que aún conservan altas temperaturas, para luego ascender y brotar en forma natural, o mediante pozos profundos (INEGI, 2010).

Esta área se encuentra dentro del Acuífero Administrativo de Villa de Arista, en donde existen zonas de explotación hídrica, siendo la del municipio de Villa de Arista (al este de la zona de estudio) la más importante de la región, debido a que la agricultura intensiva es una de sus actividades principales.

## Acuífero Villa de Arista (2408)

El Acuífero Administrativo Villa de Arista (figura 23) abarca los municipios de Villa de Arista, Moctezuma, Charcas y Venado (CONAGUA, 2018). El sistema acuífero se encuentra alojado en el material aluvial y sedimentos lacustres que rellenan la fosa. Tanto las fronteras laterales como el piso rocoso se consideran impermeables, ya que corresponden a formaciones de naturaleza arcillosa y calcáreo-arcillosa. El espesor de éste acuífero varía desde 100 m en su porción noroeste a 250 m o más en la zona de Villa de Arista (CONAGUA, 2018).

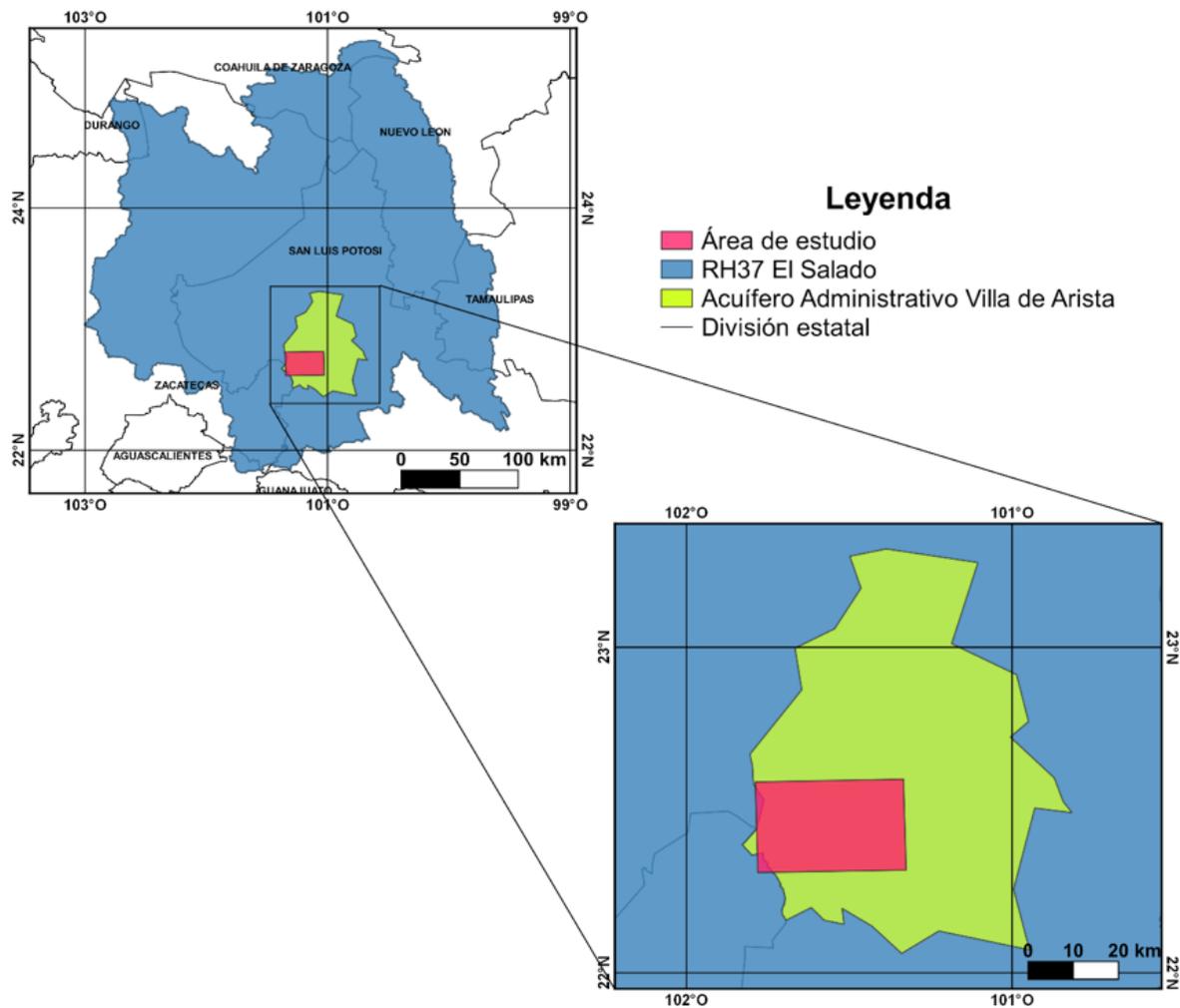


Figura 23. Acuífero Villa de Arista. Elaboración propia

En la figura 24 se muestran las características de disponibilidad del acuífero.

CLAVE	ACUÍFERO	R	DNCOM	VCAS	VEXTET	DAS	DÉFICIT
		CIFRAS EN MILLONES DE METROS CÚBICOS ANUALES					
<b>ESTADO DE SAN LUIS POTOSÍ</b>							
2408	VILLA DE ARISTA	48.2	0.0	102.706919	74.8	0.000000	-54.506919

R: recarga media anual; DNCOM: descarga natural comprometida; VCAS: volumen concesionado de agua subterránea; VEXTET: volumen de extracción de agua subterránea consignado en estudios técnicos; DAS: disponibilidad media anual de agua subterránea. Las definiciones de estos términos son las contenidas en los numerales "3" y "4" de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015.

Figura 24. Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea con fecha de corte en el Registro Público de Derechos del Agua al 30 de junio del 2014, tomado de CONAGUA 2018.

El acuífero es de tipo libre a semiconfinado y se considera que se encuentra en una crítica situación de sobreexplotación (figura 25). La recarga tiene lugar principalmente en el borde oeste del valle, a lo largo de una franja que se extiende desde Venado, hacia el sur, hasta Potrero Mezquital, a través de abanico de la sierra de Guanamé; la extensión de esta zona de recarga es de aproximadamente 40 km. Actualmente existe una componente adicional de la recarga que es inducida por la infiltración de retornos de riego. La descarga tiene lugar por extracción a través del bombeo, la cual se concentran mayormente en los alrededores del poblado de Villa de Arista.

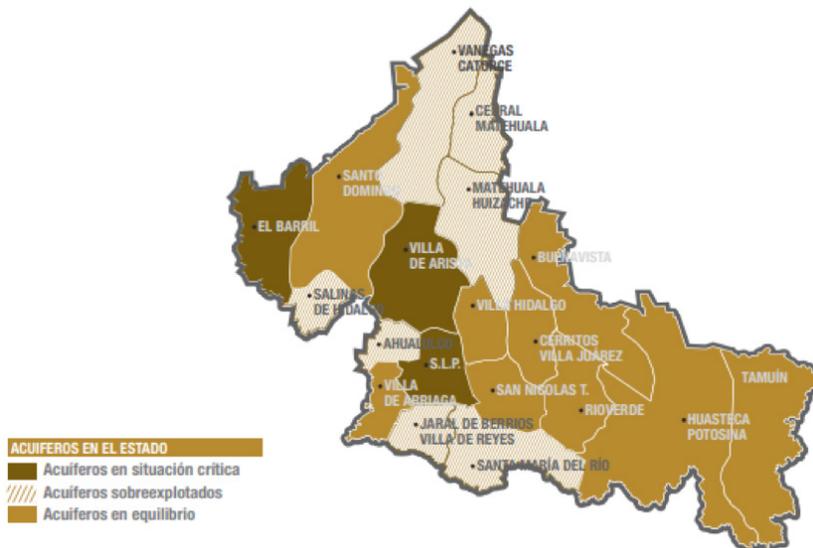


Figura 25. Mapa de la presión hídrica del estado de SLP. Tomado de Gobierno del estado de San Luis Potosí, 2015.

La evapotranspiración es otro fenómeno de descarga que tiene importancia en las zonas de Venado y Moctezuma, donde el nivel estático se encuentra en profundidades someras (CONAGUA, 2018).

La concentración de sólidos totales disueltos en el agua subterránea es de 300 a 900 ppm, por lo que desde el punto de vista fisicoquímico el agua es de buena calidad, dulce y apropiada para cualquier uso. En cuanto a la familia predominante de agua se tienen tres tipos diferentes, en la parte norte es cálcico-bicarbonatada, en la parte central es sódica-mixta y en la porción sur es sódico-bicarbonatada.

La precipitación media anual es de 391.3 mm y una evaporación potencial media anual de 998 mm (periodo 1940-2010) (DOF, 2015a). Se tienen registrados un total de 730 aprovechamientos, de los cuales 593 se encuentran activos; de estos últimos, 591 son pozos y dos son manantiales. Se extrae un volumen de 67 mm<sup>3</sup> por año, cuyo uso es agrícola, doméstico-abrevadero, público-urbano e industrial. La recarga que recibe el acuífero es de 27.4 mm<sup>3</sup>, por lo que existe un déficit de agua de 39.6 Mm<sup>3</sup> (CONAGUA, 2018).

## 6. Geología

---

### 6.1 Marco geológico

El área de estudio se encuentra en el municipio de Moctezuma del estado de San Luis Potosí, México. El municipio tiene una extensión total de 1,285.50 km<sup>2</sup>, el cual corresponde al 2.10% del total de la superficie del estado. Moctezuma colinda al norte con el municipio de Venado, al este con Villa de Arista, al sureste con San Luis Potosí, al oeste con Salinas y al sur con Aqualulco y el estado de Zacatecas (CEFIM, 2012) (figura 12).

El área de estudio se encuentra en la unidad paleogeográfica Cuenca Mesozoica del Centro de México (CMCM) definida por Carrillo (1971) como una gran cuenca sedimentaria que contiene unos 700,000 km<sup>3</sup> de sedimentos marinos con edad del Triásico al Cretácico. Ésta a su vez se encuentra en las provincias geológicas: Faja Ignimbrita Mexicana, Zacatecana, Cinturón Mexicano de Pliegues y Fallas y la Plataforma Valles-SLP (Servicio Geológico Mexicano, 2005b). Aquí la SMO<sub>r</sub> es el elemento tectonoestratigráfico dominante (Consejo de Recursos Minerales).

En el área afloran rocas sedimentarias marinas que fueron depositadas en aguas profundas de edades que van desde el Hauteriviano al Matrichtiano, correspondiendo a: calizas de la Formación Cupido (Kh<sub>b</sub> Cz), calizas-limos de la Formación La Peña (K<sub>a</sub> Cz-Lu), calizas-lutitas de la Formación Cuesta del Cura (K<sub>a</sub> Cz-Lu), calizas-lutitas de la Formación Indidura (K<sub>t</sub> Cz-Lu) y arenisca-lutitas de la Formación Caracol (K<sub>s</sub> Ar-Lu). Estas unidades son transicionales y concordantes, formando dos anticlinales intensamente plegados (Anticlinal Santa Catalina y San Antonio del Rul) con una orientación general NW-SE con echados al Este (Consejo de Recursos Minerales; Aguillón-Robles, A., Tristán-González, 1981).

Sobreyaciendo a las unidades del Cretácico, se tiene un conglomerado polimíctico-arenoso de edad Eoceno-Oligoceno, formado por la desintegración de las unidades de rocas del Cretácico. Es una intercalación de conglomerados y areniscas con horizontes de tobas depositadas por aire en la base, siendo éstas las primeras pulsaciones del vulcanismo del Oligoceno.

Durante el Oligoceno las unidades sedimentarias del Cretácico y de principios del Terciario, fueron cubiertas por un paquete de rocas volcánicas de composiciones félsicas

a basálticas, iniciando con la extrusión de rocas porfídicas con una composición que varía de riolitas a dacitas principalmente, pero ocasionalmente pasan a dacitas y traquitas (todas ricas en potasio). Posteriormente durante el mismo Oligoceno se tiene un período de intensa erosión originando un conglomerado olicmítico arenoso con intercalaciones de tobas en la parte media. A finales del Oligoceno se reanuda la actividad volcánica con la emisión de un paquete formado por tobas de aire no consolidadas y por tobas soldadas (ignimbritas), de composición riolítica. Durante el Mioceno se emplazó una Andesita-Basalto en forma fisural, atravesando todas las unidades preexistentes. Durante el Plioceno y principios del Pleistoceno, se tiene una etapa de erosión que da origen a un conglomerado policmítico arenoso. Durante el Pleistoceno se tiene la efusión de rocas volcánicas de basalto formando conos cineríticos y derrames lobulares. Por último, en el Holoceno se depositaron por efectos erosivos limos y arenas formando aluviones.

## **6.2 Estratigrafía**

### **6.2.1 Rocas sedimentarias**

El área de estudio abarca cuatro cartas geológicas F14-A63 Moctezuma, F14-A53 Venado, F14-A52 El Toro y F14-A62 Espíritu Santo, siendo la primera la que predomina. A continuación, se describen las Formaciones geológicas que se encuentran presentes en el área de estudio (figura 26):

#### **Cretácico Inferior**

##### **Formación Cupido (Khb Cz)**

###### **a) Definición**

Imlay (1936), definió como Formación Cupido a unas calizas de estratos medianos a gruesos de color gris oscuro, que al intemperizarse toman un color gris rosado claro, con concreciones de pirita y nódulos de pedernal gris.

###### **b) Distribución dentro del área de estudio**

En el área de estudio esta unidad solamente aflora en la esquina NW, como una franja plegada con dirección NW-SE.

###### **c) Litología y espesor**

Cosiste de calizas microcristalinas de color gris claro a gris oscuro en roca fresca con estratos medianos de 20 a 30 cm, con lentes y bandas de pedernal negro que intemperiza a castaño oscuro. El espesor se desconoce.

d) Relaciones estratigráficas

En el área de estudio es muy reducido su afloramiento. No aflora su base y es cubierta discordantemente por un conglomerado policrómico arenoso del Eoceno-Oligoceno.

e) Edad y correlación

Humphrey (1949), consideró a esta Formación de edad Hauteriviano tardío al Aptiano temprano. Rogers y colaboradores (1961), identificaron fósiles en las cercanías de Coahuila, identificándolos como: Monopleura SP; Philoceras (?) SP y Nerinea SP. Astieridiscus SP, característicos del Valanguiano al barremiano y la Ancyloceras SP, común del Hauteriviano tardío. Se correlaciona con la Formación Tamaulipas inferior y con la Formación Guaxcama de la plataforma Valles-San Luis.

f) Ambiente de depósito

Ambiente de mar abierto.

## **Formación La Peña (Kapa Cz-lm)**

a) Definición

Imlay (1936) la describió como calizas de color gris oscuro a gris claro en estratos medianos a gruesos con cantidades variables de lutita que al intemperizarse adquiere un color gris amarillento. Puede contener concreciones de pirita, así como nódulos de pedernal.

b) Distribución dentro del área de estudio

Esta unidad se encuentra distribuida en flanco oeste del anticlinorio Santa Catarina y entre las fallas Santa Teresa y Moctezuma- El Tule, en la sierra de Santa Catarina, al lado NE de la zona de estudio y al NW de la cabecera municipal de Moctezuma.

c) Litología y espesor

Consiste de calizas microcristalinas de color gris claro a gris oscuro con tonalidades rojizas algo silicificadas en estratos de 10-40 cm de espesor, con lentes de pedernal negro a café rojizo, intercalada con limolitas color gris claro a violáceo. Presenta impresiones de amonitas. Se desconoce su espesor.

d) Relaciones estratigráficas

Esta unidad subyace a la Formación Cuesta del Cura de manera transicional y concordante, marcando el contacto al adelgazarse los estratos y disminuye el espesor del pedernal haciéndose más negro. El contacto con la Formación Cupido no aflora, pero se infiere que es concordante y transicional.

e) Edad y correlación

Según el registro bioestratigráfico, le corresponde una edad del Aptiano-Albiano.

f) Ambiente de depósito

La Peña indica un medio ambiente batial, con aguas profundas y tranquilas, con suficiente oxígeno y un pH cercano o mayor a la neutralidad; también registra un evento transgresivo que ahogó la plataforma Cupido (Mendoza-Maya *et al.*, 2017), debido a que contiene un aporte considerable de terrígenos de pie de talud de la plataforma o muy cerca, presentando horizontes de carácter turbidítico.

## **Formación Cuesta del Cura (Kace-Cz Lu)**

a) Definición

Imlay (1936), definió esta caliza como una secuencia de estratos calcáreos delgados, de color gris oscuro a negro, con intercalaciones de capas lajosas, de calizas arcillosas y laminaciones de lutitas de colores violáceos y rojizos, con estratificación ondulante y con bandas y lentes de pedernal negro abundantes.

b) Distribución dentro del área de estudio

Esta unidad aflora en la sierra Las Minas, al oeste del poblado San Antonio del Rul y en el anticlinorio de Santa Catarina, en los cerros La Boca y de En medio; también en el poblado de Morados al SW de la cabecera municipal de Moctezuma. En la porción Centro-Este de la zona de estudio.

c) Litología y espesor

Está constituida por calizas criptocristalinas de color gris a gris oscuro, compacta, de estratos delgados a medianos con bandas de pedernal negro o castaño oscuro, con horizontes de lutitas, gris claro a violeta, normalmente con estratificación ondulante. En el anticlinorio de sierra Las Minas-San Antonio del Rul, los estratos son sumamente plegados dando origen a pliegues tipo chevron. El espesor se desconoce debido al intenso plegamiento.

d) Relaciones estratigráficas

El contacto inferior es concordante y transicional con la Formación La Peña, ubicándose donde la estratificación se hace más delgada, las bandas de pedernal disminuyen en su espesor y empieza la estratificación ondulante.

e) Edad y correlación

Se le asigna una edad del Albiano-Cenomaniano al Albiano temprano-medio.

f) Ambiente de depósito

Debido al contenido faunístico (fósiles marinos) y características litológicas, se sugiere un ambiente de depósito en mar abierto de aguas profundas específicamente en condiciones infranéricas a intrabaciales y por sus características turbidíticas se infiere que se formó en la cuenca, muy cerca del pie de talud.

## Cretácico Superior

### Formación Indidura (Kt Cz-Lu)

a) Definición

Kelly (1936) la describió como calizas lajosas, lutitas y calizas laminadas con fósiles del Albiano tardío al Turoniano.

b) Distribución dentro del área de estudio

Esta Formación aflora en la parte Centro-Este del área de estudio, al oeste del poblado de San Antonio del Rul, en el cerro de La Cruz, en el poblado de San José del Grito y, principalmente, en las partes bajas del anticlinorio de Santa Catarina.

c) Litología y espesor

Compuesta por calizas arcillosas de color gris claro a oscuro, con tonalidades rojizas y amarillentas, dispuestas en estratos delgados a laminares de 5 a 20 cm de espesor. Se observan algunos estratos de caliza arcillosa negra que intemperiza a color estaño con estratos hasta de 40 cm de espesor con abundantes vetillas de calcita, y en algunas capas más lajosas contienen impresiones de *Inoceramus*. Hacia la cima las calizas se tornan arenosas de color café verdosas a gris y pasan a areniscas y lutitas, dando inicio a la Formación Caracol. Debido al intenso plegamiento se desconoce el espesor en la zona de estudio.

d) Relaciones estratigráficas

Esta unidad sobreyace en forma concordante y transicional a la Formación Cuesta del Cura, marcando el contacto donde desaparece la estratificación ondulante de la Formación Cuesta del Cura y aparecen horizontes arcillosos. Sobreyace a la Formación Caracol de forma transicional y concordante marcando el contacto donde las calizas se tornan arenosas y de color café verdoso ocre.

e) Edad y correlación

La unidad contiene microfósiles de *Inoceramus Labiatus*, lo que permitió asignarle una edad del Turoniano. Se correlaciona con la Formación Soyatal del borde de la plataforma Valles-San Luis Potosí y con la Formación Agua Nueva de la cuenca Tampico-Misantla.

f) Ambiente de depósito

Los terrígenos que se depositaron en el Turoniano indican el inicio del levantamiento de la cuenca, aunque persisten condiciones batiales. El ambiente marino corresponde a condiciones reductoras de aguas profundas con poca circulación, originando una secuencia rítmica de capas calcáreas con aporte de arcilla y materia orgánica dentro de una zona batial a subzona litoral. Los terrígenos derivados de las zonas occidentales se incrementan hacia la cima de esta unidad, hasta que eventualmente marcan el predominio de clásticos finos, indicando regresión marina.

## **Formación Caracol (Kse Ar-Lu)**

a) Definición

Imlay (1936) la describió como una secuencia de tobas desvitrificadas intercaladas con lutitas y con algunos estratos de calizas.

b) Distribución dentro del área de estudio

Esta unidad se encuentra ampliamente distribuida en la parte central y en la esquina SW como una franja NE-SW.

c) Litología y espesor

La unidad consta principalmente de una secuencia de areniscas y lutitas, de grano fino a medio, observándose feldespatos, cuarzo, fragmentos de roca y hojuelas de muscovita, empacados en matriz calcárea, de color gris verdoso y ocasionalmente color ocre con estratos de 10 a 40 cm de espesor. Espesor aproximadamente de 130 m.

d) Relaciones estratigráficas

Sobreyace en forma concordante y transicional a la Formación Indidura, definiéndose el contacto cuando desaparecen las calizas y aparecen las areniscas turbidíticas. La sobreyacen conglomerados policmíticos arenosos del Eoceno y Oligoceno, andesitas-basalto del Mioceno, conglomerados del Plioceno-Pleistoceno y aluviones, limos y arenas del Holoceno.

e) Edad y correlación

Los fósiles en ésta unidad son escasos y por su posición estratigráfica se le asigna una edad del Conaciano-Maatrictiano.

f) Ambiente de depósito

Corresponde a un evento regresivo tipo flysh de aguas poco profundas, dentro de la zona infralitoral.

## Terciario (Paleógeno)

### Conglomerado polimíctico (Teo Cgp-Ar)

#### a) Definición

Paquete formado de conglomerados y areniscas, derivados de la desintegración y erosión de las rocas sedimentarias Cretácicas y un granito. No contiene clastos de rocas volcánicas del Terciario.

#### b) Distribución dentro del área de estudio

Esta unidad es muy escasa en el área de estudio, aflora en la base de las rocas volcánicas del Oligoceno y en la base de algunas sierras, en la parte Este.

#### c) Litología y espesor

Unidad conglomerática pobremente clasificada y estratificada, con fragmentos de areniscas, lutitas, calizas, cuarzo y fragmentos de 5 a 30 cm de una granodiorita azul. Los clastos son subangulosos a subredondeados, embebidos en matriz arcillo-arenosa. En la parte inferior presenta horizontes tobáceos que marcan las pulsaciones iniciales del vulcanismo Terciario. En general aparece rellenando depresiones. Su espesor máximo es de hasta 120 m para la porción oriente de la zona de estudio (en el graben de Villa de Arista).

#### d) Relaciones estratigráficas

Esta unidad sobreyace discordantemente sobre las areniscas y lutitas de la Formación Caracol y es cubierta por las volcánicas del Oligoceno, es atravesada por derrames fisurales de andesita-basalto Miocénicas, por conglomerados policmícticos del Plioceno y por el aluvión, limos y arenas del Holoceno.

#### e) Edad y correlación

Esta unidad conglomerática no presenta fragmentos de rocas volcánicas del Oligoceno y por la posición estratigráfica que guarda en relación a ellas, se le ubica en el Eoceno y Oligoceno temprano.

#### f) Ambiente de depósito

Con el desarrollo de la tectónica extensional a partir del Terciario que generó hundimientos regionales escalonados en el sentido N-S a NW-SE, que coincide con estructuras laramílicas regionales. Las fosas comienzan a recibir un marcado y vigoroso aporte de las rocas preexistentes sujetas a una erosión de alta energía. Probablemente algunos cuerpos de agua fueron los responsables de la eventual cohesión de los fragmentos transportados.

## 6.2.2 Rocas volcánicas

### Riodacita (ToRD)

#### a) Definición

Roca porfirítica. Es la unidad más abundante de las rocas volcánicas. Se presenta en forma de derrames, fuentes y domos. La composición varía de riolita a riodacita, pasando por dacita y traquita, indicios de una diferenciación magmática.

#### b) Distribución dentro del área de estudio

Aflora en la esquina SE.

#### c) Litología y espesor

Roca porfirítica de colores claros como gris café, gris guinda a rosáceo, compacto, duro, con matriz microcristalina de cuarzo y feldespato, con contenido de 5-25 a 25-60% de cuarzo; 5-25 a 25-50% de feldespato K; 0.5 a 25-50% de plagioclasas, que la ubican de riolita a riodacita rica en K. Su espesor aproximado es de 450 m en la sierra del Durazno.

#### d) Relaciones estratigráficas

Sobreyace discordantemente por erosión al conglomerado policrístico del Eoceno-Oligoceno temprano. Subyace a un conglomerado olicrístico de la misma riodacita, a un paquete de tobas sin soldar e ignimbritas riolíticas del Oligoceno tardío. Es cubierta por andesita-basalto fisurales el Mioceno, por un conglomerado olicrístico del Plioceno-Pleistoceno, por basaltos del Pleistoceno y por aluvión, limos y gravas del Holoceno.

#### e) Edad y correlación

Esta unidad no ha sido datada en la zona, pero por la posición estratigráfica de las rocas volcánicas de la región, se le considera del Oligoceno.

#### f) Ambiente de depósito

Evento volcánico emplazado y depositado en un medio ambiente continental.

### Conglomerado Oligocrístico (To CgO)

#### a) Definición

Conglomerado formado por clastos de riodacita porfirítica, de parcial a completamente cementada.

#### b) Distribución dentro del área de estudio

Se ubica en la esquina SE.

c) Litología y espesor

Roca sedimentaria terrígena, los fragmentos líticos o clastos presentan bordes y aristas redondeadas, estos líticos son de composición riolítica a riodacítica, pues está formada por los siguientes elementos que son de 5 a 25 % de ortoclasa, de 0 a 5 % de cuarzo y de 0 a 5 % por hematita. Los clastos son de 0.2 a 0.6 m y ocasionalmente alcanzan un diámetro de 0.20 m. La matriz de este conglomerado la forman líticos bien clasificados con alta esfericidad y muy redondeados de arena muy fina a tamaño medio y arcillosa, están bien cementados con estratificación casi horizontal y con espesores de 0.2 a 0.8 m. En la base y parte media tiene horizontes de tobas de aire lo que anuncia el siguiente evento volcánico. El espesor aproximado de este conglomerado es de 200 m.

d) Relaciones estratigráficas

Esta unidad sobreyace a la riodacita porfirítica de forma discordante por erosión de la misma. Subyace a tobas riolíticas sin soldar y a las ignimbritas riolíticas, ambas del Oligoceno. Es cubierta por derrames fisurales de andesita-basalto Miocénica; por el conglomerado policmítico del Plioceno-Pleistoceno; por basaltos del Pleistoceno; por aluvi3n, gravas y limos del Holoceno.

e) Edad y correlaci3n

Oligoceno medio.

f) Ambiente de dep3sito

Corresponde a un ambiente continental, en forma restringida a la erosión relativamente rápida de la riodacita porfídica como resultado del basculamiento regional hacia el graben de Villa de Arista (al E de la zona de estudio).

## **Toba riolítica y riolita (To TR)**

a) Definición

Toba depositada por aire, bien clasificada, gradada, de color crema, con horizontes muy finos y otros arenosos.

b) Distribuci3n dentro del área de estudio

Se ubica en las esquinas SE y SW del área de estudio.

c) Litología y espesor

Toba depositada por aire, bien clasificada y gradada con horizontes de grano muy fino, color crema a rosa claro, con tonos naranja claros, con 50- 75% de vidrio, 5-25% de fragmentos de roca, 5-25% de cuarzo, 5-25% de ortoclasa como componentes principales, piroclástica cementada por vidrio y minerales arcillosos, clasificándola como

una toba vítrea de composición riolítica. Textura compacta, dura con matriz fluidal, y con feldespatos, hematita y arcilla. Toba bien clasificada y gradada con horizontes de grano muy fino. El espesor aproximado de esta unidad es de 30-60 m.

#### d) Relaciones estratigráficas

Esta unidad sobreyace discordantemente a la Formación Caracol y Formación Indidura del Cretácico superior; al conglomerado policmítico arenoso del Eoceno-Oligoceno; a la riolita porfirítica y al conglomerado olicmítico del Oligoceno, todos en forma discordante por efectos de la erosión. Subyace a la unidad de ignimbrita colapsada, al conglomerado policmítico arenoso del Plioceno-Pleistoceno y al aluvión del Holoceno.

#### e) Edad y correlación

Se considera a esta unidad como el miembro inferior de la Riolita Panalillo. Inicialmente fue datada en  $26.8 \pm 1.3$  m.a. (Labarthe-Tristán-Aranda, 1982), pero en trabajos posteriores se dató en  $29.0 \pm 1.5$  m.a. (Labarthe-Jiménez, 1993), ambas dataciones por el método de K/Ar, ubicándola en el Oligoceno.

#### f) Ambiente de depósito

Roca depositada en ambiente continental.

## **Ignimbrita riolítica (Tolg)**

### a) Definición

La ignimbrita es el miembro superior de la Riolita Panalillo, definida por Labarthe, Tristán y Aranda en 1982, en la Hoja San Luis Potosí, en la comunidad El Panalillo al oriente de la capital. El miembro superior consta de dos unidades: Una ignimbrita de color café gris claro, bien soldada, con fragmentos de pómez alargados muy colapsados y de textura porfirítica. La otra unidad inmediatamente sobre la anterior, la describen como una ignimbrita bien soldada, de color gris rosáceo a café gris rojizo, de textura merocristalina, porfirítica, fluidal, matriz desvitrificada, con numerosas esferolitas rellenas de cuarzo o de calcedonia. A la unidad inferior la llamaron ignimbrita colapsada y a la unidad superior la nombraron ignimbrita esferolítica. En esta carta predomina la unidad inferior, o sea la colapsada y sólo afloran pequeños remanentes de la esferolítica. Para efectos cartográficos se mapeó como una sola unidad, o sea, la ignimbrita colapsada.

### b) Distribución dentro del área de estudio

Aflora en la parte Centro, Centro-Este de la zona de estudio, de manera aislada en la cima de algunos cerros ubicados al E y al W del anticlinorio Santa Catarina.

c) Litología y espesor

Es una ignimbrita color café claro, compacta y dura, con lentes de pómez, colapsada. Los componentes principales son: 50-75% de vidrio; 5-25% de cuarzo; 5-25% de ortoclasa; 5% de oligoclasa y 5% de fragmentos de roca, como componentes principales con una microtextura piroclástica en matriz de vidrio, por lo cual, se clasifica como una toba vítrea de composición riolítica. Su espesor aproximado es de 50 a 60 m.

d) Relaciones estratigráficas

Sobreyace a la toba riolítica depositada por aire principalmente, y en forma discordante a la Formación Caracol del Cretácico; a la riodacita porfirítica y al conglomerado olicmítico. Subyace a la andesita-basalto del Mioceno, al conglomerado policmítico arenoso del Plioceno y al aluvión, limos y arenas del Holoceno, todos de forma discordante.

e) Edad y correlación

Oligoceno.

f) Ambiente de depósito

Ambiente continental.

## Terciario (Neógeno)

### Andesita Basalto (TmA B)

a) Definición

Derrames fisurales de composición andesíticos-basálticos, de color gris oscuro a verdosa de textura afanítica. Se emplazaron en forma casi vertical, con una orientación predominante N-S en forma de franjas paralelas.

b) Distribución dentro del área de estudio

Esta unidad se encuentra de manera aislada y en pocas dimensiones en la parte SE.

c) Litología y espesor

Es una roca de color gris oscuro a verdoso que intemperiza a colores de verde rojizo a lila, afanítica y cercana a la fuente se hace muy vesicular con relleno de calcedonia y ocasionalmente de cuarzo amatista, atravesada por vetillas de calcita y calcedonia. Los componentes principales son: 25-50% a 50-75% de oligoclasa-andesina; 5-25% de labradorita-bituwnita; 5-25% de olivino; 5-25% hipestena-augita; 0-5% a 5-25% de ortoclasa. Son resultados de varios análisis que ubican a esta roca entre una andesita-basalto, en ocasiones rica en K, su micro-textura varía de intersertal a microlítica con matriz feldespática. Esta roca presenta un espesor aproximado de 80 a 100 m.

d) Relaciones estratigráficas

Esta unidad sobreyace discordantemente a las formaciones Indidura y Caracol del Cretácico superior; al conglomerado policimítico del Eoceno; a la riolita porfirítica; al conglomerado olicimítico; a la toba riolítica depositada por aire y a la ignimbrita riolítica, todas estas unidades del Oligoceno. Subyace discordantemente al conglomerado policimítico arenoso del Plioceno-Pleistoceno; al basalto del Pleistoceno y al aluvión del Holoceno.

e) Edad y correlación

Edad Miocénica.

f) Ambiente de depósito

Se depositó como derrames fisurales en un ambiente continental.

### **Conglomerado polimítico-arenisca (Tpl Qpt Cgp-Ar)**

a) Definición

Paquete formado por conglomerados y areniscas derivados de la desintegración y erosión de las rocas preexistentes. Las mejores exposiciones de esta unidad se encuentran en los lechos de los arroyos y en las laderas de las sierras.

b) Distribución dentro del área de estudio

Esta es la unidad más abundante de la zona de estudio. Se encuentra depositada en toda la cuenca.

c) Litología y espesor

Es un conjunto de clastos del tamaño de arenas y gravas hasta de 15 a 20 cm. Los fragmentos principales son de calizas, areniscas, cuarzo, pedernal, riolitas, andesitas y basaltos. El conglomerado se presenta bien cementado en la ladera poniente del cerro Las Minas y parcialmente cementado en los arroyos profundos. Al intemperismo toma un color blanco amarillento. La variedad litológica sugiere una intensa denudación y transporte hacia el oriente y centro. El espesor estimado es de 80 m.

d) Relaciones estratigráficas

Cubre parte de la secuencia sedimentaria Cretácica y a las rocas volcánicas del Terciario y subyace al aluvión, limos y arenas del Holoceno.

e) Edad y correlación

Su edad es Pliocuaternaria.

f) Ambiente de depósito

Corresponde a un ambiente continental fluviolacustre por acumulación y compactación de la erosión de rocas preexistentes.

## Cuaternario

### Basalto (Qpt-B)

a) Definición

Esta unidad volcánica se divide en dos miembros: uno piroclástico y otro como flujos de basalto.

*Miembro Inferior:* Flujos piroclásticos de basalto vesicular color negro y escórea basáltica en una matriz de arena volcánica con nódulos aislados de Lherzolita, brechas basálticas mal clasificadas de basalto vesicular y toba que varía de lapilli a ceniza volcánica.

*Miembro Superior:* Derrames basálticos y coladas fisurales de basanita color negro, vesicular con textura afanítica, ligeramente porosa, compacta y dura. Este miembro se encuentra principalmente rellenando paleodepresiones como derrames lobulares o como conos piroclásticos.

b) Distribución dentro del área de estudio

Se ubica de manera aislada al NW y al Centro Sur.

c) Litología y espesor

El miembro inferior formado por flujos piroclásticos de basalto vesicular de color negro y escórea basáltica en una matriz de arena volcánica con aislados nódulos de Lherzolita, las brechas basálticas mal clasificadas con fragmentos de, 0.3 a 0.30 m de basalto vesicular. La toba varía de Lapilli a ceniza volcánica. Este material se restringe a los conos de eyección de material volcánico y forma conos cineríticos con espesores de 50 m. El miembro basáltico, son derrames y coladas fisurales de basanita color negro, vesicular, con textura afanítica ligeramente porosa, compacta y dura con 50-75% de labradorita; 5-25% de hornblenda; 5-25% de vidrio amorfo; 5-25% de minerales opacos (hematita y magnetita); 0-5% de augita-hiperstena granular; 0-5% de olivino subhedral. Este miembro se deposita en forma de derrames o lengüetas lobulares rellenando paleodepresiones de la superficie antigua, el espesor estimado de los flujos es de 150 m y en las lomas es de 50 m.

d) Relaciones estratigráficas

Esta unidad sobreyace discordantemente al conglomerado policrítico arenoso del

Eoceno; a la riolita porfirítica y al conglomerado olicmítico del Oligoceno; a la andesita-basalto del Mioceno; al conglomerado policmítico arenoso del Plioceno-Pleistoceno. Son cubiertos discordantemente por aluvión, limos y gravas del Holoceno.

e) Edad y correlación  
Pleistoceno.

f) Ambiente de depósito  
Flujos piroclásticos y derrames basálticos depositados en un ambiente continental.

### **Limos-Arenas (Qholm-ar)**

a) Definición

Los materiales sueltos que se encuentran cubriendo a los conglomerados policmíticos y areniscas, se nombran genéricamente limos y gravas.

b) Distribución dentro del área de estudio

Se encuentra en toda la porción E desde el N hasta el S, cubriendo las partes topográficamente planas.

c) Litología y espesor

La unidad está constituida esencialmente por la misma diversidad litológica que se observa en los conglomerados policmíticos y areniscas, conforman una capa de 5 a 20 m de espesor, formados de gravas, arenas y limos, que no exhiben cohesión alguna y están acompañados por caliche de color blanco de 0.15 a 0.25 m de espesor, con colores que van del blanco a café cremoso amarillento.

d) Relaciones estratigráficas

Se encuentra rellenando valles y cubre a todas las unidades preexistentes de la porción E del área de estudio.

e) Edad y correlación

Cima del Pleistoceno hasta el Holoceno.

f) Ambiente de depósito

Continental, producto de la erosión en ambiente desértico, cuando rellenan fosas alcanzan su máxima expresión y potencia.

## Aluvión (Qho-al)

### a) Definición

Materiales no consolidados productos de la erosión de todas las rocas preexistentes.

### b) Distribución dentro del área de estudio

Esta unidad aflora en los lechos de los ríos y arroyos y en los potreros cercanos a ellos.

### c) Litología y espesor

Material no consolidado de diferentes composiciones: cuarzo, areniscas, calizas, rocas volcánicas y caliche, con un espesor estimado en los arroyos y potreros de 2 m.

### d) Relaciones estratigráficas

Cubre rocas preexistentes.

### e) Edad y correlación

Holoceno.

### f) Ambiente de depósito

Continental, como producto de la erosión de gravas y arenas que conforman las partes más planas del área de estudio, con posible acumulación en cuerpos de agua intermitente.

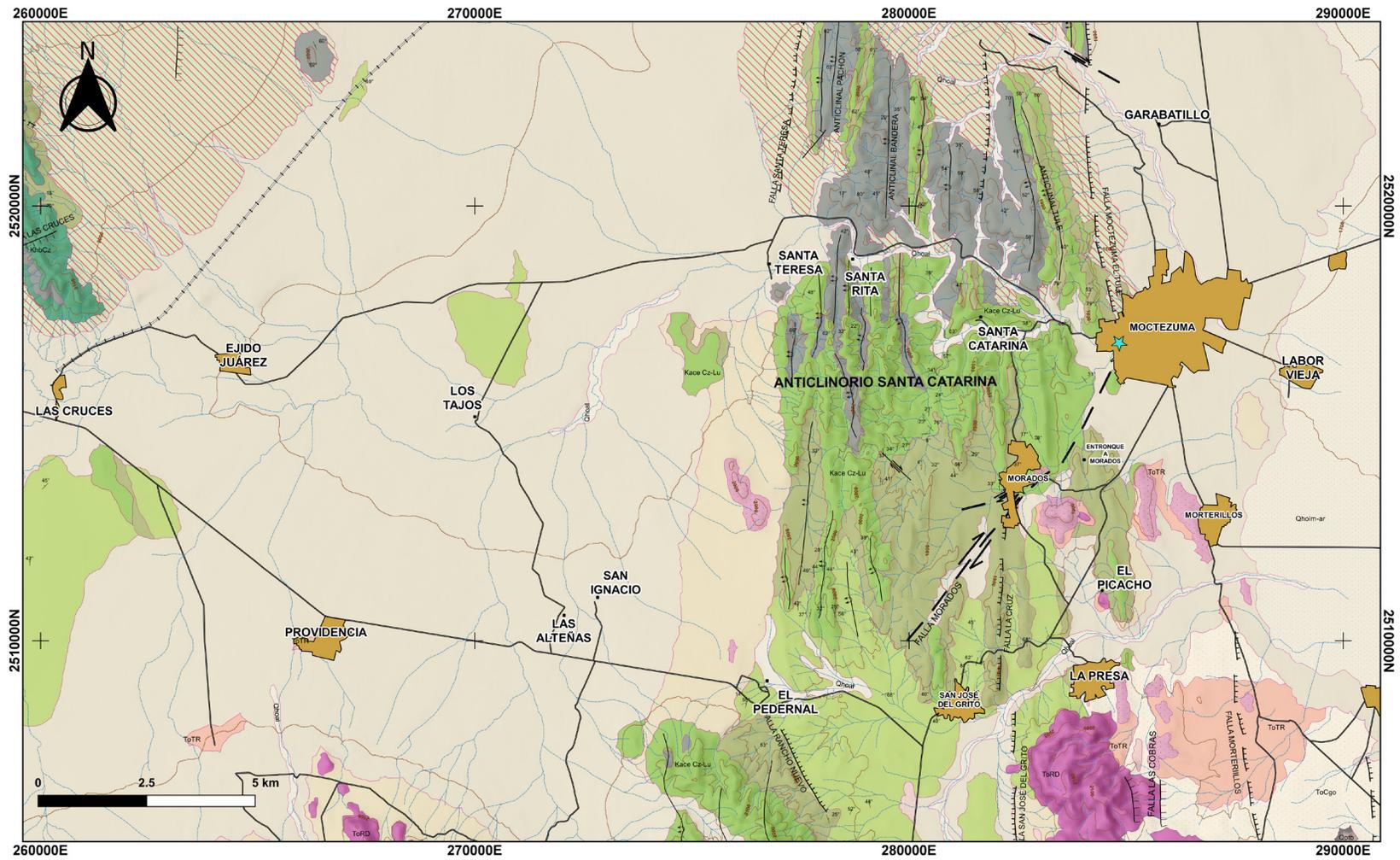


Figura 26. Mapa geológico de la zona de estudio. Tomado y modificado de SGM, 2004.

Leyenda			
<b>SÍMBOLOS TOPOGRÁFICOS</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>----- Falla normal</li> <li>----- Falla normal inferida</li> <li>----- Falla lateral inferida</li> <li>----- Anticlinal</li> <li>----- Rumbos y echados</li> </ul>	<b>TERCIARIO-NEÓGENO</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Conglomerado polimíctico-arenisca (TpiQpt Cgp-Ar)</li> <li>Andesita-basalto (TmA-B)</li> </ul>	<b>CRETÁCICO SUPERIOR</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Fm. Caracol (Kse Ar-Lu)</li> <li>Fm. Indidura (KtCz-Lu)</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Corriente de agua</li> <li>1000- Curvas de nivel 100 m</li> <li>Población</li> <li>Localidad</li> <li>Carretera</li> <li>Vía férrea</li> <li>Manantial</li> </ul>	<b>CUATERNARIO</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Aluvión (Qhoal)</li> <li>Limo-arena (Qholm-ar)</li> <li>Basalto (Qptb)</li> </ul>	<b>TERCIARIO-PALEÓGENO</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Ignimbrita (Tolg)</li> <li>Toba riolítica (ToTR)</li> <li>Conglomerado oligomíctico (ToCgo)</li> <li>Riodacita (ToRD)</li> <li>Conglomerado polimíctico (Teo-Cgp)</li> <li>Conglomerado polimíctico-arenisca (Teo Cgp-ar)</li> </ul>	<b>CRETÁCICO INFERIOR</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Fm. Cuesta del Cura (Kace Cz-Lu)</li> <li>Fm. La Peña (Kapa Cz-Lu)</li> <li>Fm. Cupido (Khb Cz)</li> </ul>
<b>SÍMBOLOS GEOLÓGICOS</b> <b>ESTRUCTURAL</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Falla lateral</li> </ul>			

Específicamente, en el área de estudio (figura 27), se puede observar que, hacia el oriente, en el anticlinorio Santa Catarina, aflora en la superficie la Formación Cuesta del Cura del Cretácico inferior, la cual se encuentra intensamente plegada, mientras que, hacia el poniente, esta se profundiza, infiriéndose que aflora la Formación Caracol en el graben de Santa Teresa, la cual es cubierta por el conglomerado polimíctico-arenisca del Neógeno.

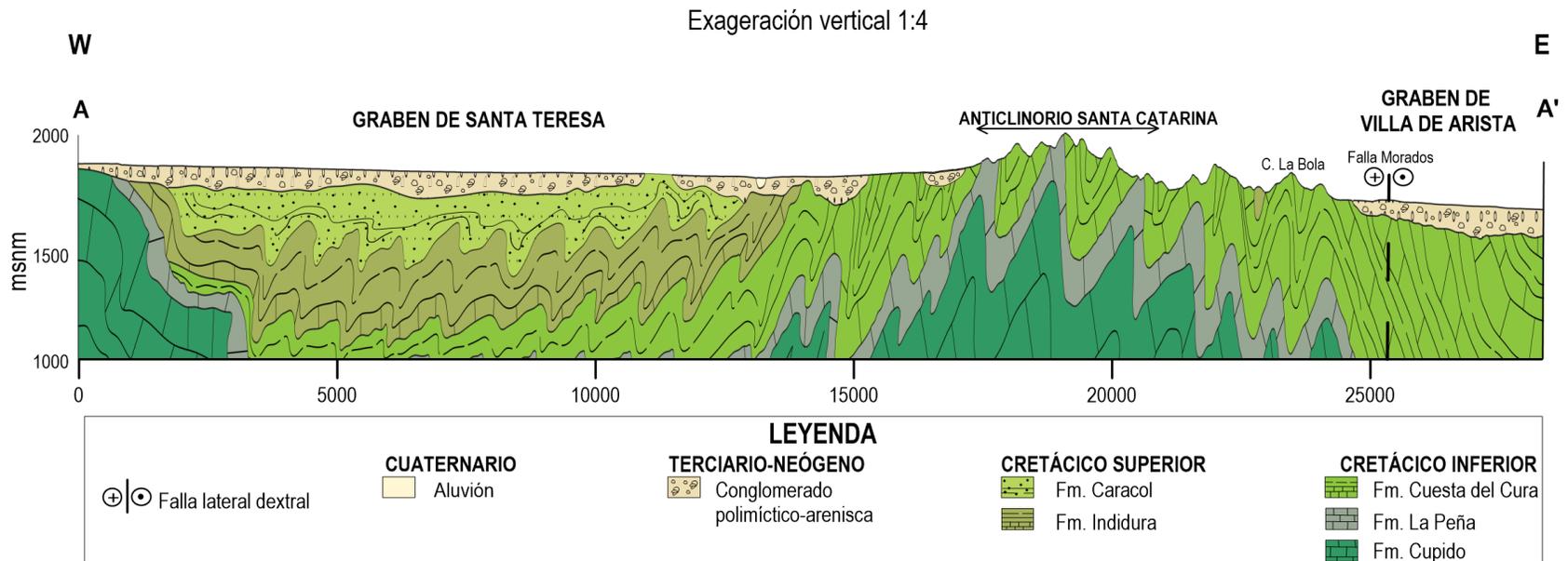


Figura 27. Sección geológica A-A'. Tomado y modificado de SGM, 2004.

## 7. Metodología

---

Para cumplir con los objetivos, el presente trabajo consistió de cuatro etapas: 1) gestión, 2) campo, 3) laboratorio y 4) gabinete.

### 7.1 Etapa de gestión

Durante la etapa de gestión, se dialogó con los funcionarios del Ayuntamiento del municipio de Moctezuma para establecer fechas, solicitar permisos y vincularnos con la gente de la población para las salidas de campo.

El primer acercamiento se realizó con el Lic. Jesús Edgardo Martínez, asesor jurídico del municipio quien nos presentó a algunos miembros de la población para informarles que durante los meses de septiembre 2018 a abril 2019 se realizarían visitas en las localidades de Moctezuma con el fin de medir obras hidráulicas y cobertura vegetal; posteriormente programó una cita con el Presidente Municipal Constitucional C. Mario Díaz Hernández para mostrar los avances del proyecto.

En esta etapa se diseñaron los formatos necesarios para ir campo como las entrevistas semi-estructuradas, los consentimientos informados y fichas de registro para cobertura superficial y para muestreos de agua.

## 7.2 Etapa de campo

Para el cumplimiento de esta etapa fue necesario realizar las siguientes actividades: 1) censo de aprovechamientos 2) medición de profundidad y nivel estático 3) medición de parámetros hidrogeoquímicos 4) toma de muestras de agua, 5) muestreo de cobertura superficial del suelo y 6) aplicación de entrevistas semi-estructuradas.

### 7.2.1 Censo de aprovechamiento

La toma de muestras de agua se realizó a finales de la temporada de lluvia (septiembre y noviembre 2018) y en la temporada de estiaje (febrero-marzo de 2019) en pozos, norias, bordos y manantiales. Los sitios de toma de muestras de agua fueron seleccionados en lugares en los que actualmente la población aprovecha el agua subterránea, cerca de las localidades, principalmente hacia la parte oeste de la cabecera municipal de Moctezuma, donde el acceso fue permitido.

Se obtuvo un total de 39 muestras, de las cuales 14 fueron tomadas en norias, 14 en pozos, tres en bordos y ocho en manantiales (figura 28).

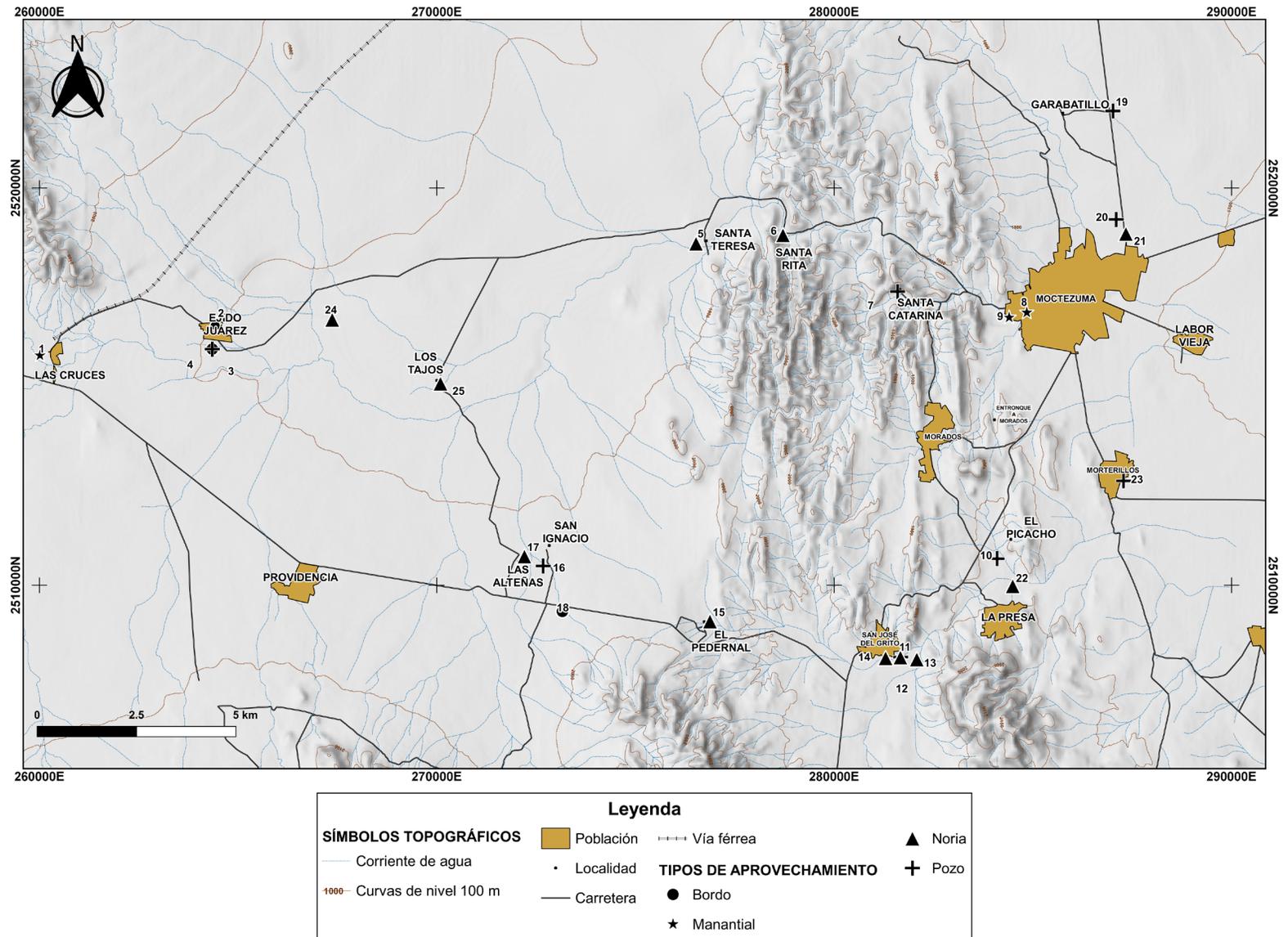


Figura 28. Sitios muestreados en aprovechamientos de agua superficial y subterránea. Elaboración propia.

Para llevar a cabo un adecuado control de cada punto de muestreo fue necesario realizar un Censo de Aprovechamientos con apoyo de fichas técnicas (figura 29). El Censo permitió conocer el número y la distribución de los aprovechamientos existentes. Con base en la información disponible, recorridos de campo y comentarios de la gente de las localidades, se realizó la verificación de la mayoría de los aprovechamientos subterráneos.

### CENSO DE APROVECHAMIENTOS




DATOS GENERALES		FECHA DE CENSO (d/m/a): 02-NOV-18	
TIPO DE APROVECHAMIENTO: <small>(pozo, noria, manantial, bordo)</small>	Pozo	SITUACIÓN ACTUAL DEL APROVECHAMIENTO: <small>(Activo ó Inactivo)</small>	Activo
USO DEL AGUA:	Regadío	REGIMEN DE OPERACIÓN:	HORAS/SEMANA
NOMBRE DEL APROVECHAMIENTO:	Pozo garabatillo	CLAVE DE IDENTIFICACIÓN:	19
LOCALIDAD O NOMBRE LOCAL:	Garabatillo	ACUÍFERO Y CLAVE:	
ESTADO:	S.L.P.	CTA. INEGI N°:	
MUNICIPIO:	Matzucuma		
PROPIETARIO:			

UBICACIÓN GEOGRÁFICA			
DATUM:	WGS 84	ZONA HORARIA:	14 G
SISTEMA DE COORDENADAS:	UTM		
COORDENADAS:	W=X= m 287017	N=Y= m 2521938	ELEVACIÓN Z= m.s.n.m. 1769

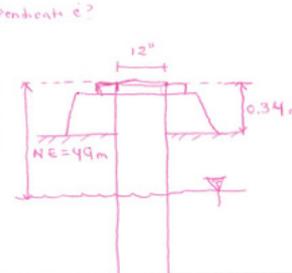
CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL APROVECHAMIENTO	
CONCEPTO	SI / NO
¿EXISTE MEDIDOR DE FLUJO?	SI
¿EXISTE REGISTRO ELÉCTRICO?	NO
¿EXISTE CORTE GEOLÓGICO?	NO
¿LONGITUD DE CORTINA?	NA
¿ALTURA DE CORTINA AL NIVEL DEL AGUA?	NA
¿CROQUIS DE TERMINACIÓN DE LA OBRA?	NO
¿EXISTE PRUEBA DE AFORO?	NO
¿EXISTE PRUEBA DE BOMBEO?	NO
¿EXISTEN ANÁLISIS QUÍMICOS?	NO
¿CUENTA CON EQUIPO DE BOMBEO?	SI

TIPO DE MOTOR: (A) Eléctrico, (B) combustión interna, (C) aife, (D) tracción manual, (F) tracción animal, (G) tracción de tractor	A	POTENCIA DE MOTOR Y R.P.M.	NPD
TIPO DE BOMBA: (A) Turbina vertical lubricada con agua, (B) turbina vertical lubricada con aceite, (C) sumergible, (D) centrífuga, (E) pistón-guabalete.			NPD SUMERGIBLE

MEDICIÓN DE NIVEL DE AGUA	
FECHA DE MEDICIÓN DE NIVEL ESTÁTICO: 02-11-18	D/M/A
ALTURA DE BROCAL RESPECTO AL NIVEL DE TERRENO: 0.24	m
NIVEL ESTÁTICO A PARTIR DE LA ALTURA DE BROCAL: 49	m
PROFUNDIDAD TOTAL DE LA OBRA:	m
LONGITUD DE COLUMNA DE SUCCIÓN:	m
DIÁMETRO DE ADEME: 12"	Pulg
DIÁMETRO DE COLUMNA DE SUCCIÓN: 6"	Pulg
DIÁMETRO DE DESCARGA: 6"	Pulg
CAUDAL DE OPERACIÓN:	L.P.S.
TIPO DE DESCARGA (libre, tanque elevado, a la red, mixta): A la red	
AÑO DE CONSTRUCCIÓN:	

FOTOGRAFÍA DEL APROVECHAMIENTO:

CROQUIS QUE INDICA LA REFERENCIA DONDE SE REGISTRÓ LA MEDICIÓN DE N.E. Ó N.D.



NOMENCLATURA USADA:  
 NM=No se ha muestreado,  
 NA=No aplica,  
 ..... No amerita comentario,  
 e=Valor estimado,  
 NPD= No proporcionó dato,  
 SD=Sin Dato

OBSERVACIONES GENERALES:  
 El pozo se encontró apagado

DEPENDENCIA O EMPRESA INFORMANTE:  
Pocera

VERIFICÓ  
Socrates / Abasco / castro

Figura 29. Ficha de campo de Censo de aprovechamientos.

En cada punto de muestreo se recopiló la mayor cantidad de información posible como: a) nombre y datos del propietario, b) ubicación y características de la captación, c) uso al que se destina el agua, d) coordenadas del sitio, d) profundidad al nivel estático o dinámico, e) fotografías y croquis, f) tipo de equipo de bombeo y g) parámetros fisicoquímicos. Se describieron e identificaron todos los aprovechamientos y afloramientos de agua subterránea (manantiales) independientemente de si eran aprovechados o no.

## 7.2.2 Medición de profundidad y nivel estático

La profundidad total de un aprovechamiento de agua subterránea puede proporcionar información sobre la distribución lateral y vertical de la carga hidráulica entre los acuíferos individuales y sistemas acuíferos. Las mediciones a largo plazo pueden proporcionar información sobre las tendencias temporales en los niveles de agua subterránea, así como su dirección de flujo por factores como efectos de sequía, altas precipitaciones y bombeo de agua subterránea, entre otros (CONAGUA, 2015).

Se le denomina nivel estático a la profundidad a partir del nivel del terreno a la que se encuentra la superficie del agua subterránea en un aprovechamiento que no tiene la influencia de extracción de agua en él mismo o de otro cercano (figura 30).

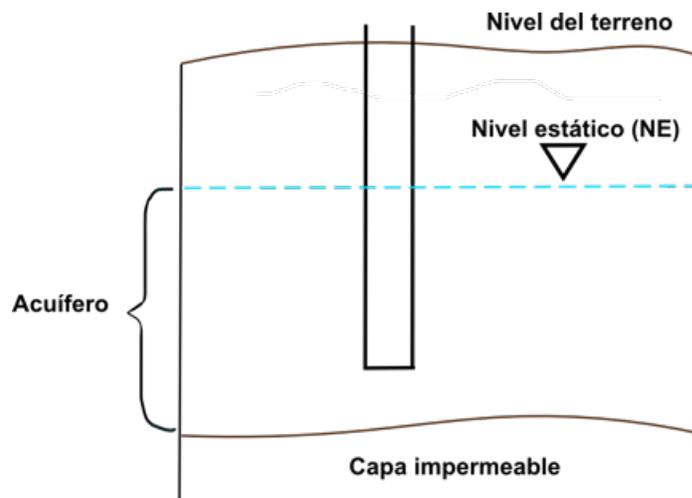


Figura 30. Esquema de nivel estático en un acuífero libre. Elaboración propia.

La medición del nivel estático se realizó en los pozos y norias donde se pudo introducir el equipo, el cual consistió en una sonda eléctrica Solinst modelo Water Level Meter Model 101. Para la medición de pozos con equipo de bombeo fue necesario que éste no hubiera estado en operación por lo menos 2 hrs. antes; el procedimiento consistió en bajar la punta de la sonda dentro de la perforación hasta que ésta tocara el agua (figura 31). Las mediciones fueron anotadas en las fichas de campo y al terminar en cada punto de muestreo, la sonda se limpió con agua destilada para evitar cualquier tipo de contaminación o alteración en los datos.



Figura 31. Mediciones de profundidad y nivel estático de una noria con la sonda eléctrica.

### 7.2.3 Medición de parámetros hidrogeoquímicos

La medición de parámetros es indispensable para evitar que la composición química del agua sea alterada, ya que ésta está controlada por equilibrios químicos de los carbonatos y de otros minerales que varían en función del tiempo y de las condiciones originales en las que se encuentra el agua subterránea. Esta estrategia ayuda a obtener datos confiables rápidamente y con un disturbio mínimo a las condiciones hidrogeológicas y geoquímicas del sitio permitiendo un control de referencia adecuado a las mediciones en laboratorio. Dentro de los parámetros que deben medirse se encuentran: pH,

temperatura (°C), conductividad eléctrica (CE), potencial REDOX (Eh) y concentración de oxígeno disuelto (OD, en % y mg/L).

La obtención de estos datos se realizó con un aparato digital portátil o sonda multiparámetros calibrada, Professional Series YSI (figura 32) la cual fue previamente calibrada con soluciones buffer de 4 y 7. El procedimiento consistió en introducir el electrodo en cada cuerpo de agua y anotar repetidamente en las fichas de campo Hidrogeoguímica (figura 33) los datos que el equipo medía en intervalos de dos minutos hasta que éstos se estabilizaran. Para el caso de pozos con equipo de bombeo fue necesario introducir el electrodo en una celda de aislamiento para evitar dañar el equipo (figura 34). La sonda fue lavada con agua destilada antes de ser utilizada en cada punto de muestreo.



Figura 32. Sonda multiparámetros Professional Series YSI.

DATOS FÍSICOS Y QUÍMICOS DE MUESTRAS DE AGUA SUBTERRÁNEA											
DATOS GENERALES											
Clave del Aprovechamiento	Número de muestra		10 A								
Coordenadas UTM Datum WGS84	X=284100	Y=2810673									
Elevación (masm)	17.97	Zona UTM		14 Q							
Municipio	Matzucum										
Localidad	El pisacho										
Fecha	03 - NOV - 2018										
Litología Predominante	Aluvión										
Prof. al Nivel del agua	NE	m	ND 40.85 m								
Lugar de Toma de Muestra	Barrero	Pista	Canal	Estanqueal Ugo/Marcano							
Tipo de Aprovechamiento	Pozo	Nota	Manantial	Galería							
Uso del Agua	Barrero	Anejo	Presa	Papalote							
	Polable	Agrícola	Forestal	Doméstico							
	Agropecuaria	Abrevadero	Industrial	Servicios							
Tipo de Bomba	Turbina Vertical	Sumergible	Centrifuga								
	Eléctrica	Sin Equipo	Otro								
Profundidad (m)	350m										
	Caudal de extracción (l/s)										
CARACTERÍSTICAS ORGANOLÉPTICAS											
Color	Incolora			Olor			Inodora				
Apariencia	Transparente			Sedimentación			NO				
Turbidez	No			Dispersión de gases			SI				
PARÁMETROS MEDIDOS EN CAMPO											
Hora de inicio											
Tiempo (min)	1	3	5	7	9	11					
T(°C)	27.4	27.4	27.4	27.4	27.4	27.4					
O.D. (%)	0.6	0	0	0	0	0					
O.D. (mg/l)	0	0	0	0	0	0					
CE (microSiemens)	112.9	113.9	114.1	114.0	113.9	114.1					
pH	7.27	7.26	7.26	7.26	7.26	7.26					
ORP (E campo en mV)	68.1	68.5	68	68	68	68					
DETERMINACIÓN DE ALCALINIDAD DE CAMPO											
N ácido	1.6 ± 0.005		V muestra (Ncal)		ml		Filtrado			SI	NO
Nº de MUESTRAS	0	20	40	60	80	100	110	121	130	140	150
pH	7.26	6.75	6.59	6.35	6.09	5.95	5.85	5.69	5.52	5.29	4.77
										9.55/162	4.25/184
										3.57/189	3.23/187
										3.20/168	
INFORMACIÓN DE LA MUESTRA DE AGUA COLECTADA											
MUESTRA PARA	TIPO DE ENVASE	CANTIDAD	CAPACIDAD	CONSERVADOR	FILTRADO	Check					
CATEGORÍAS Y REALES	POLETILENO	1	60 ML	REFRIGERACIÓN H204	SI	✓					
ANONES	POLETILENO	1	500 ML	REFRIGERACIÓN H204	NO	✓					
2 H - 150	"	"	100 ML	REFRIGERACIÓN	SI	✓					
Multiparámetros	"	"	300ml	"	SI	✓					
OBSERVACIONES					FOTOGRAFÍA						
<p>ND = 40.85 m a las 10:30 hr</p> <p>Lo apagaron a las 16:20 hrs</p> <p>Inicia 9:24 a medir la Multiparámetros</p> <p>8:28 - velo de agua</p> <p>8:25 - velo de agua</p> <p>8:30 - velo de agua</p> <p>9:27 - velo de agua</p> <p>8:30/9:25 burbujas se observan en la multipar</p> <p>Regreso pH = 7.10</p>											

Figura 33. Ficha de campo para el registro de datos físico-químicos.



Figura 34. Celda de aislamiento de la sonda multiparámetros.

A continuación, se describen cada uno de los parámetros mencionados, así como su importancia relativa dentro del estudio del agua subterránea:

### pH

El pH es una expresión de la actividad del ion hidrógeno que se define como el logaritmo negativo de la actividad del ion hidrógeno en moles por litro (Kehew, 2000). Su escala es del 0 al 14, donde un pH elevado indica baja concentración de iones  $H^+$ , y por lo tanto una alcalinización del medio. Por el contrario, un pH bajo indica una acidificación del medio. En el agua subterránea el pH tiende a ser balanceado, pues en ella es difícil encontrar minerales libres (Sawyer, C., McCarty, P., & Parkin, 2001). Cuando el agua subterránea es removida de un acuífero los controles físicos que gobiernan la actividad del ion hidrogeno cambian y entonces el pH también (Lloyd y Heathcote, 1985). La actividad del ion hidrógeno es una variable clave en los sistemas de agua subterránea, ya que el ion hidrógeno participa en la mayoría de las reacciones químicas que afectan la composición del agua (Bueno, 2005).

## Temperatura (°C)

La temperatura del agua es considerada un parámetro de importancia porque influye en la solubilidad de las sales y sobre todo en la de los gases; así como, en la disociación de las sales disueltas y por lo tanto en la conductividad eléctrica, y en el pH del agua. Con una temperatura elevada es esperable una menor cantidad de oxígeno disuelto, lo cual es perjudicial para los organismos acuáticos que contribuyen de forma natural a su depuración (Metcalf y Eddy, 1996). Las reacciones químicas de la interacción agua-acuífero van en función de la temperatura, por lo tanto, la medición en campo de este parámetro es de vital importancia en los cálculos relacionados con interpretaciones hidrogeoquímicas. La temperatura del agua subterránea generalmente varía muy poco, por lo que cuando su incremento es notable, permite distinguir diferentes profundidades de circulación o factores específicos que afectan localmente al acuífero (Bueno, 2005).

## Conductividad eléctrica (CE)

La conductividad eléctrica, es una medida de la cantidad de sales disueltas o de la actividad iónica de una solución, en términos de su capacidad para transmitir corriente, que varía en función de la temperatura y está estrechamente ligada a la naturaleza de las sustancias disueltas. Por lo anterior esta medida tiene una relación con la presencia de sólidos disueltos totales (Barrenechea, 2004), sus unidades se expresan en microSiem/cm.

## Potencial REDOX (Eh)

El potencial de óxido reducción o REDOX es una medida cualitativa, sin embargo, puede ser de valor si se mide en conjunto con el pH del agua. Este parámetro mide la tendencia de un sistema a oxidar o reducir una especie química. Los sistemas REDOX están relacionados directamente con el pH, el oxígeno disuelto, la presión y la temperatura. El Eh es importante en los procesos de disolución de sales por el ataque del agua a los minerales, ya que las especies químicas pueden cambiar su estado de valencia, oxidándose o reduciéndose una y otra vez (Ibañez, 2017). Los procesos de reducción y oxidación ejercen un control importante sobre las concentraciones naturales de  $O_2$ ,  $Fe_2$ ,  $SO$ ,  $H_2S$ ,  $CH_4$ , etc. en las aguas subterráneas. Estas reacciones se producen a través de la transferencia de electrones de un átomo a otro y el orden en el que se producen puede predecirse a partir de la termodinámica de equilibrio estándar. Los procesos REDOX en aguas subterráneas se producen normalmente mediante la adición de un oxidante, como  $O_2$  o  $NO_2$  a un acuífero que contiene un reductor. Sin embargo, la adición de un reductor, como la materia orgánica disuelta que se filtra de los suelos o vertederos también puede ser importante (Apello, 2007).

## Oxígeno disuelto (OD)

La presencia de oxígeno disuelto en el agua subterránea normalmente indica reciente exposición a la influencia atmosférica. Una vez que la muestra es tomada, la reoxigenación puede ocurrir rápidamente por el cambio de un medio cerrado (acuífero) al ambiente atmosférico; por lo tanto, el uso de la celda de aislamiento para estas y las demás determinaciones es sumamente importante, para proveer condiciones similares a las que el agua subterránea se encuentra dentro del acuífero. Los niveles de oxígeno disuelto en aguas naturales y residuales dependen de la actividad física, química y bioquímica del sistema de agua. La solubilidad del oxígeno en el agua varía directamente con la presión atmosférica, a cualquier temperatura y con la presencia de sales y/o sólidos. En el agua, el oxígeno disuelto afecta, principalmente, las reacciones en las que participan el hierro, manganeso, cobre y los compuestos que contienen nitrógeno y azufre (Jiménez-Cisneros, 2001).

## Alcalinidad

La alcalinidad del agua es una medida de su capacidad para neutralizar ácidos. El término alcalinidad total se define como la suma de equivalentes en forma de bases que reaccionan con un ácido fuerte, o bien, como la capacidad de una solución para aceptar protones. En aguas naturales, estas bases son comúnmente hidróxido, carbonato y bicarbonato de los iones Ca, Mg, Na, K, y NH, siendo los más comunes calcio y magnesio. Estas reacciones explican por qué la cantidad de ácido utilizado para titular una muestra de agua a pH 4.5, representa la alcalinidad del agua. El principal efecto de la alcalinidad es la reacción de carbonatos de calcio con ciertos cationes en el agua, lo que conduce a la formación de precipitados (Jiménez-Cisneros, 2001).

Éste es otro de los parámetros que fácilmente sufre alteración cuando el agua subterránea entra en contacto con la atmósfera, por lo que es conveniente realizarla en campo o en caso de no ser posible, debe realizarse inmediatamente al llevar las muestras al laboratorio. El método más exacto para la determinación de la alcalinidad es el llamado Titulación de Gran. El principio de éste método es que pasado el punto donde todo el  $\text{HCO}_3$  ha sido convertido a  $\text{H}_2\text{CO}_3$  (pH= 4.3) la concentración de H se incrementa linealmente con la cantidad de H añadido. En la práctica, el volumen del ácido fuerte ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), es graficado contra la función de GRAN  $F=(V+V_0)*10-\text{pH}$  donde V es el volumen del ácido añadido y  $V_0$  es el volumen de la alícuota.

Para la determinación de la alcalinidad se utilizó un titulador marca Hach modelo AL-DT (figura 35) con rango de medición de 10 a 4,000 mg/L, el cual consiste en una pistola graduada y ampollitas de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  0.16 N. Se agregó el ácido a una alícuota de 25 mL y

se agitó y midió inmediatamente con el conductímetro PC 18 (figura 36) debidamente calibrado (con estándares de 4 y 7) hasta llegar a un pH de 4.3. Cada vez que se le agregó el ácido, la medición fue anotada en la ficha de campo, para así obtener lecturas de pH para diferentes cantidades de ácido para posteriormente en gabinete, introducir las mediciones en el programa Alk y obtener los valores de cada muestra.



Figura 35. Titulador marca Hach modelo AL-DT.



Figura 36. Conductímetro PC 18.

## 7.2.4 Toma de muestras de agua

Para la toma de muestras de agua, fue necesario preparar los envases, previo a la salida de campo, con el fin de preservar las muestras adecuadamente e impedir que éstas se contaminaran. El procedimiento consistió en enjuagar los envases, tapas y contratapas primero con agua simple para eliminar cualquier residuo, sedimento, lama o similar y después tallándolas con limpiapipas y con jabón Extran; posteriormente los envases de enjuagaron con ácido clorhídrico al 5% y finalmente con agua destilada; una vez que los envases estuvieron secos se colocó masking para su rotulación en campo y se prepararon los paquetes para el campo, los cuales consistían en una botella de 1 L y dos botellas de 60 ml. (figura 37) en bolsas de plástico para cada puntos de muestreo.



Figura 37. Botellas para muestreo de toma de agua.

Una vez en campo, el procedimiento para toma de muestra de agua varió un poco en dependencia del lugar y las condiciones del cuerpo de agua. En los casos donde los pozos tenían equipo de bombeo, la muestra se tomó directamente de la llave en brocal, dejando correr el agua aproximadamente tres minutos antes de realizar la toma.

Para el caso de noria, bordo y manantial fue necesario tomar la muestra de agua con ayuda de una cubeta y/o jarra (figura 38), la cual previamente fue enjuagada tres veces con el agua a captar y de igual manera se llenaron las botellas de agua correspondientes. En este paso fue importante evitar que la cubeta tocara las paredes de las norias, así como usar guantes de látex para evitar cualquier tipo de contaminación.



Figura 38. Toma de muestra de agua.

Las botellas de 1L fueron usadas para medir aniones y cationes en laboratorio. En el caso de las dos botellas de 60 ml., a una se le adhirió de tres a cinco gotas de  $H_2SO_4$  con el objetivo de preservar la muestra y medir los nitratos en el laboratorio (figura 39); para la segunda botella de 60 ml. destinada para la medición de elementos mayores, menores y traza, el agua se filtró con una membrana de acetato de celulosa con aberturas de diámetro nominal de 0-45  $\mu$ micras con ayuda de una jeringa de plástico (figura 40) y se le adhirió de tres a cinco gotas de  $HNO_3$  para su preservación. Inmediatamente después de tomar las muestras, las botellas y el equipo se lavó con agua destilada.



Figura 39. Adición de ácido sulfúrico para la conservación de las muestras.



Figura 40. Jeringa de plástico y membrana de acetato de celulosa para filtrar.

## 7.2.5 Identificación y control de las muestras

El adecuado manejo de las muestras es fundamental para la preservación de las mismas, ya que en campo pueden ser vulnerables debido al cambio de temperaturas; para esto, las muestras fueron almacenadas dentro de una hielera con bolsas de hielo para su transporte al laboratorio. Para el caso específico de éste trabajo, todas las muestras fueron llevadas a laboratorio el mismo día.

Para el correcto control de cada muestra de agua tomada en campo, los envases fueron identificados con plumón permanente en la cinta masking con la siguiente información:

- Número de registro para identificar la muestra
- Fecha de muestreo
- Localidad
- El ácido en que fueron preservadas las muestras

Todas las muestras fueron registradas en las fichas de campo y se fotografió la estructura del aprovechamiento. En cada fotografía se colocó un pizarrón con la fecha, localidad y clave de punto de muestreo para el registro (figura 41).



Figura 41. Equipo de muestreo con clave de identificación en un punto de muestreo.

### 7.3 Cobertura superficial

La proporción de cobertura superficial del suelo es un factor importante para controlar la pérdida de agua (escorrentía) y suelo (erosión) (Chen *et al.*, 2018) y por consecuencia, también influye en la cantidad de agua que puede ser infiltrada. Es por esto que la conservación de la vegetación es útil para preservar el agua y el suelo y se ha comprobado que una mejora en la cobertura vegetal causa cambios significativos en los procesos hidrológicos y de erosión (Zhang *et al.*, 2019).

El porcentaje de cobertura superficial fue estimado por medio del método de "Step-Point" de Evans y Merton (1957), el cual consistió en un muestreo de parcelas realizado en el área de recarga potencial de agua subterránea, ubicado al oeste-suroeste de la cabecera municipal de Moctezuma. El área a muestrear fue de aproximadamente 2800 ha; primeramente, se proyectaron 280 parcelas para cubrir el 1 % del área. Sin embargo, para obtener el tamaño de muestra ideal, se realizó un muestreo piloto de 83 parcelas y se utilizó la siguiente fórmula estadística:

$$n = \frac{N \cdot Z_{\alpha/2} \cdot S^2}{N \cdot d^2 + Z_{\alpha/2}^2 \cdot S^2}$$

Donde:

n= marco de muestreo

N= 2800 ha (tamaño de la población/marco de muestreo)

d= precisión

Z= 1.96 (confiabilidad para muestra grande)

S<sup>2</sup>= varianza

Lo que dio un tamaño de muestra de 150 parcelas, mismas que fueron distribuidas de manera aleatoria en un mapa con la ayuda del SIG QGis 3.4.4 (figura 42). Los puntos (parcelas aleatorias) fueron introducidos como un archivo "shape" en un GPS de precisión para su localización en campo.

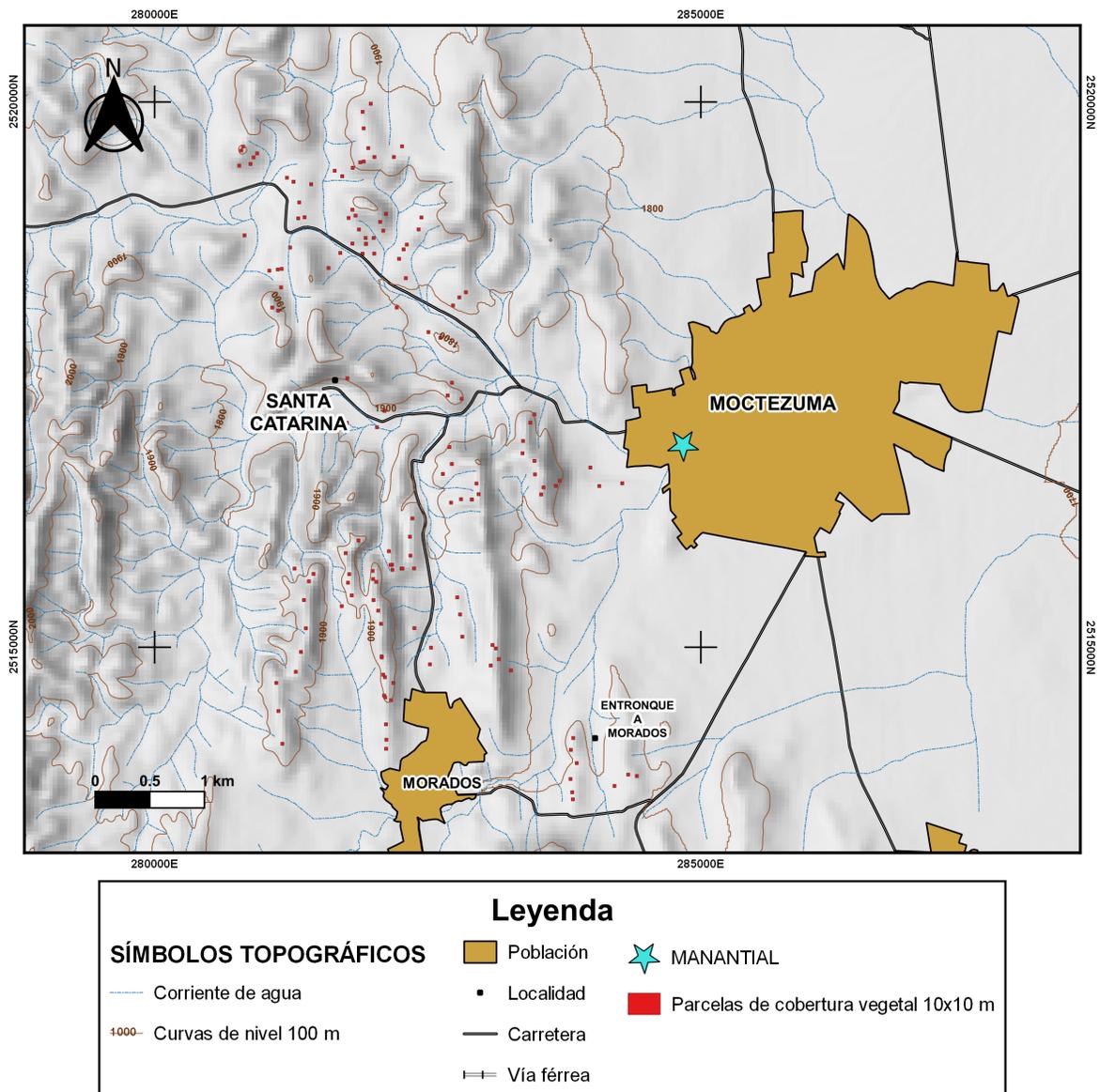


Figura 42. Puntos aleatorios de muestreo de cobertura vegetal en el área de recarga.

En campo, una vez identificado el punto aleatorio se realizó la parcela de 10x10 m delimitada con una cinta métrica de 50 m; en cada una de ellas se tomó la coordenada y se distribuyeron de 98 a 100 pasos en ocho líneas transversales (figura 43); a cada paso se registró el tipo de cobertura encontrada en el punto que marcaba la punta de la bota del observador (figura 44) la información se registró en formatos especiales (figura 45).



Figura 43. Parcela para medir cobertura vegetal de 10x 10 m.



Figura 44. Identificación de cobertura superficial por el método de step point.

**MÉTODO DE MUESTREO PASO A PASO**  
Descripción del sitio/cobertura vegetal

P132-SS

Fecha: 10-4-2019	Sitio No: 132-AS	Geología: La Peña	Localidad: Motezuma
Nombre: ale	Coordenadas: X: 22°46'03.2850'N Y: 101°7'56.0673'W		Posición topográfica: Ladera Valle
Pendiente (%): 0%	Exposición:	No foto:	
Cercanía a: Camino del otro	Zona de: Recarga/descarga/relleno	Hora inicio: 10:40	Hora termino:

lado del camino se ve el potrero

Paso No	Línea 1	Línea 2	Línea 3	Línea 4	Línea 5	Línea 6	Línea 7	Línea 8
1	RC	OB <sub>r</sub>	R	AB <sub>r</sub>	D	RC	R	GP
2	RC	RC	AB	AB <sub>r</sub>	AB	RC	Y	AB <sub>c</sub>
3	AR	B	SD	OB <sub>r</sub>	D	RC	SD	RC
4	D	RC	SD	SD	R	OB <sub>r</sub>	SD	AB <sub>c</sub>
5	AR	OB	R	AB <sub>r</sub>	EC	SD	SD	OB
6	AB <sub>c</sub>	RC	AB <sub>c</sub>	OB <sub>r</sub>	RC	SD	RC	RC
7	AR	SD	D	RC	R	AB <sub>c</sub>	OB <sub>r</sub>	R
8	AR	RC	RC	SD	GP	SD	RC	SD
9	R	OB	AB	AB <sub>r</sub>	OR	OR	RC	AB
10	AB <sub>c</sub>	RC	R	D	RC	RC	SD	AB
11	D	R	AB <sub>c</sub>	RC	RC	SD	D	SD
12	AB	GP	B	D	R	AD	RC	AR

AA= Arbusto alto  
AB= Arbusto bajo  
AB<sub>c</sub>= Arbusto bajo espinoso  
ACa= Arbusto crassicaule alto (nopalera)  
AR=Arbusto roset

B= Biznaga  
Br= Biznaga razante  
Can= Candelilla  
D= Detritus  
EX<sub>c</sub>= Excremento de cabra  
EX<sub>e</sub>= Excremento de equino

GA= Gramínea anual  
GP= Gramínea perenne  
HB<sub>v</sub>= Herbácea bienal verde  
Mu= Musgo  
OB= Opuntia baja  
OB<sub>r</sub>= Opuntia baja rastrera

P= Plástico  
PP= Pasto perenne  
R= Roca  
RC= Roca cerro (alforamiento)  
SD= Suelo desnudo  
T= Terrón  
Y= Yucca

Figura 45. Formato de registro de cobertura superficial para campo.

La proporción de la cobertura se determinó considerando el total de pasos en cada parcela. Las categorías de cobertura consideradas fueron:

Tabla 2. Abreviaturas de elementos considerados en campo.

Abreviatura	Significado	Especies
AA	Arbusto alto	Acacia sp, Berberis trifoliolata y Larrea tridentata
AB	Arbusto bajo	Calliandra eryophylla, Brickellia veronicifolia y Chrysactinia mexicana
AB <sub>c</sub>	Arbusto bajo espinoso	Mimosa acauleticarpa y Mimosa zygophylla
ACa	Arbusto crassicaule alto	Opuntia leucotricha y Cylindropuntia imbricata
AR	Arbusto rosetófilo	Agave lechuguilla, Agave striata, Hechtia glomerata y Agave salmiana ssp. crassispina
B	Biznaga	Echinochatus platyacanthus, Ferocactus latispinus y Ferocactus pilosus
Br	Biznaga rasante	Mamillaria spp. y Echinocereus pectinatus
CAN	Candelilla	Euphorbia antispyhilitica
D	Detritus: hojarasca, ramas secas, plantas muertas	
EX	Excremento de equino y de cabra	
HA	Herbácea anual	Bouteloua barbata

<b>HP</b>	Herbácea perenne	Cheilanthes spp., Sporobolus spp., Muhlenbergia spp. y Stipa spp.
<b>Mu</b>	Musgo	
<b>OB</b>	Opuntia baja	Opuntia stenopetala y Cylindropuntia tunicata
<b>OBr</b>	Opuntia baja rastrera	Opuntia rastrera y Opuntia microdasys
<b>PP</b>	Pasto perenne	Bouteloua curtipendula y Chloris virgata
<b>R</b>	Rocas sueltas	
<b>RC</b>	Afloramiento de roca caliza	
<b>SD</b>	Suelo desnudo	
<b>Y</b>	Yucca	Yuca filifera y Yuca carnerosana

## 7.4 Aplicación de entrevistas semi-estructuradas

Para considerar el tema del impacto social que ha causado la problemática ambiental del manantial “Ojo de Agua”, Moctezuma, se realizaron entrevistas cualitativo exploratorias, con ellas se pretendió conocer el nivel de interés de la población con respecto al problema de disminución del agua de manantial.

La muestra fue intencional o por conveniencia por informantes clave. Los sujetos seleccionados fueron las autoridades municipales y población en general con diferentes actividades económicas, los cuales en su mayoría fueron comerciantes de la zona centro, debido a que se considera que son los primeros en resentir las consecuencias de la falta de agua debido a las reglas que se imponen a los comercios y la imagen que muestran a los turistas.

Las entrevistas se llevaron a cabo durante los meses de enero y febrero de 2019. Los temas centrales de las entrevistas fueron: 1) ¿Qué tanto les ha afectado en su vida cotidiana y/o calidad de vida la disminución del caudal?, 2) ¿Creen que pueden hacer algo para mitigar el problema?, 3) ¿Les interesaría hacer algo para mitigar el problema?, 4) ¿Sabes si las autoridades han realizado alguna acción para combatir el problema?, 5) ¿Quiénes piensan que serían los primeros en participar en alguna acción para combatir el problema? y 6) ¿Cuáles creen que podrían ser los obstáculos en caso de un posible proyecto?

Las herramientas que se utilizaron fueron una grabadora, la libreta de campo y una guía de preguntas a abordar. Con el fin de no faltar a las normas éticas de respeto a la privacidad en cada entrevista se solicitó a los entrevistados que leyeran y firmaran un consentimiento informado.

El acercamiento a las personas en su mayoría, fue a través de visitas a locales para no detener a gente en la calle o directamente con comerciantes en sus locales o puestos.

En el caso de las autoridades, se aprovechó la reunión de presentación de avances de resultados para entrevistar a los asistentes. Cada entrevista duró aproximadamente entre 30 y 40 minutos.

## 7.5 Actividades de laboratorio

### 7.5.1 Análisis químicos y fisicoquímicos

Los solutos en el agua subterránea se derivan su interacción con varios sólidos y gases por donde el agua se va moviendo desde el área de recarga hasta el área de descarga. Las concentraciones de solutos pueden variar considerablemente en función del componente geológico que constituye el acuífero; sin embargo, hay algunos solutos inorgánicos que se encuentran en el agua subterránea de manera natural (Kehew, 2000), los cuales han sido clasificados de acuerdo con las concentraciones en las que pueden encontrarse. Los elementos mayores son:  $\text{HCO}_3^-$ , Cl,  $\text{SO}_4^{2-}$ , Mg, Ca y Na. Los elementos menores que se encuentran incluyen:  $\text{CO}_3^{2-}$ , F, B, Fe,  $\text{NO}_3^-$ , K y Sr. Y finalmente, los elementos trazas que se pueden encontrar son: Ag, Al, As, Ba, Be, Bi, Br, Cd, Ce, Cs, Cr, Co, Cu, Ga, Li, Mn, Mo, Ni, P, Pt, Sb, Se, U, V, Zn, etc (Freeze y Cherry, 1979).

La determinación de los cationes mayores Ca, Mg, Na y K y del azufre total, se realizó por medio del espectrómetro de emisión óptica ICP-OES, iCAP 7000 SERIES ICP Spectrometer (figura 46) en el Laboratorio de Geoquímica del Instituto de Geología de la Facultad de Ingeniería de la UASLP.

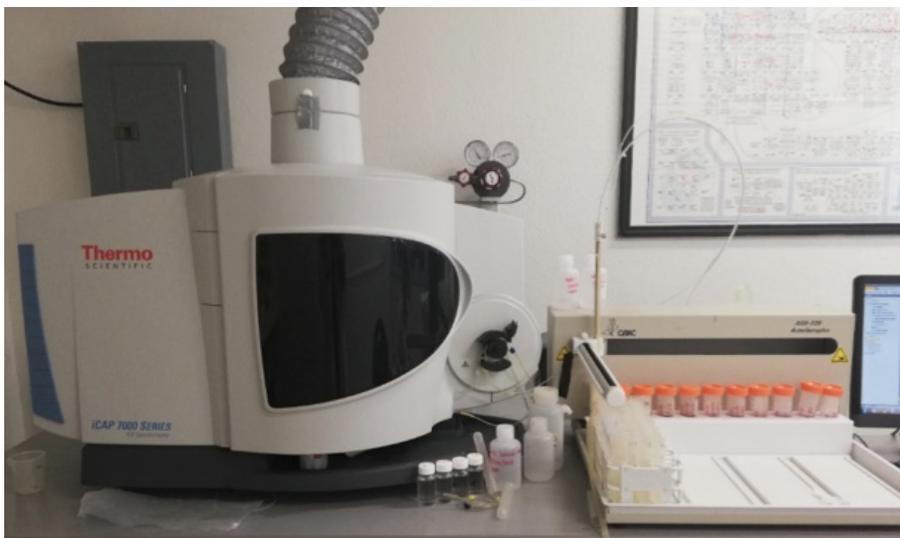


Figura 46. Espectrómetro de emisión óptica ICP-OES, iCAP 7000 SERIES ICP Spectrometer.

Los elementos trazas como Al, As, Ag, Ba, Cd, Cu, Cr, Fe, Mn, Hg, Pb, Li, B, Sr, Si, U, Ni, V, Co, Zn, Se, Mo, Ag, Sn, Sb y Tl fueron medidos por medio del espectrómetro de masas ICP-MS, X Series II (figura 47) en el Laboratorio de Geoquímica del Instituto de Geología de la UASLP.



Figura 47. Espectrómetro de masas ICP-MS, X Series II.

Los cloruros se determinaron por el método de valoración con nitrato de plata, los sulfatos por el método turbidimétrico con cloruro de bario, los fluoruros con espectrofotométrico empleando solución SPANDS y los nitratos (como N) por el método de reducción con cadmio cuperizado. Para la medición de éstos parámetros se utilizó un instrumento espectrofotométrico DR 2000 de HACH (figura 48) en el Laboratorio de Análisis de Suelo y Agua de la Facultad de Ingeniería de la UASLP.



Figura 48. Instrumento espectrofotométrico DR 2000 de HACH.

El pH fue tomado por medio del método potenciométrico, con ayuda de un potenciómetro HORIBA (figura 49) en el Laboratorio de Análisis de Suelo y Agua de la Facultad de Ingeniería de la UASLP.



Figura 49. Potenciómetro HORIBA.

La conductividad eléctrica y los sólidos disueltos totales fueron medidos utilizando un conductímetro Thermo scientific modelo ORION 3 Star (figura 50) el cual fue calibrado con un estándar de CE 1413  $\mu\text{s}/\text{cm}$  en el Laboratorio de Análisis de Suelo y Agua de la Facultad de Ingeniería de la UASLP.



Figura 50. Conductímetro Thermo scientific modelo ORION 3 Star.

La alcalinidad se determinó por medio del método de titulación utilizando fenolftaleína y anaranjado de metileno. La dureza total (como CaCO<sub>3</sub>) se obtuvo por titulación empleando un indicador visual de punto final, el negro de eriocromo T, ambos fueron medidos en el Laboratorio de Análisis de Suelo y Agua de la Facultad de Ingeniería de la UASLP.

Los sólidos disueltos totales se obtuvieron por el método gravimétrico, obteniendo la diferencia entre los sólidos totales (ST) y los sólidos suspendidos totales (SST) en el Laboratorio de Análisis de Suelo y Agua de la Facultad de Ingeniería de la UASLP. El método consistió en poner a peso constante las cápsulas de porcelana (para los ST) y los crisoles (para los SST), metiéndolos en el horno, posteriormente ponerlos a enfriar en el desecador y finalmente pesar en la balanza analítica; esto se repitió tres veces para cada muestra.

Todos los análisis fueron realizados bajo las técnicas definidas por las respectivas NOM para cada elemento (tabla 3).

Tabla 3. Norma oficial correspondiente al análisis de cada parámetro medido de las muestras de agua.

<b>Parámetro</b>	<b>Norma</b>
Calcio, sodio, potasio magnesio, estroncio	NMX-AA-051-SCFI-2016
Azufre total	NMX-AA-084-SCFI-2005
Aluminio, arsénico, bario, cadmio, cobre, cromo total, hierro, manganeso, mercurio, plomo, litio, boro, estroncio, silicio, uranio, níquel, berilio, fósforo, escandio, titanio, vanadio, cobalto, zinc, selenio, rubidio, molibdeno, rodio, plata, estaño,	PROY-NMX-AA-131/1/2-SCFI-2008
antimonio, osmio, volframio, talio, boro, bismuto, dubnio, tántalo, renio e iridio.	
Cloruros (como Cl <sup>-</sup> )	NMX-AA-073-SCFI-2001
Nitratos (como N)	NMX-AA-079-SCFI-2001
	PROY-NMX-AA-155-SCFI-2010
Sulfatos	NMX-AA-074-SCFI-2014
Fluoruros	NMX-AA-077-SCFI-2001
Alcalinidad total	NMX-AA-036-SCFI-2001
Dureza total (como CaCO <sub>3</sub> )	NMX-AA-072-SCFI-2001
Sólidos disueltos totales	NMX-AA-034-SCFI-2015

## 7.6 Etapa de gabinete

### 7.6.1 Identificación de la dirección de flujo de agua subterránea

Con los datos levantados en campo, se obtuvo la dirección de flujo del agua subterránea a partir de las cargas hidráulicas con la siguiente fórmula:

$$Z+B-NE=carga\ hidráulica\ (msnm)$$

En donde:

Z= Elevación del terreno

B= Altura del brocal del aprovechamiento (en caso de existir)

NE= Nivel estático

Únicamente se obtuvieron las cargas hidráulicas de 20 aprovechamientos, ya que no en todos los puntos fue posible obtener el nivel estático. El mapa piezométrico se realizó en el programa *Surfer*® 15 y posteriormente se editó en el *Qgis*® 3.4.

### 7.6.2 Análisis del agua

El procesamiento y análisis de los datos fueron obtenidos por medio de distintos programas y softwares.

El análisis de datos por medio de mapas es una herramienta eficaz para una mejor comprensión espacial e interpretación de los mismos. Para la representación espacial de la información se recurrió al SIG *Qgis* 3.4.4, en donde se hizo la generación y edición de mapas.

Una vez obtenidos los resultados de laboratorio, se obtuvo el porcentaje de error por medio de un balance de electroneutralidad para cada una de las muestras con el fin de comprobar la confiabilidad de los resultados, para ello se utilizó la siguiente fórmula:

$$\% \text{ de error} = \left( \frac{\sum \text{cationes} - \sum \text{aniones}}{\sum \text{cationes} + \sum \text{aniones}} \right) * 100 \text{ (cationes y aniones en } \frac{meq}{L} \text{)}$$

Una vez que se determinó que el porcentaje de error estaba dentro del rango ( $<0.05$ ), se agregaron los datos en el programa AquaChem® para identificar las familias de agua por medio de diagramas de Piper (1994) y los diagramas de Stiff (1951). Los diagramas son una importante herramienta cuando se quiere mostrar datos de la composición química de las aguas subterráneas de una manera visual y simplificada.

Los diagramas de Piper (1994) son del tipo triangular y representan la proporción de tres componentes en la composición de un conjunto o de una sustancia, éste caso se contemplan los aniones  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{Cl}^-$  y los cationes  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ + $\text{K}^+$  y  $\text{Mg}^{2+}$ . Cada vértice representa el 100 % de cada uno de los iones mayores, mientras que los puntos del lado opuesto de ese vértice representan el 0 %. El diagrama de Piper está formado por dos triángulos con un rombo que recoge la información de ambos triángulos; el triángulo de la izquierda corresponde a los cationes y el de la derecha a los aniones (Bragado-Alcaraz, 2016).

Los diagramas de Stiff (1951) son polígonos (uno para cada análisis) que normalmente se sitúan sobre un mapa para mostrar la distribución geográfica de la composición de las aguas. En su forma más sencilla se forman con tres ejes paralelos, hacia la izquierda se encuentran los cationes y hacia la derecha los aniones. Se sitúan las concentraciones en cada uno de los seis ejes (en meq/L) y después se unen formando el polígono (Bragado-Alcaraz, 2016). Básicamente, este tipo de diagramas ayudan a identificar de una manera visual las aguas con características químicas similares utilizando los iones dominantes.

### 7.6.3 Cobertura superficial del suelo

La cobertura superficial del suelo fue representada cartográficamente mediante la comparación de los datos obtenidos en campo y el análisis de una imagen de satélite Sentinel 2A. La imagen multiespectral Sentinel 2A con resolución espacial de 10 m fue descargada del portal <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>, un servidor de la Agencia Espacial Europea con fecha de captura del 19 de febrero de 2019, eligiéndose esa fecha debido a que en febrero fue el mes en que se hizo el mayor número de parcelas. A la imagen se le aplicó una corrección atmosférica con ayuda del programa QGIS 3.4 y posteriormente se obtuvo el Índice de Diferencia Normalizada de Vegetación (NDVI, por sus siglas en inglés). Este índice multiespectral arroja valores estimados del verdor de la vegetación con base en la absorción de clorofila en la banda roja y la reflectancia relativamente alta de la vegetación en la banda infrarroja cercana (NIR) (Meneses-Tovar, 2011; Gandhi *et al.*, 2015). Las bandas que se utilizaron para la obtención del NDVI fueron

las bandas 4 y 8 y el índice se obtuvo por medio de la siguiente fórmula:

$$NDVI = \frac{\text{Banda 8} - \text{Banda 4}}{\text{Banda 8} + \text{Banda 4}}$$

El NDVI representa un indicador de la salud de la vegetación ya que la degradación de ésta puede quedar reflejada en los valores que van de -1 a 1, teniendo valores muy similares a la fracción de radiación absorbida sobre la incidente fotosintéticamente activa (FAPAR) (Hunt *et al.*, 2003). Los valores más altos indican de un mayor verdor (máxima actividad fotosintética) y los más bajos corresponden a sitios de suelo desnudo o roca (ausencia total de vegetación) (Meneses-Tovar, 2011; Gandhi *et al.*, 2015). El NDVI fue calibrado con datos de cobertura superficial del suelo obtenidos en campo.

Una vez obtenidos los datos de campo, se obtuvo los porcentajes de cobertura superficial de cada parcela con ayuda del programa EXCEL, descartando el suelo desnudo, rocas y afloramiento rocoso; a la par, se obtuvo el NDVI de cada parcela y se graficaron en el programa SIGMAPLOT 12.5 siendo la X el NDVI y la Y la cobertura vegetal. Se ajustó un modelo de regresión sigmoideal para analizar la relación entre NDVI y la cobertura vegetal.

#### 7.6.4 Análisis de series de tiempo

Para conocer si han existido cambios históricos espacio-temporales en el patrón de lluvias y temperatura en el área de estudio se realizó un análisis de series de tiempo utilizando la prueba no-paramétrica de Mann Kendall para determinar tendencias (Mann, 1945; Kendall, 1975). Ésta prueba ha sido utilizada ampliamente en múltiples casos de las ciencias naturales por su poder de extracción de tendencias confiables sin necesidad de un alto número de muestras, y tolerancia al ruido en la serie (Miró *et al.*, 2010). Este procedimiento tiene el propósito de determinar si el valor central o la mediana de un conjunto de datos cambian con el tiempo y es particularmente útil cuando existen datos faltantes (Gilbert, 1987; Helsel y Hirsch, 2002). Se analizaron las tendencias de la precipitación y temperatura total mensual y total anual (1970-2016) en cinco estaciones meteorológicas (figura 51): Moctezuma (24044), El grito (24021), Guanamé (24150), El Mezquite (24098), Coronado (24188) y San Francisco de la Dicha (24192).

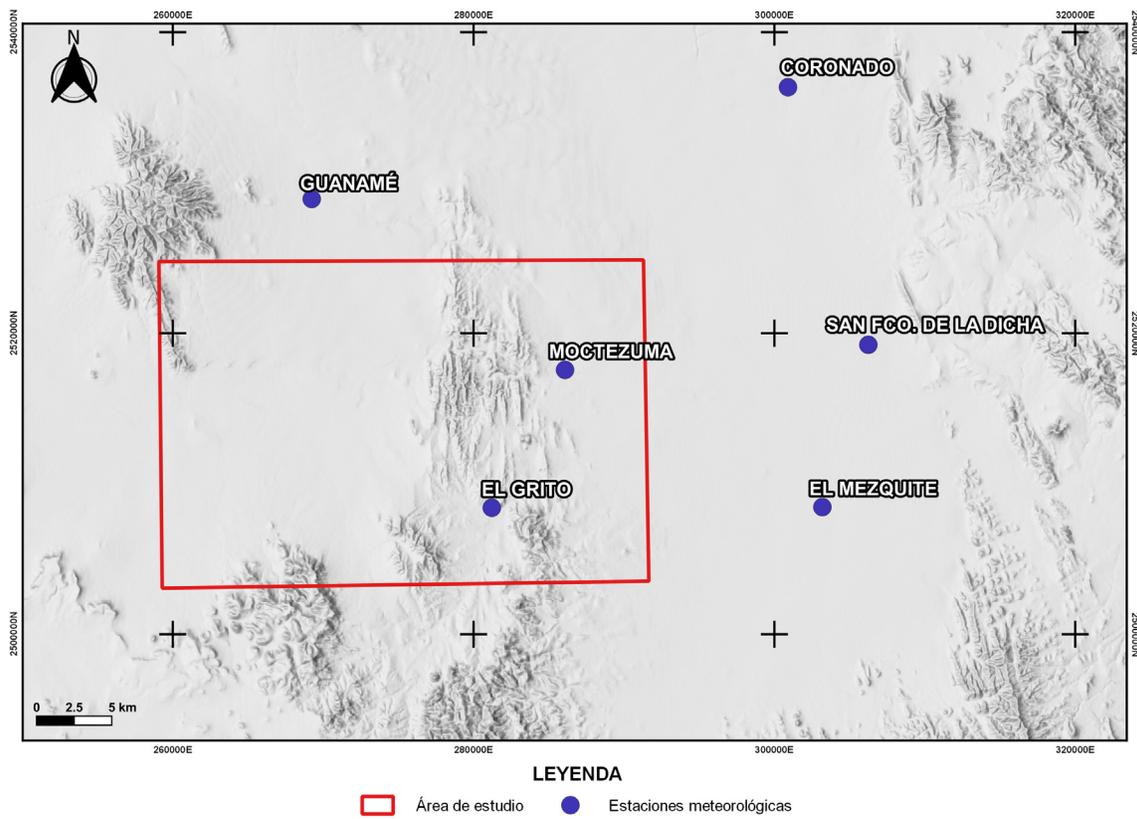


Figura 51. Mapa de estaciones meteorológicas que rodean el área de estudio. Elaboración propia, información obtenida de <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatología/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>.

### 7.6.5 Análisis cualitativo

Una vez obtenidas las entrevistas, éstas fueron capturadas, transcritas y ordenadas de manera digital en el orden en el que fueron recabadas. Posteriormente se realizó una agrupación por categorías para concentrar las ideas y temas similares descubiertos teniendo como base las preguntas de investigación.

Para contextualizar el análisis desde una perspectiva social, se optó por utilizar teoría fundamentada, una metodología cualitativa, basada en entrevistas, ya que ésta permite rescatar las versiones de las personas directamente involucradas en el fenómeno que se estudia. En este caso, permitió conocer la visión de los habitantes de la localidad de Moctezuma SLP acerca de la problemática ambiental del manantial, validando sus discursos, pues desde éstos se puede comprender una realidad que es precisamente construida por ellos mismos, lo que genera una mayor comprensión acerca de lo estudiado (Taylor y Bogdan, 1984).

## 8. Resultados

---

A continuación, se presentan los datos obtenidos en campo, laboratorio y gabinete.

### 8.1 Identificación de la dirección de flujo de agua subterránea

Se dividió al área de estudio en dos partes, la porción oriente que corresponde al graben de Villa de Arista y la porción poniente al graben de Santa Teresa, siendo el anticlinorio de Santa Catarina, la línea divisoria entre ambas (figura 52). Estas estructuras tectónicas son rellenadas por el Conglomerado polimíctico-arenisca del Terciario principalmente. Con base en la información geológica y lo observado en campo, se infiere que en el área, el conglomerado presenta un espesor de aproximadamente <100 m, incrementando de norte a sur (CONAGUA, 2018) en la porción oriente y <50 m en la porción poniente. Considerando los niveles de agua con respecto a la geología del lugar, se determinó que el agua subterránea se encuentra alojada en dos tipos de material: material granular y roca.

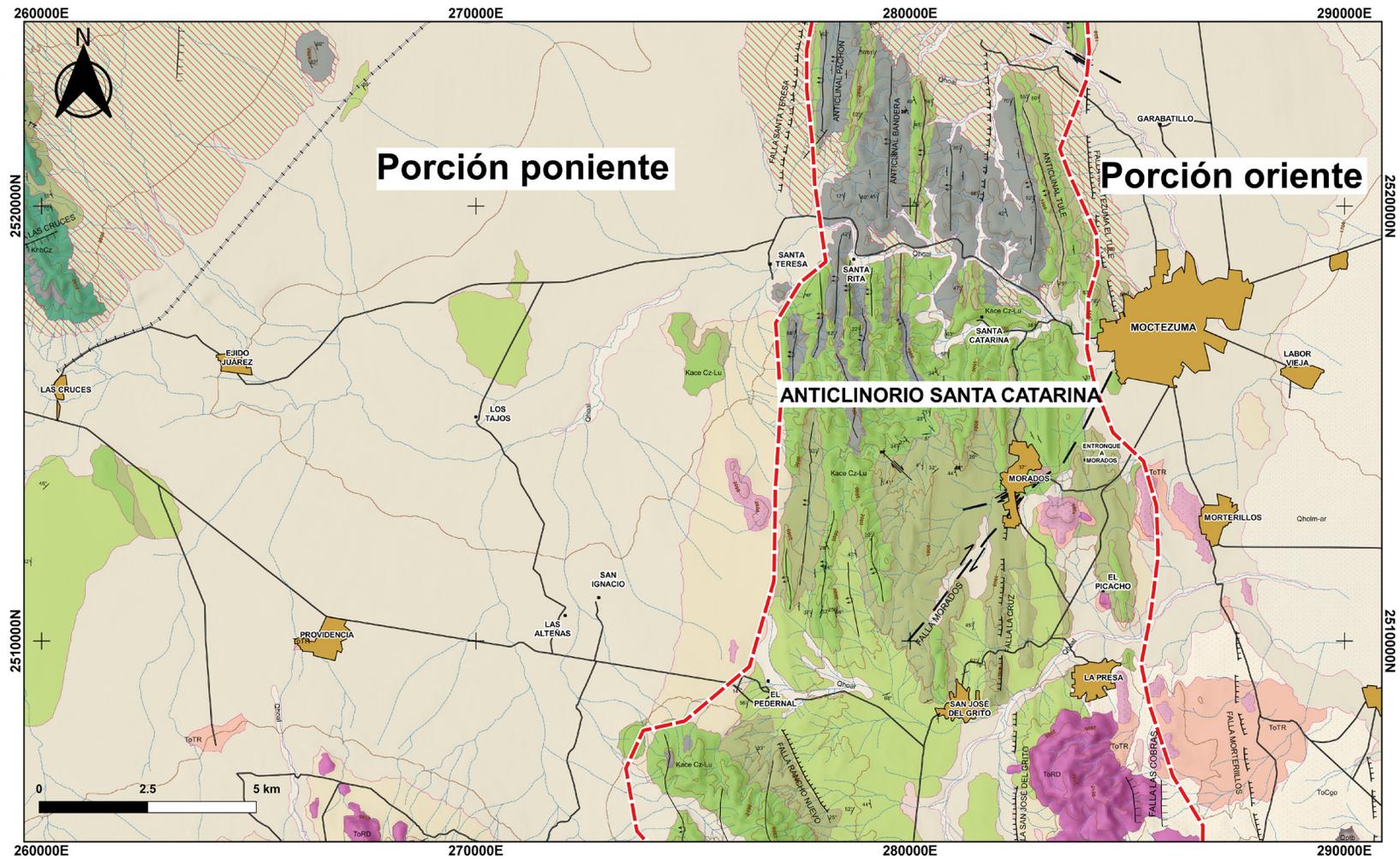


Figura 52. División del área de estudio. La porción oriente se encuentra sobre el graben de Villa de Arista y la porción poniente sobre el graben de Santa Teresa.

Leyenda			
<b>SÍMBOLOS TOPOGRÁFICOS</b>	Falla normal	<b>TERCIARIO-NEÓGENO</b>	<b>CRETÁCICO SUPERIOR</b>
Corriente de agua	Falla normal inferida	Conglomerado polimíctico-arenisca (TplQpt Cgp-Ar)	Fm. Caracol (Kse Ar-Lu)
Curvas de nivel 100 m	Falla lateral inferida	Andesita-basalto (TmA-B)	Fm. Indidura (KtCz-Lu)
Población	Anticlinal	<b>TERCIARIO-PALEÓGENO</b>	<b>CRETACICO INFERIOR</b>
Localidad	Rumbos y echados	Ignimbrita (Tolg)	Fm. Cuesta del Cura (Kace Cz-Lu)
Carretera	<b>CUATERNARIO</b>	Toba riolítica (ToTR)	Fm. La Peña (Kapa Cz-Lu)
Vía férrea	Aluvión (Qhoal)	Conglomerado oligomíctico (ToCgo)	Fm. Cupido (Khb Cz)
Porciones	Limo-arena (Qholm-ar)	Riodacita (ToRD)	
<b>SÍMBOLOS GEOLÓGICOS</b>	Basalto (Qptb)	Conglomerado polimíctico (Teo-Cgp)	
<b>ESTRUCTURAL</b>		Conglomerado polimíctico-arenisca (Teo Cgp-ar)	
Falla lateral			

El mapa de flujo subterráneo representa únicamente la porción poniente, en donde la mayoría de los niveles de agua subterránea se encuentran sobre el material granular; esta dirección de flujo va de suroeste a noreste (figura 53). En la porción oriente, los niveles de agua identificados se mueven en la roca; aunque para esta porción no se obtuvieron cargas hidráulicas, se infiere que, debido a la pendiente natural del terreno, la dirección de flujo subterráneo es predominantemente de oeste a este. Estas direcciones están relacionadas con la geología estructural del lugar, debido al basculamiento hacia el oriente de los grabens, que provocan una dirección general hacia el municipio de Villa de Arista.

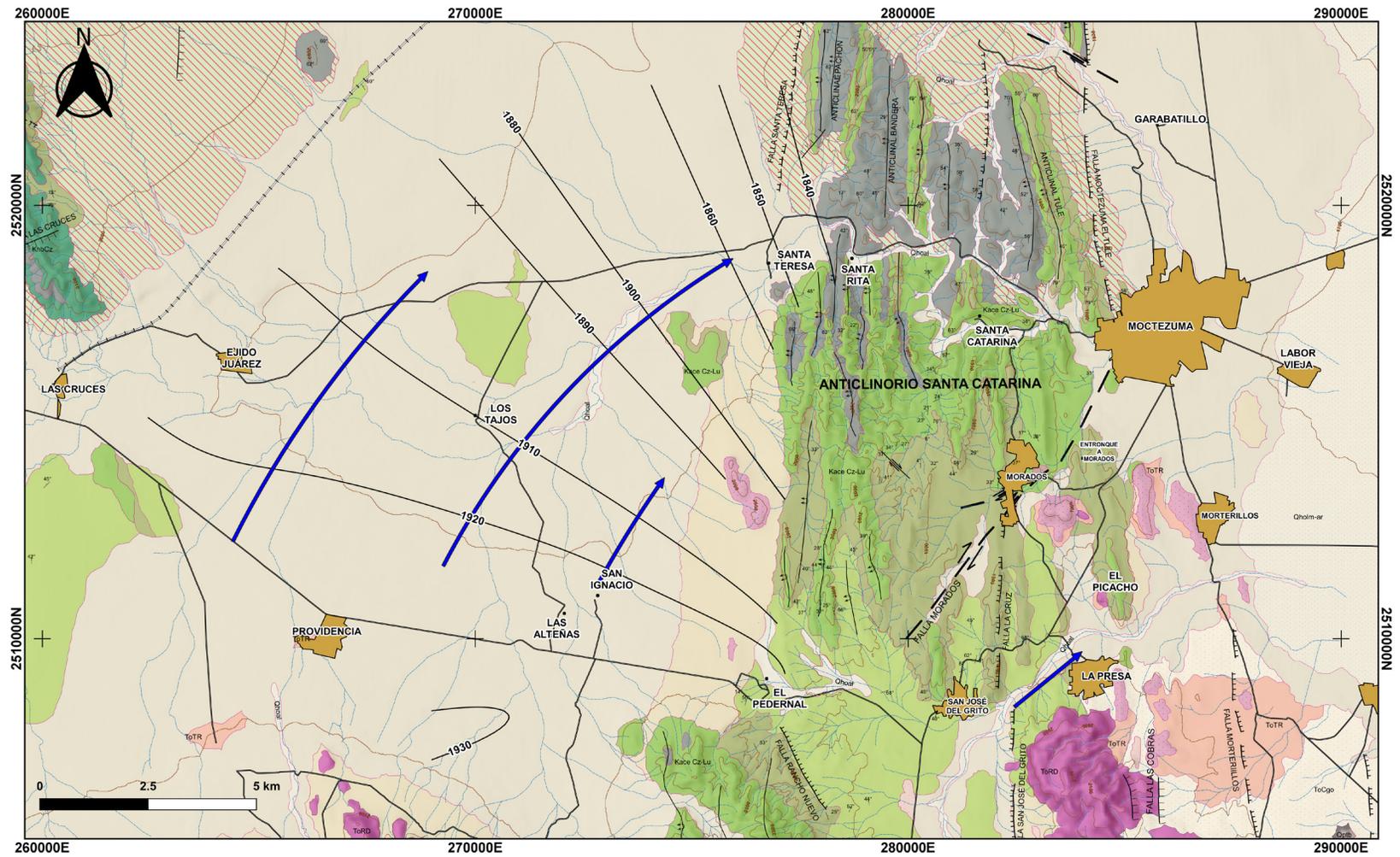


Figura 53. Mapa de dirección de flujo. Elaboración propia.

<b>Leyenda</b>			
<b>SÍMBOLOS TOPOGRÁFICOS</b>	<b>SÍMBOLOS GEOLÓGICOS</b>		
— Corriente de agua	<b>ESTRUCTURAL</b>	□ Limo-arena (Qholm-ar)	▨ Conglomerado polimíctico (Teo-Cgp)
1000- Curvas de nivel 100 m	⇌ Falla lateral	■ Basalto (Qptb)	▨ Conglomerado polimíctico-arenisca (Teo Cgp-ar)
■ Población	⊥ Falla normal	<b>TERCIARIO-NEÓGENO</b>	<b>CRETÁCICO SUPERIOR</b>
• Localidad	⊥ Falla normal inferida	▨ Conglomerado polimíctico-arenisca (TplQpt Cgp-Ar)	■ Fm. Caracol (Kse Ar-Lu)
— Carretera	⇌ Falla lateral inferida	■ Andesita-basalto (TmA-B)	■ Fm. Indidura (KtCz-Lu)
⊥ Vía férrea	— Anticinal	<b>TERCIARIO-PALEÓGENO</b>	<b>CRETACICO INFERIOR</b>
<b>SÍMBOLOS HIDRÁULICOS</b>	↔ Rumbos y echados	■ Ignimbrita (Tolg)	■ Fm. Cuesta del Cura (Kace Cz-Lu)
→ Líneas de flujo	<b>CUATERNARIO</b>	■ Toba riolítica (ToTR)	■ Fm. La Peña (Kapa Cz-Lu)
1910- Cargas hidráulicas	□ Aluvión (Qhoal)	▨ Conglomerado oligomíctico (ToCgo)	■ Fm. Cupido (Khb Cz)
		■ Riodacita (ToRD)	

## 8.2 Caracterización hidrogeoquímica

Se obtuvo un total de 39 muestras de agua subterránea y superficial (tabla 4) en 25 aprovechamientos, durante tres campañas de muestreo (septiembre 2018, noviembre 2018 y febrero-marzo 2019), de las cuales 14 fueron de pozos, 14 de norias, ocho de manantiales y tres de bordos (figura 54). En algunos aprovechamientos se tomaron más de 2 muestras en diferentes campañas (repeticiones). En el anexo 1 se muestran las características generales de cada uno de los aprovechamientos estudiados.

Tabla 4. Total, de aprovechamientos por campaña de muestreo.

Periodo de muestreo	Bordo	Manantial	Noria	Pozo	Total
Septiembre 2018	1	3	8	4	16
Noviembre 2018	1	2	2	4	9
Febrero-marzo 2019	1	3	5	5	14
Total	3	8	15	13	39

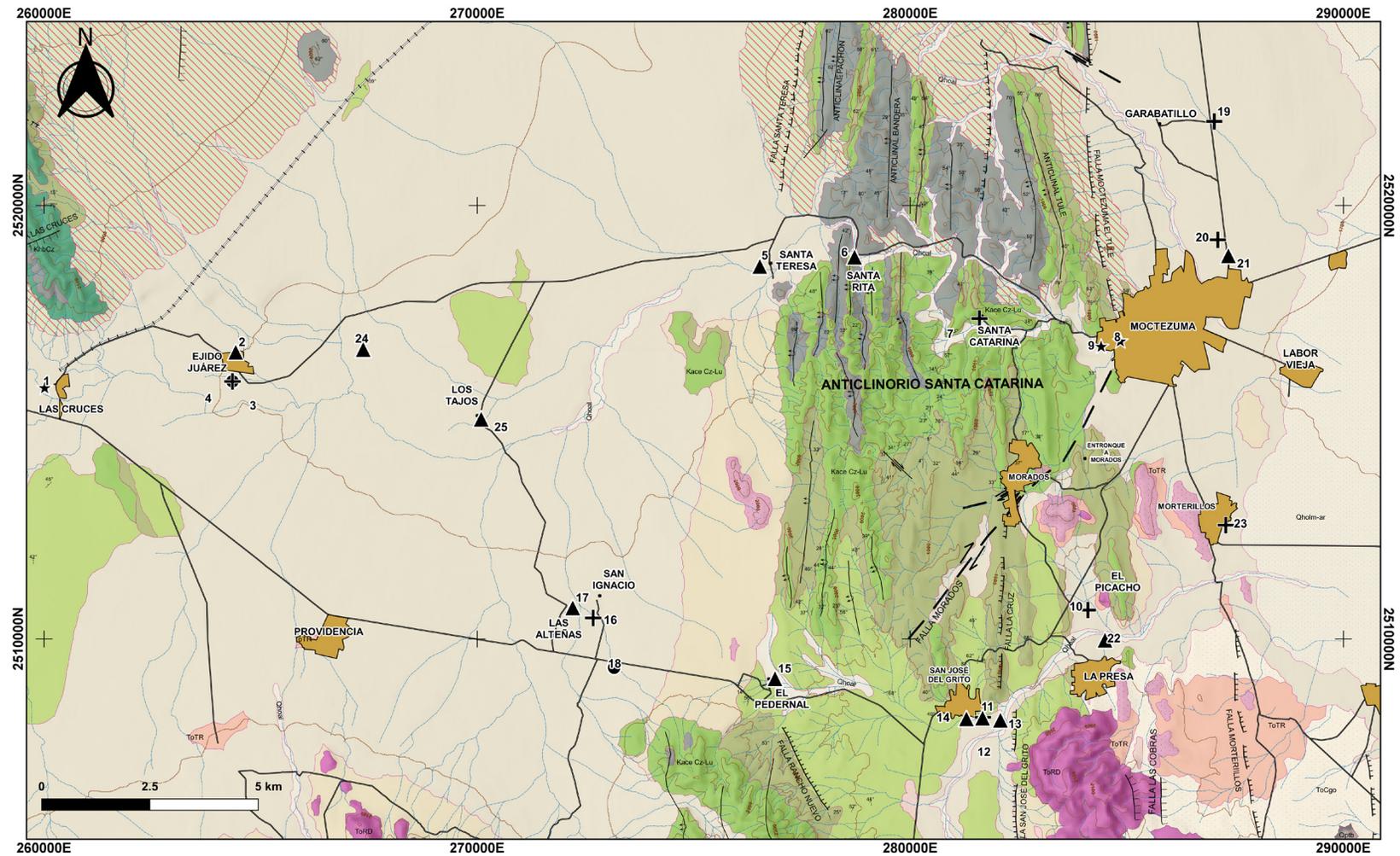


Figura 54. Aprovechamientos de agua superficial y subterránea muestreados de septiembre 2018 a marzo 2019. Elaboración propia.

<b>Leyenda</b>			
<b>SÍMBOLOS TOPOGRÁFICOS</b>	▲ Noria	<b>CUATERNARIO</b>	■ Riodacita (ToRD)
— Corriente de agua	+ Pozo	■ Aluvión (Qhoal)	■ Conglomerado polimíctico (Teo-Cgp)
1000— Curvas de nivel 100 m	<b>SÍMBOLOS GEOLÓGICOS</b>	■ Limo-arena (Qholm-ar)	■ Conglomerado polimíctico-arenisca (Teo Cgp-ar)
■ Población	<b>ESTRUCTURAL</b>	■ Basalto (Qptb)	<b>CRETÁCICO SUPERIOR</b>
• Localidad	— Falla lateral	<b>TERCIARIO-NEÓGENO</b>	■ Fm. Caracol (Kse Ar-Lu)
— Carretera	— Falla normal	■ Conglomerado polimíctico-arenisca (TplQpt Cgp-Ar)	■ Fm. Indidura (KtCz-Lu)
— Vía férrea	— Falla normal inferida	■ Andesita-basalto (TmA-B)	<b>CRETÁCICO INFERIOR</b>
<b>TIPOS DE APROVECHAMIENTO</b>	— Falla lateral inferida	<b>TERCIARIO-PALEÓGENO</b>	■ Fm. Cuesta del Cura (Kace Cz-Lu)
● Bordo	— Anticlinal	■ Ignimbrita (Tolg)	■ Fm. La Peña (Kapa Cz-Lu)
★ Manantial	— Rumbos y echados	■ Toba riolítica (ToTR)	■ Fm. Cupido (Khb Cz)
		■ Conglomerado oligomíctico (ToCgo)	

## 8.2.1 Balance iónico

Para poder considerar que los datos químicos obtenidos para cada solución son confiables para su uso e interpretación, éstas deben ser eléctricamente neutras (Freeze y Cherry, 1979); lo que quiere decir que en un volumen de agua dado, la suma de las cargas de todos los cationes debe ser igual a la suma de las cargas de todos los aniones, lo que evaluado con la ecuación señalada en la metodología, el balance de cargas preferentemente debe ser menor a  $\pm 5\%$  (Kehew, 2000). Tomando en cuenta lo anterior, los resultados de la química del agua mostraron errores dentro de ese rango en el balance de electro neutralidad (figura 55) por lo que todos los datos tuvieron la precisión requerida para su uso.

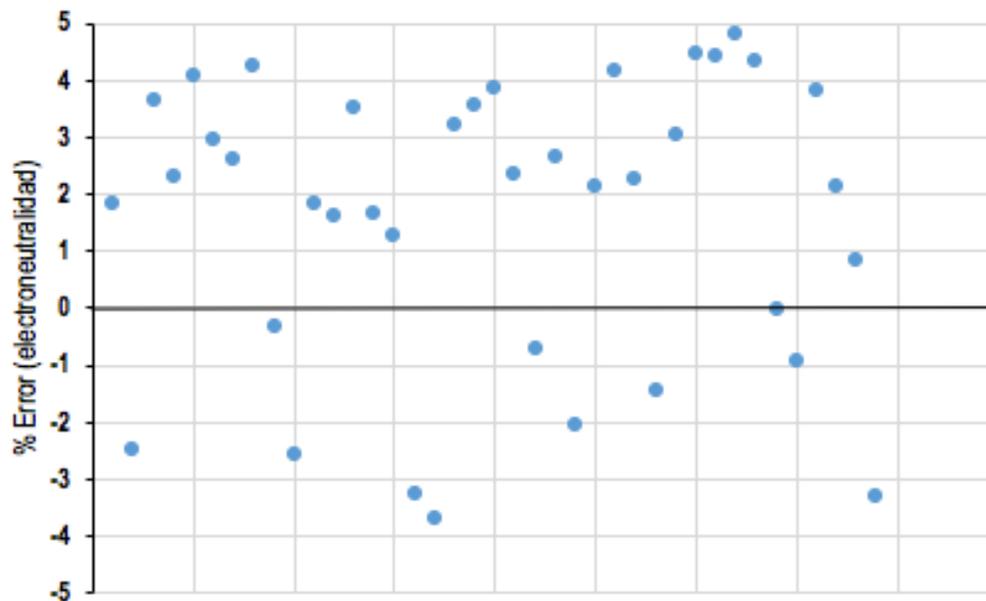


Figura 55. Porcentaje de error para cada uno de las muestras de agua obtenidas considerado para el balance de electroneutralidad.

## 8.2.2 Análisis estadístico

La estadística descriptiva de las muestras de agua presenta características físicas y químicas diversas debido a factores como: a) condiciones geológicas no uniformes, b) profundidades variadas de los aprovechamientos, c) diferentes sistemas de flujo. En las tablas 5 y 6, y en las figuras 56, 57 y 58 se presentan los valores mínimos, máximos y los promedios para los parámetros de campo, elementos mayores y traza de las 39 muestras.

Los elementos mayores que predominan en las muestras de agua son bicarbonato (305.7 mg/L) > sulfato (177.22 mg/L) para los aniones, y sodio (115.7 mg/L) > calcio (92 mg/L) para los cationes. Posiblemente las altas concentraciones de estos iones se deban a la composición geológica de las rocas circundantes con las que el agua interactúa, las cuales se componen de calizas, calizas arcillosas y lutitas principalmente.

Tabla 5. Resultados de las estadísticas descriptivas de los parámetros de campo y elementos mayores.

Número de muestras medidas	Parámetros	Unidad de medida	Min	Max	Promedio
<b>Parámetros de campo</b>					
39	Temperatura	°C	14	29.2	22.04
39	pH		6.88	10.31	7.44
39	Eh	mV	55.2	382.4	302.91
39	CE	µS/cm	92.2	2013	1181.39
39	OD	mg/L	0	9.7	3.39
39	HCO <sub>3</sub>	mg/L	16.5	496.3	305.72
<b>Aniones</b>					
39	SO <sub>4</sub>	mg/L	2.67	774.56	177.22
39	N-NO <sub>3</sub>	mg/L	0	35.8	6.74
39	Cl	mg/L	14.29	413.58	122.42
39	HCO <sub>3</sub>	mg/L	16.5	496.3	305.72
39	F	mg/L	0.19	2.7	1.12
<b>Cationes</b>					
39	Ca	mg/L	16.83	212.32	91.99
39	Mg	mg/L	1.85	62.29	24.32
39	Na	mg/L	3.46	210.68	115.72
39	K	mg/L	1.17	39.96	13.45
39	Sr	µg/L	1.78	5060	2122.62

Tabla 6. Resultados estadísticos de elementos traza.

Número de muestras medidas	Parámetros	Unidad de medida	Min	Max	Promedio
<b>Elementos traza</b>					
38	Ag	µg/L	-8.96	2.2485	-4.21
	Al	µg/L	-4	612.98	21
38	As	µg/L	2.08	52.685	10.830
38	Ba	µg/L	15.89	171.78	65.199
38	Cd	µg/L	0.01	328.66	32.896
38	Cr	µg/L	0	3.152	0.311
38	Cu	µg/L	0	9.53	1.859
	Fe	µg/L	0	331.65	51.132
38	Hg	µg/L	0.242	1.299	0.712
	Li	µg/L	0.20	215.3	85.688
	Mn	µg/L	-0.21	123.99	10.786
38	Mo	µg/L	-0.4290	40.18	3.186
38	Ni	µg/L	-0.99	9.6315	1.213
38	Pb	µg/L	0.01	2.863	0.555
38	Sb	µg/L	0.01	5.106	0.897
38	Se	µg/L	0.32	40.12	4.154
	Si	µg/L	0.64	35.01	16.885
38	Sn	µg/L	-0.2096	7.894	0.245
	Sr	µg/L	1.78	5060	2122.624
38	Tl	µg/L	0.003	0.46	0.144
38	U	µg/L	0.31	23.76	4.163
38	V	µg/L	0.34	57.24	12.456
	Zn	µg/L	0.04	162.1	25.148

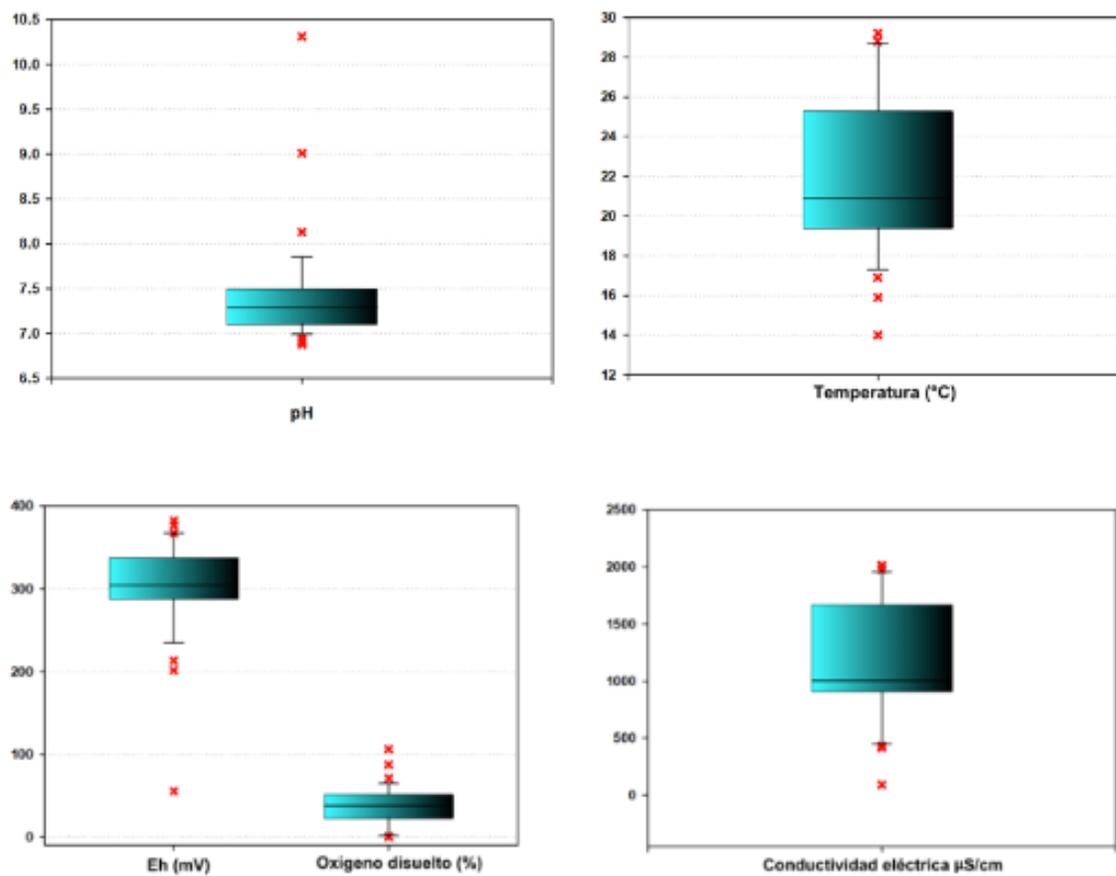
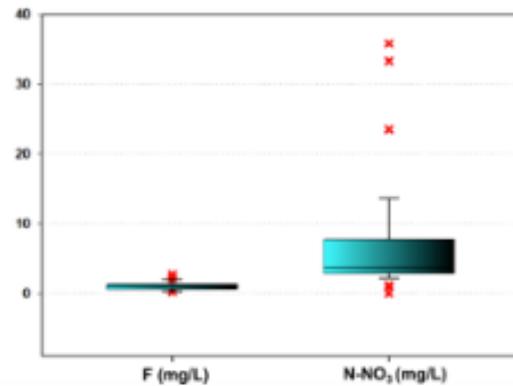
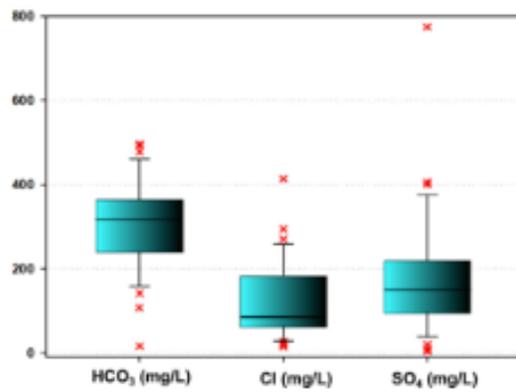
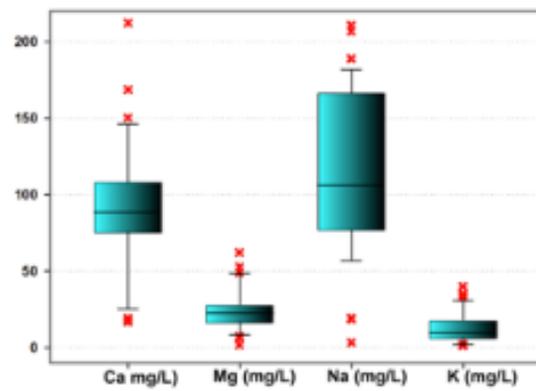


Figura 56. Gráficos de cajas y bigotes que representan el análisis estadístico de los parámetros de campo para los aprovechamientos.

a)



b)



c)

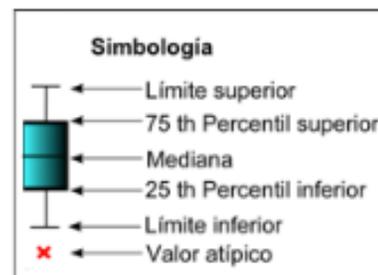


Figura 57. Gráficos de cajas y bigotes que representan el análisis estadístico para los aprovechamientos: a) aniones, b) cationes, c) simbología.

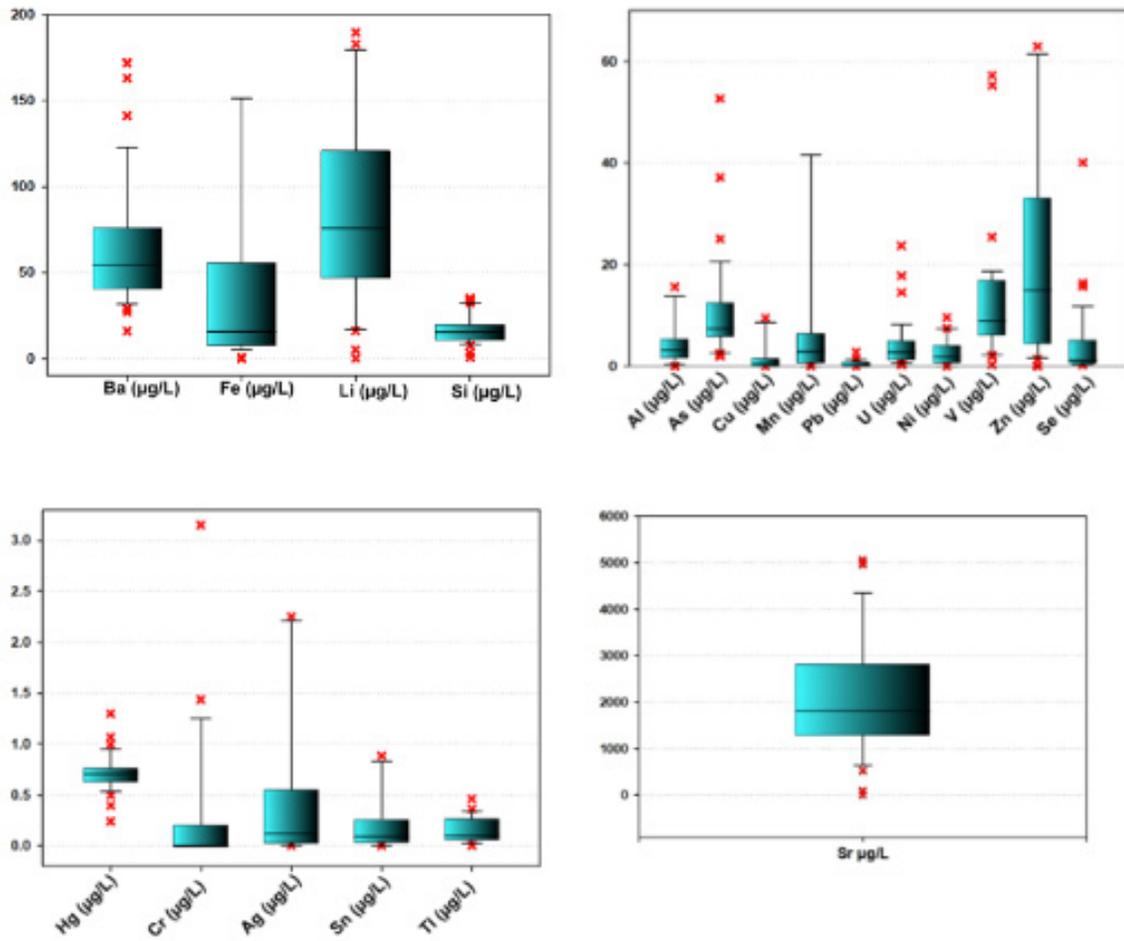


Figura 58. Gráficos de cajas y bigotes que representan el análisis estadístico de los parámetros de campo para los aprovechamientos.

A continuación, se describen los resultados estadísticos por tipo de aprovechamiento:

## **Bordo**

**Parámetros de campo:** la temperatura mínima corresponde a 14°C, la máxima a 20°C y el promedio de 17.9°C; estas bajas temperaturas (por debajo de la temperatura media anual) resultan del contacto con la atmósfera. El pH mínimo es de 7.69, el máximo de 10.31 y el promedio de 9, estos promedios que sobrepasan los límites estadísticos se dan porque el agua superficial se pone en equilibrio con el CO<sub>2</sub> de la atmósfera. El Eh mínimo corresponde a 263.5 mV, el máximo a 300.7 mV y el promedio a 279.4 mV, estos valores denotan que los bordos se encuentran en condiciones oxidantes y aeróbicas, lo que es consistente con el contenido de oxígeno disuelto. El valor mínimo de oxígeno disuelto es de 4.44 mg/L, el máximo de 9.7 mg/L y el promedio de 6.27 mg/L. La conductividad eléctrica presenta un valor mínimo de 92.2 µS/cm, un máximo de 946 µS/cm y un promedio de 485 µS/cm. Para los sólidos disueltos totales, el valor mínimo le corresponde 48 mg/L, el máximo 514 mg/L y el promedio 262 mg/L. La alcalinidad presenta un valor mínimo de 46 mg/L, un máximo de 129 mg/L y un promedio de 88.3 mg/L.

**Elementos mayores (aniones):** considerando los promedios de los aniones, se identifica que predomina el sulfato con un mínimo de 9.4 mg/L, un máximo de 185 mg/L y un promedio de 98.6 mg/L. Luego el bicarbonato con un valor mínimo de 16.5 mg/L, un valor máximo de 141.4 mg/L y un promedio de 88.4 mg/L. Le sigue el cloruro con un mínimo de 14.3 mg/L, un máximo de 173 mg/L y un promedio de 71.2 mg/L. El nitrato presenta un mínimo de 0.9 mg/L, un máximo de 35.8 mg/L y un promedio de 35.8 mg/L. Y por último el fluoruro con un mínimo de 0.21 mg/L, un máximo de 0.52 mg/L y un promedio de 0.33 mg/L.

**Elementos mayores (cationes):** el sodio tiene un mínimo de 3.5 mg/L, un máximo de 112.5 mg/L y un promedio de 57.6 mg/L, siendo éste el catión predominante. El calcio presenta un mínimo de 19.5 mg/L, un máximo de 74.7 mg/L y un promedio de 39.8 mg/L. El sodio muestra un mínimo de 3.46 mg/L, un máximo de 112.55 mg/L y un promedio de 57.59 mg/L. Finalmente, el magnesio es el que menos concentración presenta con un mínimo de 1.85 mg/L, un máximo de 17.4 mg/L y un promedio de 8.5 mg/L.

Considerando los valores descritos previamente se identificó que el bordo 18 presenta los menores valores de Eh, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales y los mayores de pH y oxígeno disuelto; esto resulta de dos factores, el primero es que al ser agua superficial se encuentra en contacto directo con la atmósfera y el segundo es debido a que el día que se hizo la toma de la muestra de agua llovió en el área, por lo que el agua

de lluvia se mezcló con el agua superficial. También presenta los menores valores tanto de aniones como cationes, lo que es consistente con las concentraciones mínimas de conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales.

Por el contrario, el bordo 3A (periodo febrero 2019), presenta los valores mínimos de pH y oxígeno disuelto y los máximos de Eh, conductividad eléctrica y aniones y cationes, lo cual refleja que, para éste periodo, el agua subterránea ya tiene mayor tiempo de recorrido y que el periodo de recarga es en septiembre (bordo 3).

## Manantiales

**Parámetros de campo:** presentan una temperatura mínima de 20.5°C que corresponde al manantial de Moctezuma (muestra 9A), una máxima de 28.7°C que corresponde al manantial de Las Cruces (muestra 1) y un promedio de 24.2°C; lo que según con la clasificación de Ergorov y Luge (1967) el manantial de Las Cruces es considerado agua termal. El valor mínimo de pH es de 6.99, el máximo 7.66 y el promedio 7.23. Al Eh le corresponde un mínimo de 213 mV, un máximo de 339.6m V y un promedio de 299.6m V, estos valores son consistentes con condiciones oxidantes. El mínimo de oxígeno disuelto es de 0.7 mg/L, el máximo de 4.47 mg/L y el promedio de 2.4 mg/L; los valores mínimos y máximos tanto de Eh como de oxígeno disuelto corresponden al mismo aprovechamiento (manantial Moctezuma, muestra 9) para diferentes periodos, los máximos para septiembre 2018 y los mínimos para marzo 2019, lo que indica la evidencia de recarga de agua subterránea. La conductividad eléctrica presenta un valor mínimo de 912  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , un máximo de 1013  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y un promedio de 965.9  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . El valor mínimo de los sólidos disueltos totales es de 478 mg/L en el manantial Las Cruces, el máximo de 747 mg/L en el manantial Moctezuma (muestra 9B) y el promedio de 575.4 mg/L. La alcalinidad presenta un mínimo de 244 mg/L, un máximo de 298.8 mg/L y un promedio de 271.5 mg/L.

**Elementos mayores (aniones):** el bicarbonato es el anión que predomina en los manantiales, le corresponde un mínimo de 296.5 mg/L, un máximo de 363.9 mg/L y un promedio de 329.3 mg/L. El sulfato es el siguiente en cantidad de concentración, presenta un mínimo de 68.6 mg/L, un máximo de 180 mg/L y un promedio de 117.7 mg/L. El cloruro muestra un mínimo de 64.3 mg/L, un máximo de 126.3 mg/L y un promedio de 86.1 mg/L. Los nitratos tienen un mínimo de 2.2 mg/L, un máximo de 3.5 mg/L y un promedio 3.5 mg/L. Por último, el fluoruro muestra un mínimo de 0.6 mg/L, un máximo de 1.27 mg/L y un promedio de 1.022 mg/L. El manantial de Las Cruces es el que presenta los menores valores de cloruro, fluoruro y nitratos.

**Elementos mayores (cationes):** El catión de mayor concentración es el calcio con un mínimo de 79.9 mg/L, un máximo de 106.1 y un promedio de 88.5 mg/L; le sigue el sodio que presenta un mínimo de 70.9 mg/L, un máximo de 106.3 y un promedio de 81.9 mg/L. El magnesio muestra un mínimo de 16.9 mg/L, un máximo de 22.6 mg/L y un promedio de 19.4 mg/L. Finalmente, el potasio es el que menos predomina, tiene un mínimo de 2.3 mg/L, un máximo de 9.5 mg/L y un promedio de 6.9 mg/L. El manantial de las Cruces es el que presenta los valores menores de magnesio, sodio y potasio.

### **Norias:**

**Parámetros de campo:** las norias presentan una temperatura mínima de 15.9°C, una máxima de 21.2°C y un promedio de 19°C. El pH mínimo es de 6.91, el máximo de 7.85 y el promedio de 7.4. El valor mínimo del Eh corresponde a 234.8 mV, el máximo a 382.4 mV y el promedio a 324.9 mV. Al oxígeno disuelto le corresponde un valor mínimo de 0.34 mg/L, un máximo de 5.76 mg/L y un promedio de 3.7 mg/L. Los valores de Eh y oxígeno disueltos son consistentes con medios oxidantes. La conductividad eléctrica muestra un mínimo de 432.6  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , un máximo de 2010  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , y un promedio 1209.64  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Los sólidos disueltos totales tienen un valor mínimo de 252 mg/L, un máximo de 1797 mg/L y un promedio de 921.5 mg/L. El valor mínimo de la alcalinidad es 143.5 mg/L, el máximo 421.7 mg/L y el promedio 281.6 mg/L.

**Elementos mayores (aniones):** el bicarbonato es el anión que predomina, presenta un mínimo de 174.9 mg/L, un máximo de 496.3 mg/L y un promedio de 338.5 mg/L. El sulfato tiene un valor mínimo de 2.7 mg/L, un máximo de 774.6 mg/L y un promedio de 196.35 mg/L. El cloruro tiene un valor mínimo de 21.4, un máximo de 413.6 mg/L y un promedio de 125 mg/L. El valor mínimo del nitrato es de 3.2 mg/L, el máximo de 23.5 mg/L y el promedio de 7.95 mg/L. Finalmente, el fluoruro presenta un mínimo de 0.19 mg/L, un máximo de 2.7 mg/L y un promedio de 1.3 mg/L.

**Elementos mayores (cationes):** predomina el sodio, el valor mínimo es de 18.7 mg/L, un máximo de 210.7 mg/L y un promedio de 126.2 mg/L. El valor mínimo del calcio es de 16.8 mg/L, un máximo de 212.3 mg/L y un promedio 94.4 mg/L. El magnesio presenta un valor mínimo de 7.6 mg/L, un máximo de 62.3 mg/L y un promedio 28 mg/L. Por último, el potasio tiene un mínimo de 1.2 mg/L, un máximo de 40 mg/L y un promedio de 16.7 mg/L.

### **Pozos:**

**Parámetros de campo:** presentan una temperatura mínima de 20.9°C que corresponde al pozo 4, una máxima de 29.2°C que corresponde al pozo y un promedio de 25.2°C, que

de acuerdo con la clasificación de Ergorov (1967), el pozo 19 se puede clasificar como agua termal. El valor mínimo de pH es de 6.88, el máximo 8.13 y el promedio 7.23. Al Eh le corresponde un mínimo de 55.2 mV, un máximo de 367.3 mV y un promedio de 285 mV. El valor mínimo de Eh corresponde al pozo 16 condición que asociada con un valor mínimo de oxígeno disuelto (0.08 mg/L), sugiere que existe un proceso de reducción, probablemente derivado de la oxidación de materia orgánica (reduciendo hidróxidos de hierro y sulfatos). El mínimo de oxígeno disuelto es de 0 mg/L, el máximo de 7.7 mg/L y el promedio de 3 mg/L. La conductividad eléctrica presenta un valor mínimo de 650  $\mu\text{S/cm}$ , un máximo de 2013  $\mu\text{S/cm}$  y un promedio de 1442.23  $\mu\text{S/cm}$ . El valor mínimo de los sólidos disueltos totales es de 397 mg/L, el máximo de 1359 mg/L y el promedio de 913.54 mg/L. La alcalinidad presenta un mínimo de 131.4 mg/L, un máximo de 393.1 mg/L y un promedio de 249.6 mg/L.

**Elementos mayores (aniones):** el bicarbonato es el anión que predomina en los pozos, le corresponde un mínimo de 157.7 mg/L, un máximo de 478.1 mg/L y un promedio de 303.5 mg/L. El sulfato es el siguiente en cantidad de concentración, presenta un mínimo de 72 mg/L, un máximo de 406.2 mg/L y un promedio de 209.9 mg/L. El cloruro muestra un mínimo de 55.8 mg/L, un máximo de 294.9 mg/L y un promedio de 153.5 mg/L. Los nitratos tienen un mínimo de 0 mg/L, un máximo de 33.3 mg/L y un promedio 6.3 mg/L. Por último, el fluoruro muestra un mínimo de 0.61 mg/L, un máximo de 1.87 mg/L y un promedio de 1.2 mg/L.

**Elementos mayores (cationes):** El catión de mayor concentración es el sodio con un mínimo de 77.9 mg/L, un máximo de 206.9 y un promedio de 137.9 mg/L; le sigue el calcio que presenta un mínimo de 57.5 mg/L, un máximo de 150.2 y un promedio de 103.5 mg/L. El magnesio muestra un mínimo de 10.8 mg/L, un máximo de 49.3 mg/L y un promedio de 26.8 mg/L. Finalmente, el potasio es el que menos predominancia presenta, tiene un mínimo de 5.9 mg/L, un máximo de 18.3 mg/L y un promedio de 11.7 mg/L.

### 8.2.3 Diagramas de Piper (1944)

Los diagramas de Piper permitieron establecer ocho familias de agua, las cuales son bicarbonatada-mixta ( $\text{HCO}_3\text{-MIX}$ ), bicarbonatada-cálcica ( $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ ), bicarbonatada sódica ( $\text{HCO}_3\text{-Na}$ ), mixta mixta (MIX-MIX), mixta cálcica (MIX-Ca), mixta sódica (MIX-Na), sulfatada mixta ( $\text{SO}_4\text{-MIX}$ ) y clorurada cálcica (Cl-Ca) (figura 59). En la figura 60 se muestran los diagramas por tipo de aprovechamiento.

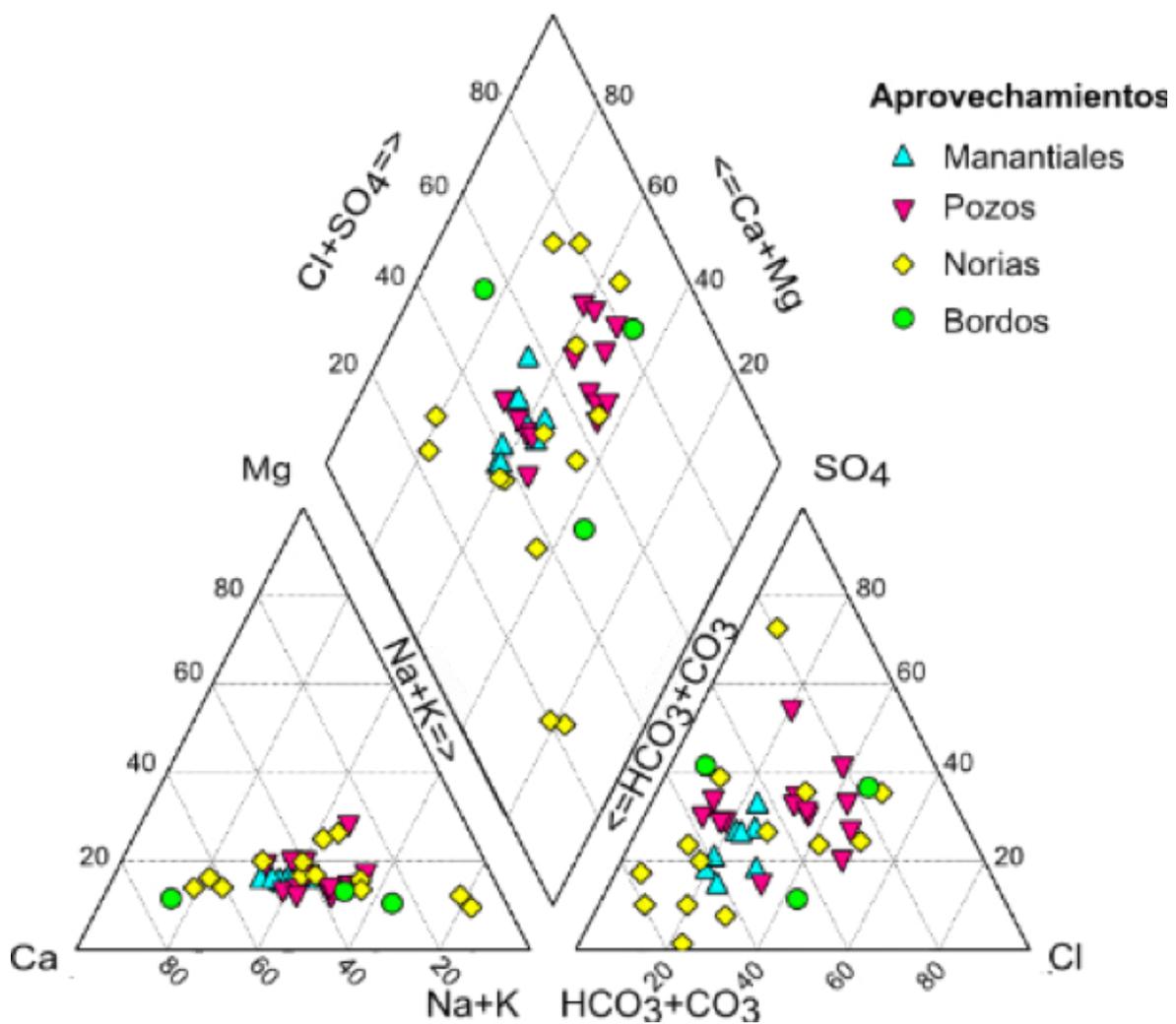
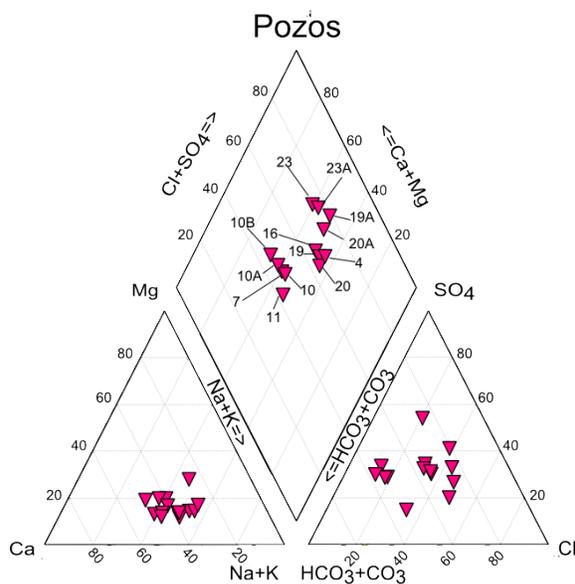
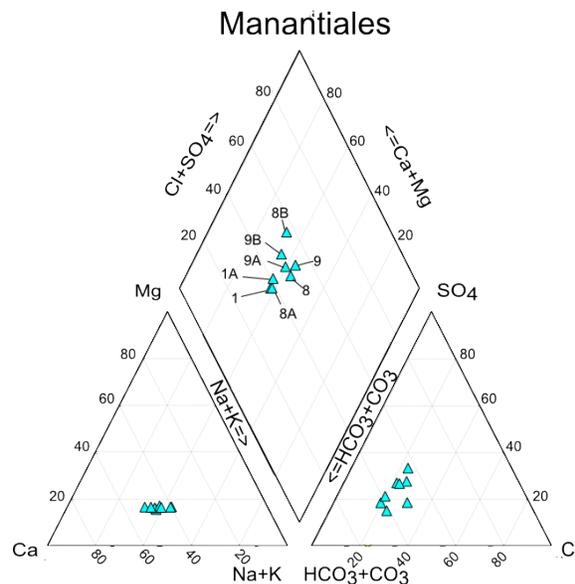


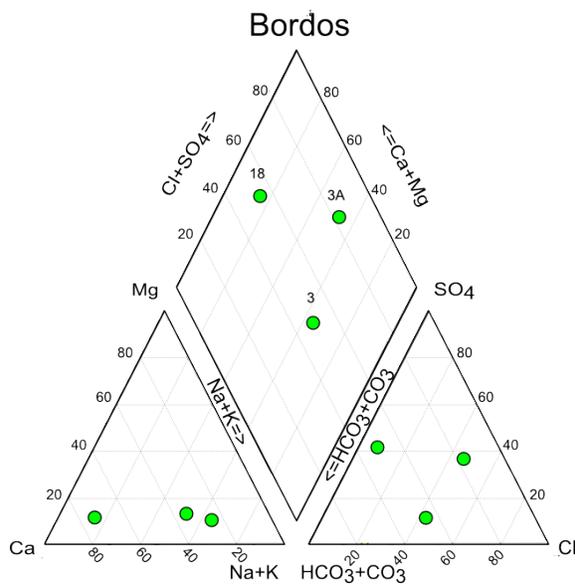
Figura 59. Diagrama de Piper para los aprovechamientos muestreados.



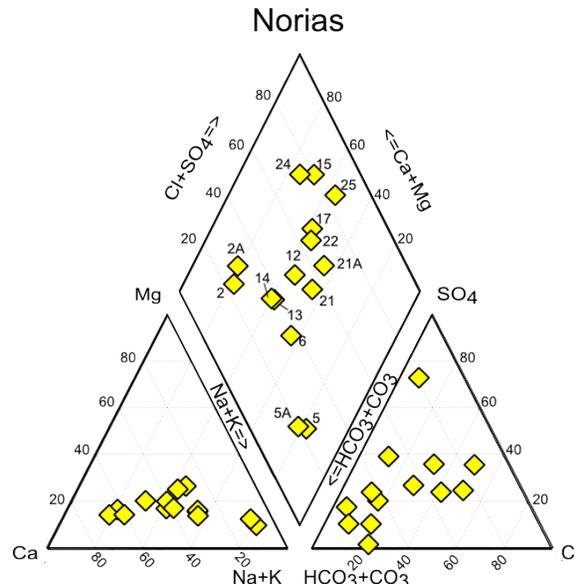
Localidades	
4: Ranchería Juárez	16: San Ignacio/Los Ramírez
7: Santa Catarina	19 y 19A: El Garabatllo
10, 10A y 10B: El Picacho	20 y 20A: Bloquera/Moctezuma
11: San José del Grito	23 y 23A: Morterillos



Localidades	
1 y 1A: Las Cruces	
8, 8A, 8B, 9, 9A, 9B: Ojo de Agua	



Localidades	
3 y 3A: Ranchería Juárez	
18: Los Ramírez	



Localidades	
2 y 2A: Ranchería Juárez	17: Las Alteñas
5 y 5A: Santa Teresa	21 y 21A: Moctezuma
6: Santa Rita	22: La Presa
12, 13 y 14: San José del Grito	24: Ejido Providencia
15: El Pedernal	25: Los Tajos

Figura 60. Diagramas de Piper por tipo de aprovechamiento.

A continuación, en la tabla 7 se muestran los aprovechamientos por familia de agua y en la figura 61 se muestra la distribución porcentual de cada familia de agua clasificada por ion dominante.

Tabla 7. Familias de agua de aprovechamientos muestreados.

Familia	Clave del aprovechamiento
HCO <sub>3</sub> -Mix	1, 7, 8, 10, 11, 13, 14, 8A, 9A, 10A, 1A, 9B, 10B
HCO <sub>3</sub> -Ca	2, 2A
Mix-Na	3, 16, 19, 20, 21, 3A, 4, 21A
HCO <sub>3</sub> -Na	5, 5A, 6
Mix-Mix	9, 17, 12, 22, 25, 19A,20A, 23A
SO <sub>4</sub> -Mix	15, 23
Mix-Ca	18, 8B
Cl-Ca	24

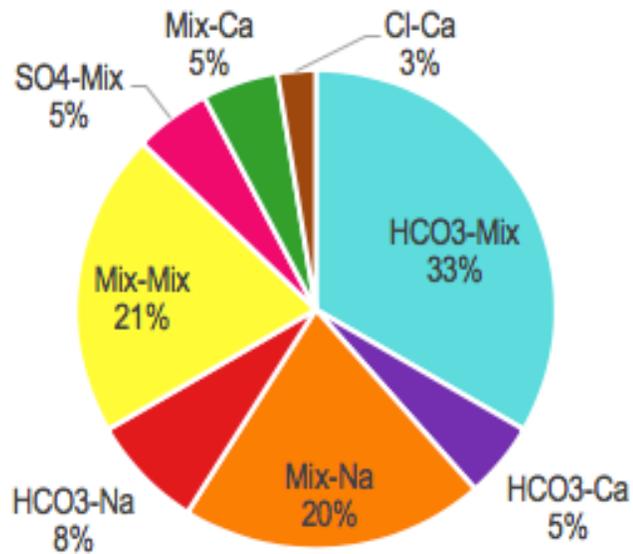


Figura 61. Porcentajes de familias de agua.

De acuerdo con la distribución de los porcentajes, se puede observar que las familias de agua que predominan son la bicarbonatada-mixta, la mixta-mixta y la mixta-sódica, las cuales pueden considerarse como principales, ya que abarcan el 74 %.

Una vez identificadas las familias de agua, se realizó un mapa de estas sin sus repeticiones (figura 62), con la finalidad de tener un panorama general de la distribución en el área de estudio, sin embargo, esto tiene la desventaja de que las muestra no representan el mismo periodo de tiempo.

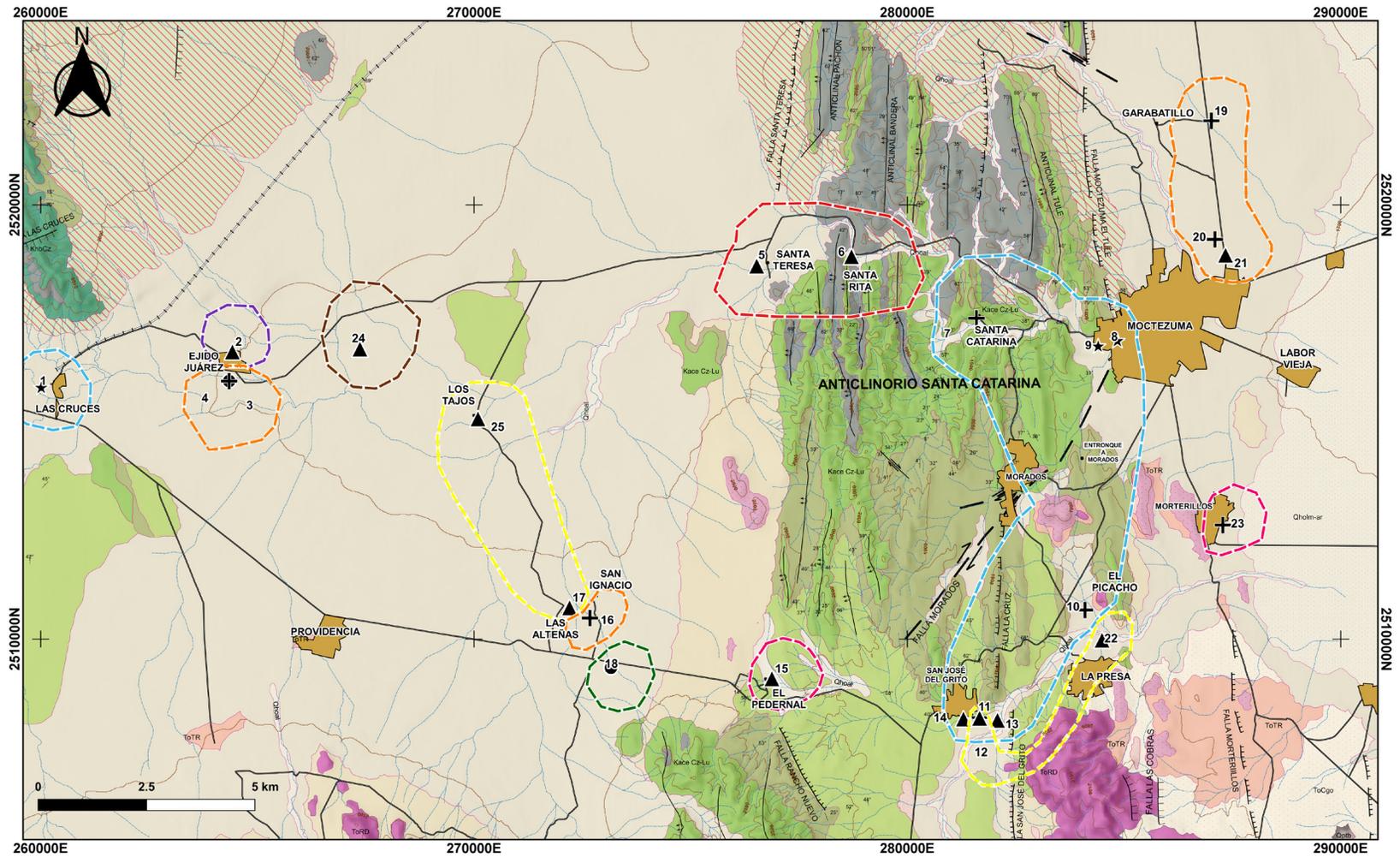


Figura 62. Familias de agua de los aprovechamientos sin repeticiones.

SÍMBOLOS TOPOGRÁFICOS		FAMILIAS DE AGUA		Leyenda	
Corriente de agua	HCO3-MIX	Falla normal inferida	Toba riolítica (ToTR)		
1000 Curvas de nivel 100 m	MIX-MIX	Falla lateral inferida	Conglomerado oligomictico (ToCgo)		
Población	MIX-Na	Anticlinal	Riodacita (ToRD)		
Localidad	SO4-MIX	Rumbos y echados	Conglomerado polimictico (Teo-Cgp)		
Carretera	HCO3-Na	<b>CUATERNARIO</b>			
Vía férrea	Cl-Ca	Aluvión (Qhoal)			
<b>TIPOS DE APROVECHAMIENTO</b>		Limo-arena (Qholm-ar)			
Bordo	MIX-Ca	Basalto (Qptb)			
Manantial	HCO3-Ca	<b>TERCIARIO-NEÓGENO</b>		<b>CRETÁCICO SUPERIOR</b>	
Noria	<b>SÍMBOLOS GEOLÓGICOS</b>		Conglomerado polimictico-arenisca (TplQpt Cgp-Ar)	Fm. Caracol (Kse Ar-Lu)	
Pozo	<b>ESTRUCTURAL</b>		Andesita-basalto (TmA-B)	Fm. Indidura (KtCz-Lu)	
	Falla lateral	<b>TERCIARIO-PALEÓGENO</b>		<b>CRETACICO INFERIOR</b>	
	Falla normal	Ignimbrita (Tolg)	Fm. Cuesta del Cura (Kace Cz-Lu)		
			Fm. La Peña (Kapa Cz-Lu)		
			Fm. Cupido (Khb Cz)		

Con base en la distribución espacial de las familias de agua se dedujo que la porción oriente y poniente son sistemas de agua subterránea diferentes, lo que es consistente con las direcciones de flujo identificadas y las características geológicas descritas en el apartado 5.4.1. Debido a esto, se propuso una evolución hidrogeoquímica con base en la secuencia teórica de Chevotareb, las conductividades eléctricas, los sólidos disueltos totales, el oxígeno disuelto y el Eh de las muestras de agua (sin repeticiones), para cada sistema subterráneo (figuras 63 y 66), las cuales se describen por tipo de material:

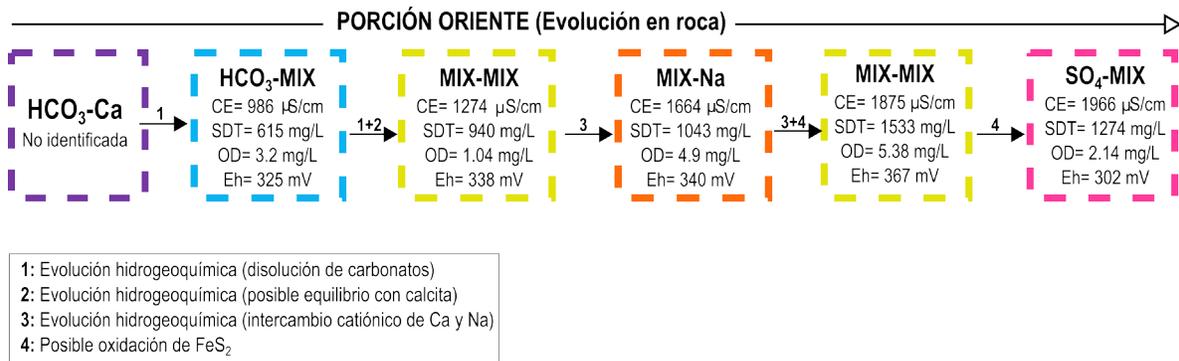
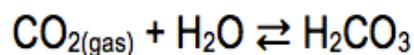
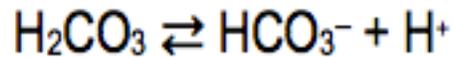


Figura 63. Evolución del agua subterránea en aprovechamientos de la porción oriente alojados en roca. Elaboración propia.

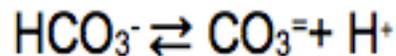
**Familia bicarbonatada-mixta (HCO<sub>3</sub>-MIX):** se encuentra en el manantial de Moctezuma, donde el agua descarga (muestra 9) y aguas abajo en las albercas del parque recreativo (muestra 8), en las norias de San José del Grito (muestras 13 y 14) con una profundidad promedio de 13 m y en los pozos de Santa Catarina (muestra 7) de 15 m de profundidad y el Picacho (muestra 10) de 300 m de profundidad. Se compone principalmente de bicarbonato (promedio de 382.5 mg/L), seguido por el sulfato (127.7 mg/L) y sodio (102.4 mg/L). Teóricamente, esta familia de agua evoluciona de la familia HCO<sub>3</sub>-Ca, sin embargo, al no observarse en el área de estudio, se considera a la HCO<sub>3</sub>-MIX como el inicio de la evolución hidrogeoquímica. Esta composición bicarbonatada se deriva de un proceso de meteorización química en donde el agua de lluvia que logra infiltrarse provoca la disolución del CO<sub>2</sub> atmosférico que se encuentra en los poros del suelo reaccionando con carbonatos y formando el anión bicarbonato, por medio de la siguiente reacción:



Pero el H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> es muy inestable, y la mayor parte se disocia de acuerdo con la reacción siguiente:



Y, finalmente, una pequeña parte del HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> también se disocia generando carbonato y más acidez:



Debido a lo anterior se dedujo que el área de recarga se encuentra a una distancia relativamente cercana, además que éstos aprovechamientos están relativamente más cercanos a las serranías del anticlinorio Santa Catarina, el cual es la zona de recarga potencial que otros aprovechamientos de la porción oriente.

Otra fuente de bicarbonato se da en las aguas saturadas de calcita que conforme se alejan de la zona de recarga va ocurriendo la disolución del carbonato proveniente de las calizas.

**Familia mixta-mixta (MIX-MIX):** esta familia de agua corresponde a las norias 12 de San José del Grito (17 m de profundidad) y 22 de La Presa (21 m de profundidad) ubicadas al sureste del anticlinorio Santa Catarina. Los iones que predominan son el bicarbonato (promedio 380.9 mg/L), seguido del sulfato (promedio 127.6 mg/L), el sodio (promedio de 102.4 mg/L), el calcio (promedio 86 mg/L) y el cloruro (promedio 82.8 mg/L). Esta familia representa la secuencia evolutiva de la familia HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>-MIX, la cual indica una mayor interacción agua-roca debido a una mayor distancia de recorrido, lo cual coincide con la dirección de flujo propuesta de oeste a este.

**Familia mixta-sódica (MIX-Na):** se distribuye al noreste de la zona de estudio, en el Pozo 19 de Garabatillo de 250 m de profundidad, el pozo 20 de Moctezuma con 70 m de profundidad y la noria 21 de 23 m de profundidad. Los iones predominantes son el bicarbonato (promedio 337 mg/L), el sulfato (promedio 208 mg/L) y el sodio (promedio 169 mg/L). Debido a las conductividades eléctricas, se determinó que esta familia evolucionó de la familia MIX-MIX. El origen de la composición sódica se da por el intercambio catiónico de calcio y magnesio por sodio en una fracción arcillosa. Éste proceso es de los más comunes dentro de los sistemas naturales. Ocurre por la disolución de rocas sedimentarias de origen marino con contenido de arcillas lo suficientemente permeables para que el agua se desarrolle como recurso. Dado que

el catión dominante en la mayoría de las aguas de recarga es el calcio, el desequilibrio entre el agua subterránea y los iones adsorbidos es una ocurrencia común en donde el agua salina forma parte de la historia química de un acuífero (Lloyd y Heathcote, 1985). Para reconocer el intercambio catiónico en las familias de agua mencionadas se realizó el diagrama propuesto por Lloyd y Heathcote (1985) figura 64. En éste se trazan los iones de intercambio uno contra el otro y se sustrae el Cl del Na para observar el aumento de sodio aportado por la mezcla de agua. La relación de intercambio iónico se revela claramente en las muestras de calcio más altas como una línea con pendiente -1. Básicamente, se forma una diagonal y entre más lejos del cero, más fuerza de intercambio catiónico.

La eliminación del calcio por intercambio iónico altera el equilibrio, disolviendo más calcita y tendiendo a restaurar la concentración de calcio. El proceso se ve finalmente limitado por el aumento de la concentración de  $\text{CO}_3$ , lo que aumenta el pH general y reduce la solubilidad de la calcita.

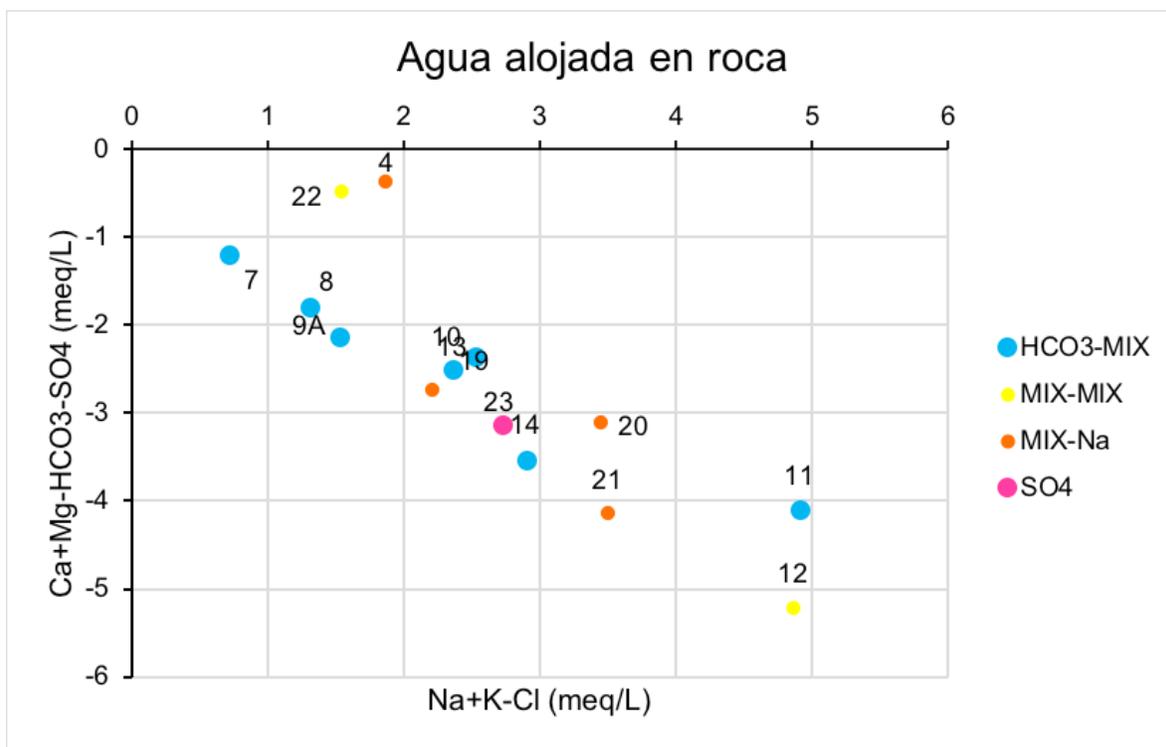
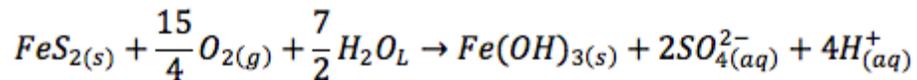


Figura 64. Diagrama de intercambio iónico propuesto por Lloyd y Heatcote (1985) para aprovechamientos alojados en roca de la porción oriente y poniente (aprovechamiento 4).

**Familia sulfatada-mixta (SO<sub>4</sub>-MIX):** corresponde al pozo 23 de Morterillos con una profundidad de 303 m. Los iones predominantes son; sulfato (406.2 mg/L), calcio (146.3 mg/L) y sodio (132.1 mg/L). Esta familia es la continuación de la familia MIX-Na; lo que indica un mayor tiempo de residencia y de distancia recorrida y posiblemente una dirección de flujo del agua hacia el sur. La familia SO<sub>4</sub>-MIX posiblemente se dé por dos procesos: la reacción de oxidación de pirita que libera sulfato proveniente de la Formación La Peña, por medio de la siguiente reacción:



O por la contaminación difusa de la antigua actividad minera relacionada con sulfuros, aproximadamente a 5 km al oeste del pozo en la mina abandonada de Entronque a Morados (figura 65), donde se extraía cobre, mercurio, plomo, zinc, oro y plata.

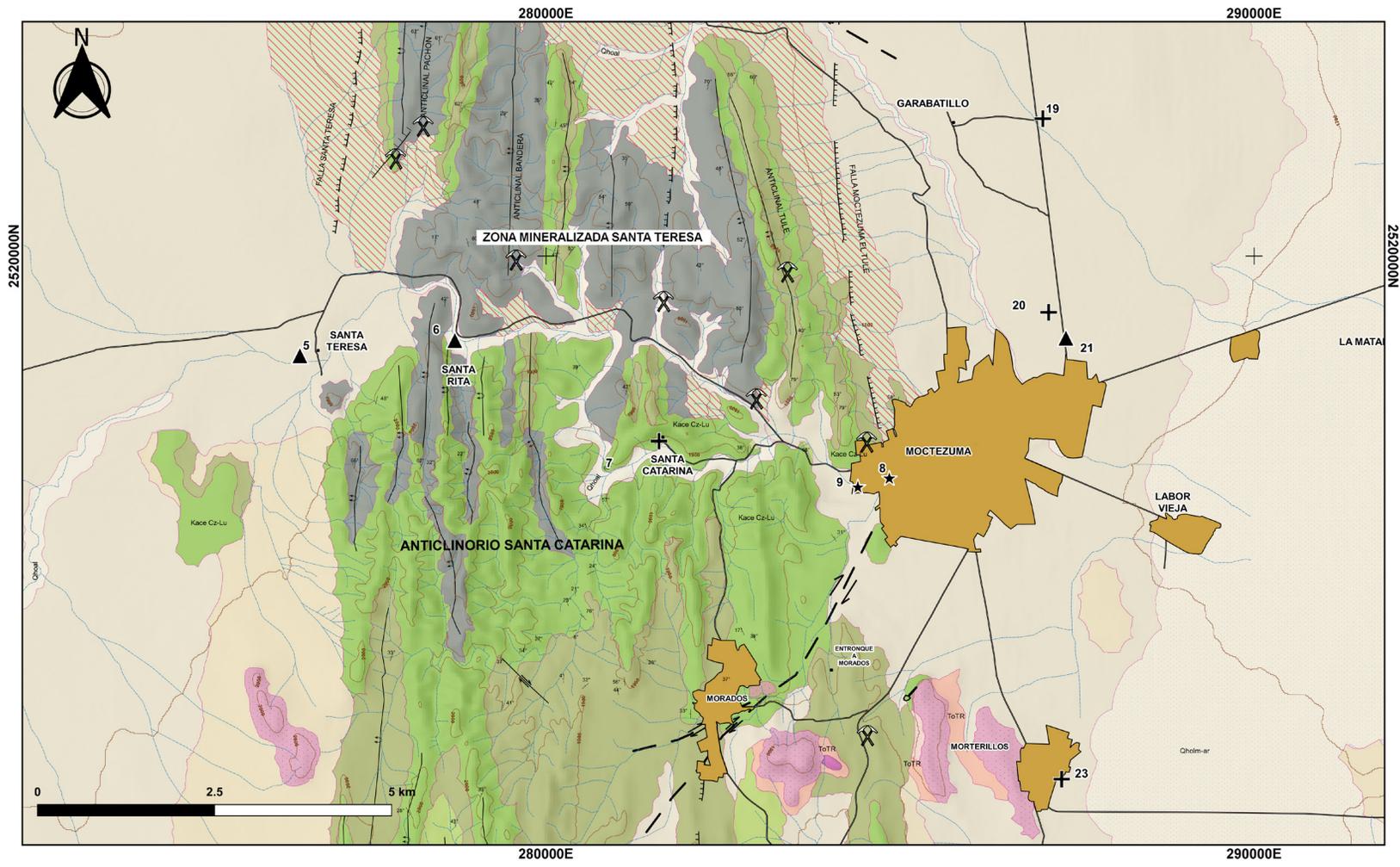


Figura 65. Mapa de zonas mineralizadas y actividades minera en el área de estudio. Tomado y modificado de SGM, 2004.

SÍMBOLOS TOPOGRÁFICOS		SÍMBOLOS MINEROS		SÍMBOLOS GEOLÓGICOS		TIPOS DE APROVECHAMIENTO	
	Corriente de agua		Pozo		Rumbos y echados		Riodacita (ToRD)
	Curvas de nivel 100 m		Mina abandonada		Aluvi3n (Qhoal)		Conglomerado polim3ctico (Teo-Cgp)
	Poblaci3n		Banco de material en producci3n		Limo-arena (Qholm-ar)		Conglomerado polim3ctico-arenisca (Teo Cgp-ar)
	Localidad	<b>ESTRUCTURAL</b>			Basalto (Qptb)	<b>CRETÁCIICO SUPERIOR</b>	
	Carretera		Falla lateral	<b>CUATERNARIO</b>			Fm. Caracol (Kse Ar-Lu)
	Vía f3rrea		Falla normal	<b>TERCIARIO-NE3GENO</b>			Fm. Indidura (KitCz-Lu)
	Bordo		Falla normal inferida		Conglomerado polim3ctico-arenisca (TplQpt Cgp-Ar)	<b>CRETACICO INFERIOR</b>	
	Manantial		Falla lateral inferida		Andesita-basalto (TmA-B)		Fm. Cuesta del Cura (Kace Cz-Lu)
	Noria		Anticlinal	<b>TERCIARIO-PALE3GENO</b>			Fm. La Peña (Kapa Cz-Lu)
					Ignimbrita (Tolg)		Fm. Cupido (Khb Cz)
					Toba riol3tica (ToTR)		
					Conglomerado oligom3ctico (ToCgo)		

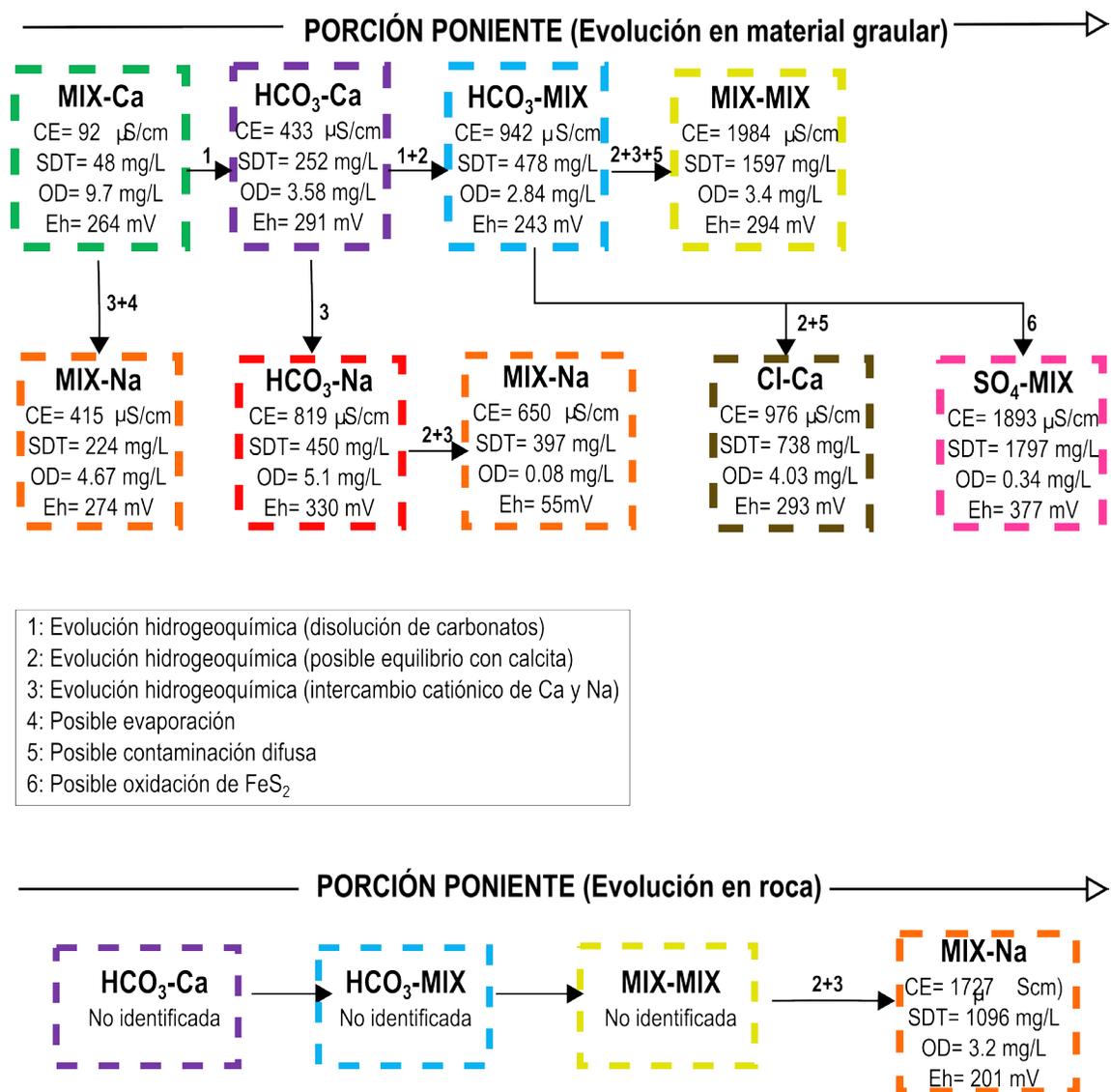


Figura 66. Evolución del agua subterránea en aprovechamientos de la porción poniente, alojados en material granular y roca. Elaboración propia.

**Familia mixta-cálcica (MIX-Ca):** corresponde al agua superficial del bordo 18 de Los Ramírez, ubicado al centro de la zona de estudio. Se compone principalmente de cloruro (26.3 mg/L), bicarbonato (16.5 mg/L) y calcio (19.5 mg/L). Su bajo contenido de conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales son característicos de aguas superficiales, por lo que se identifica como la fase inicial de la evolución hidrogeoquímica, donde el agua todavía no infiltra al subsuelo. La composición química puede ser resultado de la mezcla de agua de lluvia que cayó el día que se recolectó la muestra en combinación con el contenido de partículas del bordo.

**Familia bicarbonatada-cálcica ( $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ ):** esta familia se encuentra en la parte noroeste de la zona de estudio, en la noria 2 de la Ranchería Juárez, presentando una profundidad de 17 m. Representa la fase inicial de la evolución hidrogeoquímica y debido a la ubicación geográfica no se relaciona con la familia MIX-Ca; el bicarbonato se encuentra en una concentración de 182.2 mg/L y el calcio en 53.2 mg/L. Se infiere que el área de recarga se encuentra a una distancia relativamente cercana, que podría ser la serranía conformada por rocas calizas hacia el oeste del aprovechamiento (a menos de 5 km de distancia).

**Familia bicarbonatada-sódica ( $\text{HCO}_3\text{-Na}$ ):** se ubica en la parte norte de la zona de estudio en las norias 5 de Santa Rita y 6 de Santa Teresa de 10 y 11 m de profundidad respectivamente. La concentración de bicarbonato corresponde a un promedio de 441.9 mg/L y el sodio a un promedio de 143 mg/L. Por sus conductividades eléctricas se infiere que es la secuencia evolutiva de la familia  $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ . Su composición sódica se deriva del intercambio iónico que ocurre con material arcilloso, lo cual se corrobora con el diagrama propuesto por Lloyd y Heathcote (1985) figura 67.

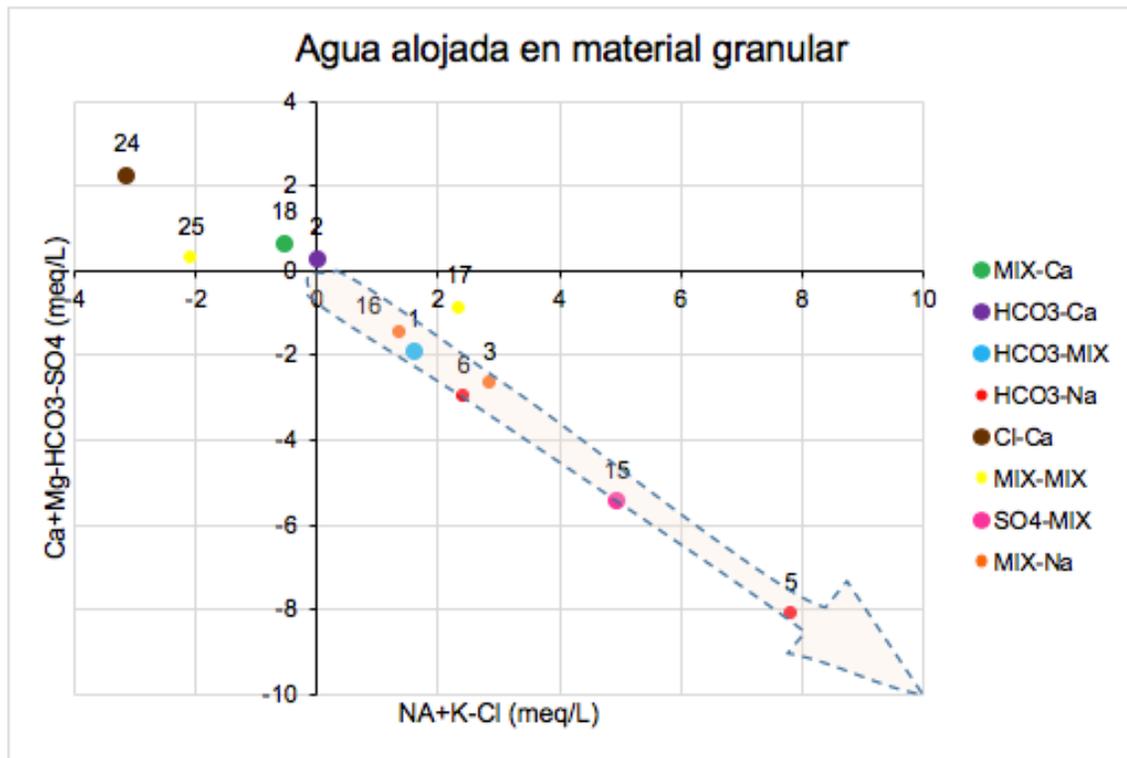


Figura 67. Diagrama de intercambio iónico propuesto por Lloyd y Heatcote (1985) para aprovechamientos alojados en material granular de la porción poniente.

**Familia bicarbonatada-mixta (HCO<sub>3</sub>-MIX):** corresponde al manantial 1 de Las Cruces. Predomina el carbonato (354 mg/L) y la composición mixta la dan los valores similares de calcio (85.3 mg/L) y sodio (77.2 mg/L). Teóricamente, ésta debió haber evolucionado de la familia HCO<sub>3</sub>-Ca, sin embargo, considerando su ubicación y dirección de flujo general se infiere que no tiene relación con la familia HCO<sub>3</sub>-Ca descrita anteriormente. Muy probablemente el área de recarga se encuentra relativamente cerca, fuera del área de estudio más hacia el poniente.

**Familia mixta-mixta (MIX-MIX):** esta familia de agua corresponde a las norias 17 de Las Alteñas (17 m de profundidad) y 25 de Los Tajos (25 m de profundidad). Los aniones que predominan son el sulfato (promedio de 363 mg/L) y el cloruro (promedio de 317.2 mg/L) y en el caso de los cationes el sodio (promedio de 192.1 mg/L) y el calcio (promedio de 152.2 mg/L). Debido a sus conductividades eléctricas, debería ser la evolución de la familia HCO<sub>3</sub>-MIX o HCO<sub>3</sub>-Na.

**Familia mixta-sódica (MIX-Na):** corresponde al agua superficial del bordo 3 de la Ranchería Juárez y al pozo 16 de San Ignacio (profundidad desconocida). Se infiere que esta familia es producto de la evaporación, lo cual es un fenómeno común en las zonas áridas y semiáridas.

**Familia sulfatada-mixta (SO<sub>4</sub>-MIX):** corresponde al aprovechamiento 15 de la noria del Pedernal con una profundidad de 16 m. El sulfato predomina con una concentración de 774.6, seguido del calcio (212.2 mg/L) y el sodio (134 mg/L). Esta composición puede ser resultado de la oxidación de piritita de la Formación La Peña o de la contaminación difusa de las minas abandonadas en la zona mineralizada de San Antonio del Rul ubicada al sureste del aprovechamiento (figura 65), en donde se extraía magnesio, zinc, cobre, plomo y plata.

**Familia clorurada-cálcica (Cl-Ca):** corresponde a la noria del Ejido Providencia (24) de 22 m de profundidad. Contiene una concentración de cloruro de 205.6 mg/L y de calcio de 19.5 mg/L. Por su conductividad eléctrica puede ser la secuencia en la evolución de familia HCO<sub>3</sub>-Na o provenir que alguna otra familia que no haya sido identificada. La concentración de cloruro puede provenir de dos fuentes: 1) de los procesos de disolución de sales presentes en el suelo y subsuelo originado de las rocas sedimentarias de origen marino o de la contaminación difusa asociada con la infiltración del agua en áreas de ganado.

**Familia mixta-sódica (MIX-Na) en material rocoso:** corresponden a los pozos 4 de la Ranchería Juárez (130 m de profundidad). Debido a que el agua subterránea de éste

aprovechamientos se mueve en el material rocoso, no se contempla en el esquema de evolución hidrogeoquímica del agua en material granular. Tampoco se relaciona con las familias de agua descritas anteriormente. No se tiene información suficiente para determinar su fuente de origen y en la figura 67, tampoco se encuentra dentro de la línea de intercambio iónico.

## 8.2.4 Diagramas de Stiff (1951) y evolución temporal de las familias de agua

Se realizaron tres mapas con diagramas de Stiff, uno por cada campaña de muestreo (figuras 68, 69 y 70), con los cuales se pudo identificar que en la porción oriente, los aprovechamientos 8, 9, 19, 20 y 23 presentaron cambios en su composición química a través del tiempo (tabla 8).

Tabla 8. Familias de agua para distintos periodos de muestreo.

Aprovechamiento	Familia de agua (conductividad eléctrica)		
	Periodo septiembre	Periodo noviembre	Periodo febrero-marzo
8	HCO <sub>3</sub> -MIX (1001 μS/cm)	HCO <sub>3</sub> -MIX (979 μS/cm)	MIX-Ca (1013 μS/cm)
9	MIX-MIX (939 μS/cm)	HCO <sub>3</sub> -MIX (912 μS/cm)	HCO <sub>3</sub> -MIX (936 μS/cm)
10	HCO <sub>3</sub> -MIX (1126 μS/cm)	HCO <sub>3</sub> -MIX (1141 μS/cm)	HCO <sub>3</sub> -MIX (1102 μS/cm)
19		MIX-Na (1767 μS/cm)	MIX-MIX (1914 μS/cm)
20		MIX-Na (1560 μS/cm)	MIX-MIX (1672 μS/cm)
23		SO <sub>4</sub> -MIX (1976 μS/cm)	MIX-MIX (2013 μS/cm)

Considerando que, para todos los aprovechamientos, las conductividades eléctricas más bajas se observan en la segunda campaña de muestreo, se determinó que la recarga de agua subterránea se refleja en el mes de noviembre, al terminar la temporada de lluvia (junio a septiembre), por lo que se define que el inicio de la evolución hidrogeoquímica corresponde a éste periodo. Aunque no se tienen los datos de septiembre para algunos aprovechamientos, se infiere que la tendencia debe ser la misma y que las conductividades eléctricas deberían ser ligeramente mayores que en noviembre debido a que en las zonas áridas y semiáridas, la recarga natural de agua subterránea es estacional y por lo general indirecta (ocurre a través de las fracturas geológicas).

Esta evolución es reflejo del dinamismo del sistema de flujo que responde con la entrada de agua de lluvia. En el caso del manantial, se infiere que en noviembre el efecto de la recarga es una mezcla entre uno o más sistemas de flujo local con un flujo intermedio.

## CAMPAÑA DE MUESTREO SEPTIEMBRE 2018

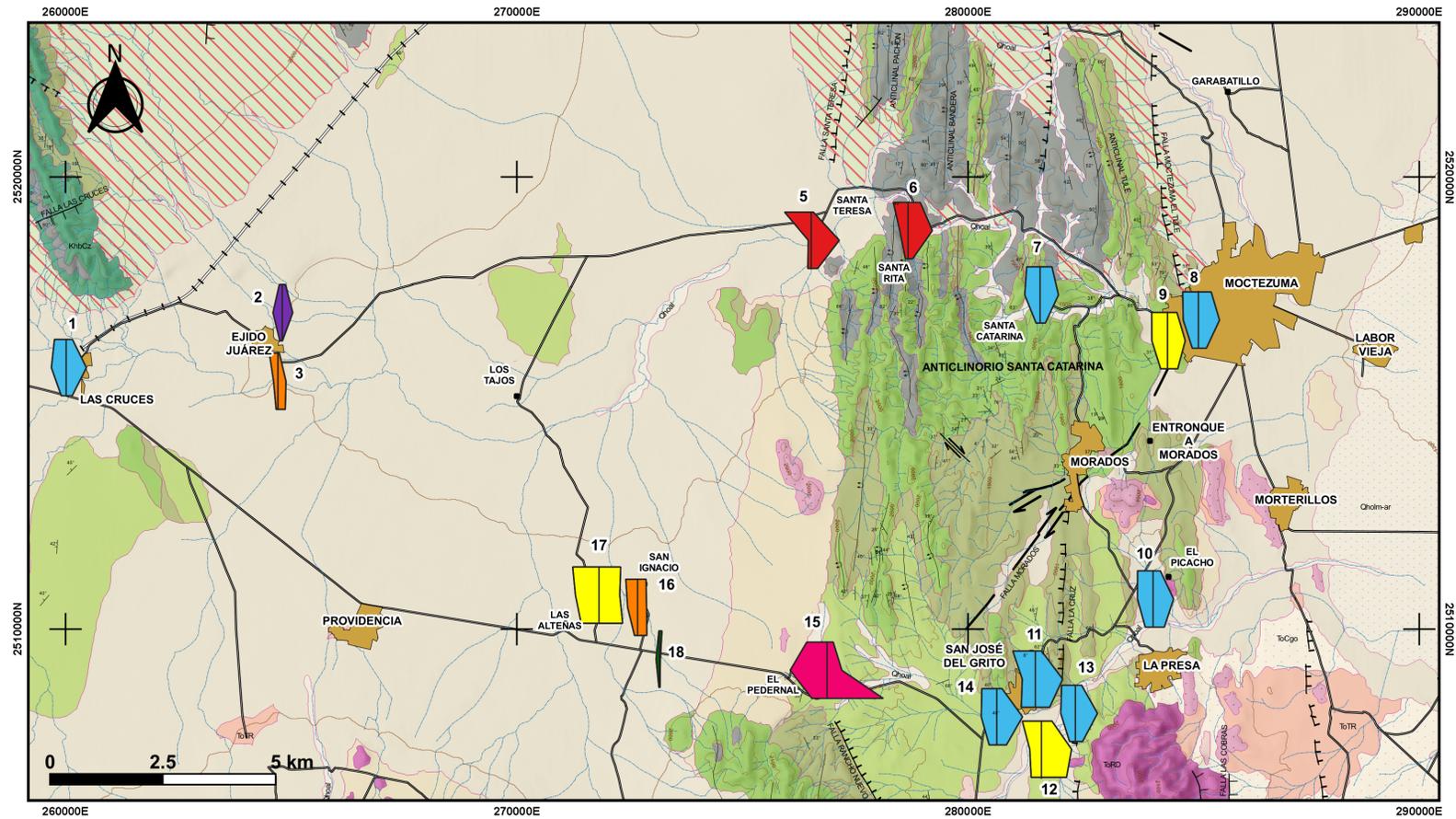


Figura 68. Mapa geológico con diagramas de Stiff para el periodo de muestreo septiembre 2018.

### CAMPAÑA DE MUESTREO NOVIEMBRE 2018

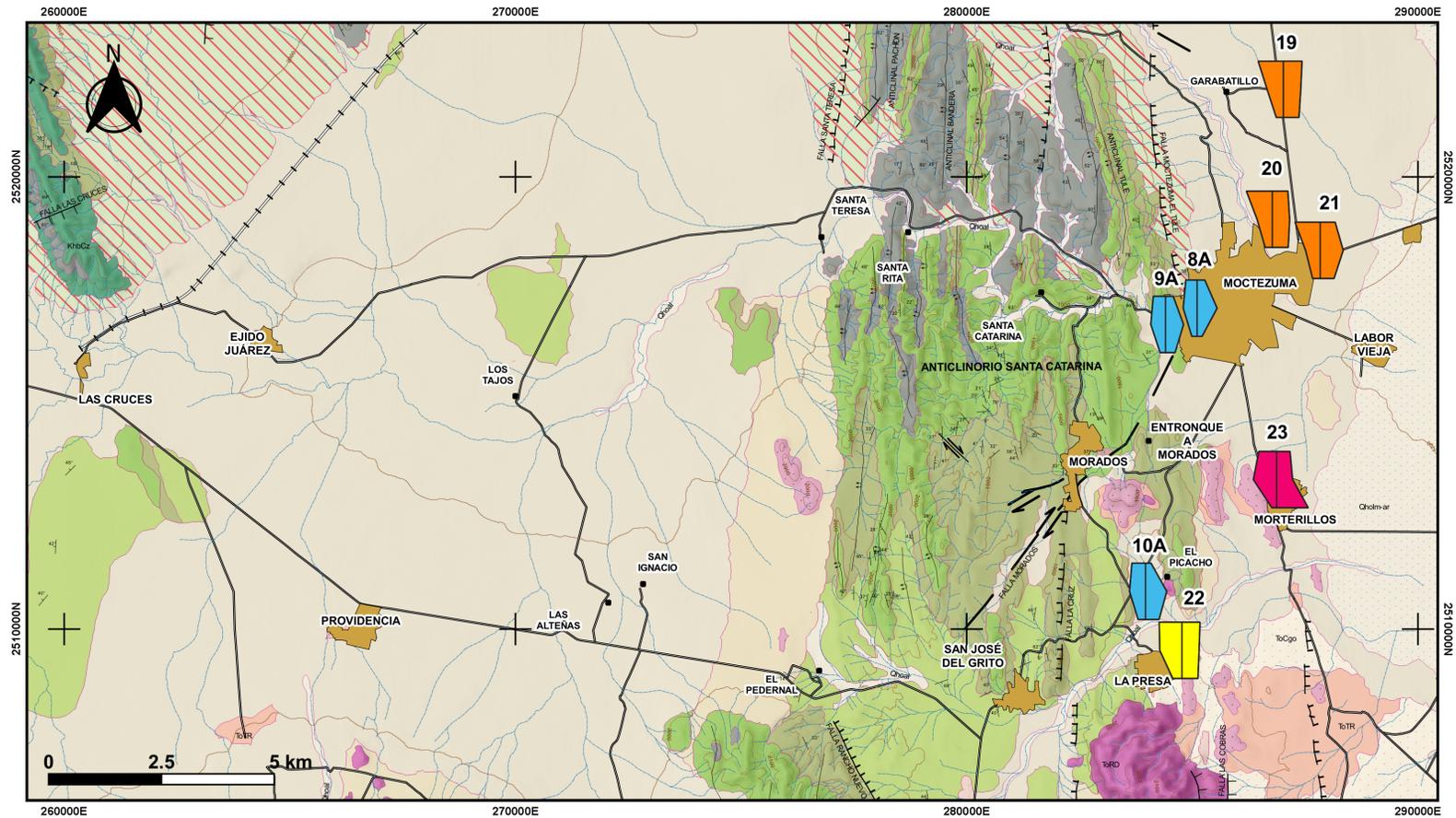


Figura 69. Mapa geológico con diagramas de Stiff para el periodo de muestreo noviembre 2018.

## CAMPAÑA DE MUESTREO FEBRERO-MARZO 2019

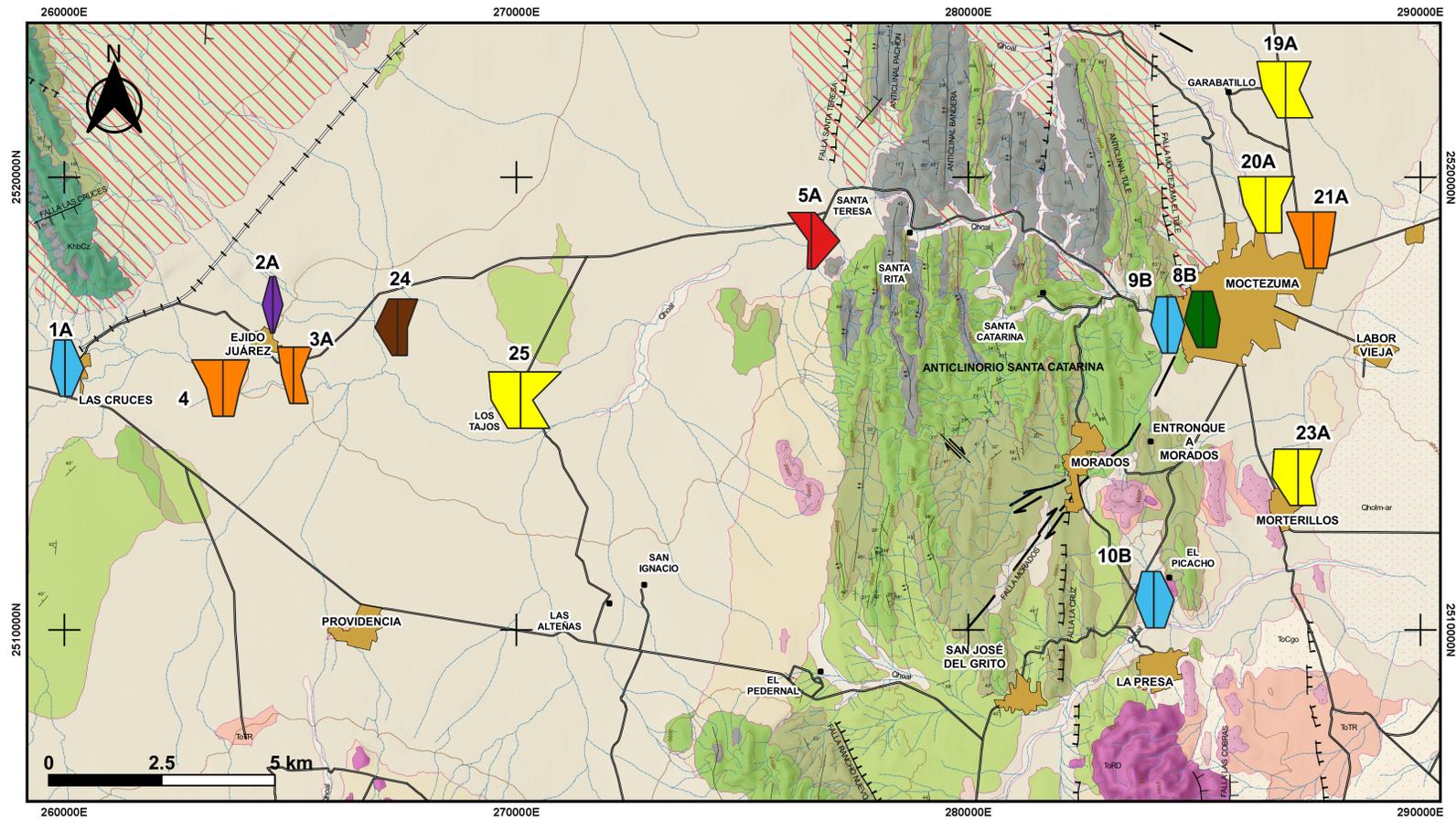
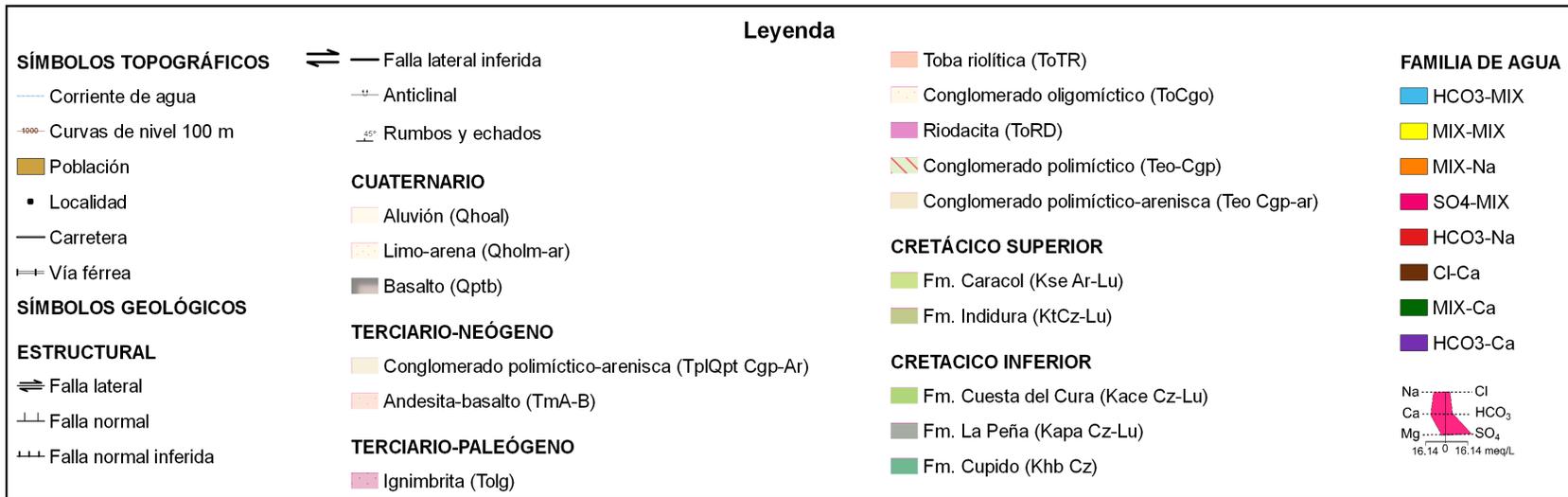


Figura 70. Mapa geológico con diagramas de Stiff para el periodo de muestreo febrero-marzo 2019.



## 8.2.5 Aprovechamientos con aguas termales

Considerando que, por lo general, se consideran aguas termales a aquellas aguas subterráneas que en su punto de salida poseen una temperatura mayor a 4 o 5°C que la temperatura media anual (según García, 2004 en el área de estudio es de 20.4°C) se pueden identificar cinco aprovechamientos con estas características (figuras 71 y 72), los cuales corresponden a manantiales y pozos profundos. La presencia de aguas termales indica que existen diferentes profundidades de circulación.

Debido a que la mayoría de los aprovechamientos que presentaron estas condiciones de temperatura corresponden a la porción oriente, se infiere que aquí, las profundidades de circulación son mayores que en la porción poniente. El manantial de Moctezuma presenta temperaturas similares al pozo 10 del Picacho, por lo que se corrobora que ambos corresponden al mismo flujo. En la porción poniente, solamente el manantial de Las Cruces presentó termalismo, por lo que se infiere que posiblemente pertenece a otro sistema de flujo fuera de la zona de estudio.

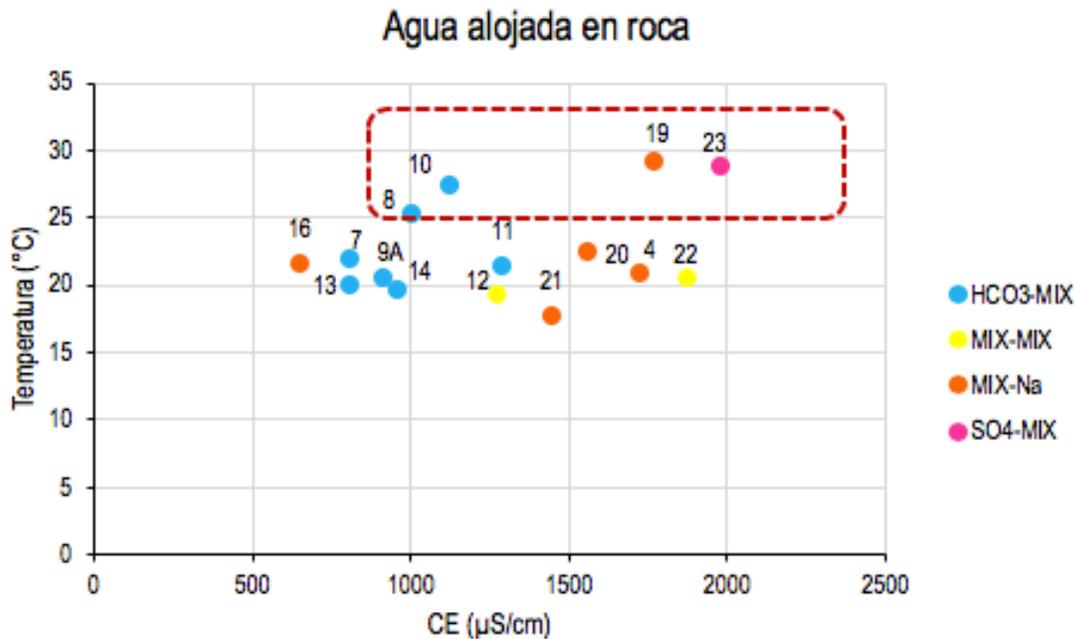


Figura 71. Diagrama de temperatura y conductividad eléctrica de los aprovechamientos alojados en roca de la porción oriente y poniente (aprovechamiento 4).

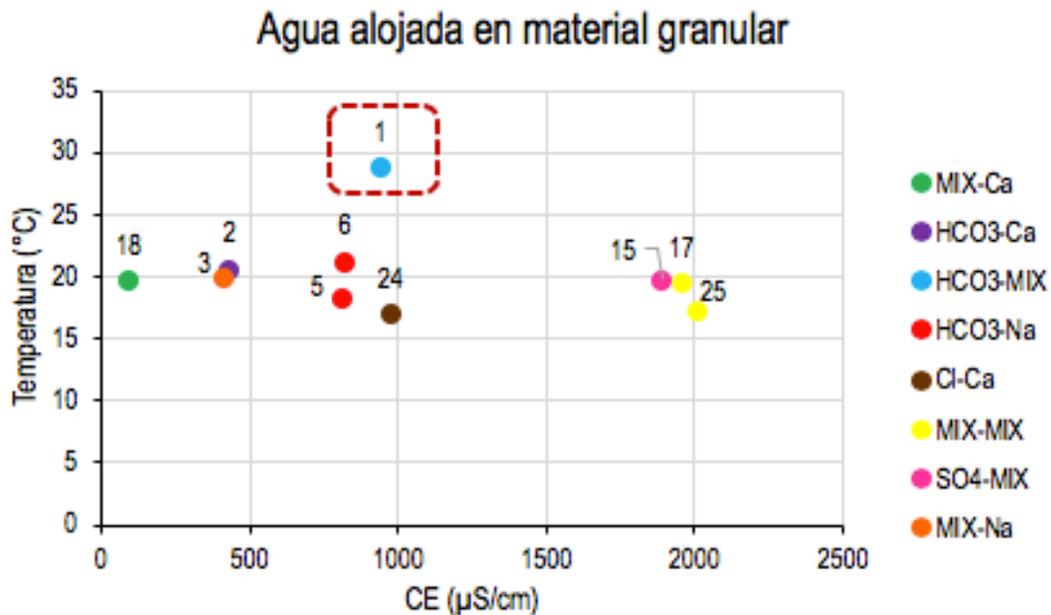


Figura 72. . Diagrama de temperatura y conductividad eléctrica de los aprovechamientos alojados material granular de la porción poniente.

### 8.3 Evaluación de la calidad del agua para uso público-urbano con respecto a la NOM-127-SSA1-1994

Para conocer la calidad del agua se compararon los resultados químicos con respecto a la NOM-127-SSA1-1994, "Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización". En esta se señala que para que el agua sea segura para la población, es necesario no sólo que esté libre de propiedades no deseadas desde el punto de vista estético como olor, sabor y turbidez, sino también que su composición química sea la adecuada y no incluya microorganismos patógenos. De este modo, entre las características incluidas en la NOM se mencionan: biológicas, físicas y organolépticas, químicas y radioactivas. Para este trabajo se consideraron únicamente algunas de las características químicas, analizadas a partir de los resultados obtenidos de laboratorio. Según la NOM-127-SSA1-1994, se denomina agua para uso y consumo humano o agua potable a aquella agua que no tiene contaminantes objetables, ya sean químicos o agentes infecciosos y que no causa efectos nocivos para la salud. En este documento se le considera como de uso público-urbano.

Para determinar la calidad del agua del área de estudio se examinaron las 39 muestras de agua subterránea y superficial (anexo 2). De las 40 características químicas señaladas en la NOM, únicamente se analizaron 18 (tabla 9).

Tabla 9. Parámetros analizados en el proyecto señalados en la NOM-127-SSA1-1994.

Parámetro	Analizado	Parámetro	Analizado
Aluminio	X	Nitratos (como N)	X
Arsénico	X	Nitritos (como )	
Bario	X	pH (potencial de hidrógeno) en unidades de pH	X
Cadmio	X	Plaguicidas en microgramos/l:	
Cianuros (como CN-)		Aldrín y dieldrín (separados o combinados)	
Cloro residual libre		Clordano (total de isómeros)	
Cloruros (como Cl-)	X	DDT (total de isómeros)	
Cobre	X	Gamma-HCH (lindano)	
Cromo total	X	Hexaclorobenceno	
Dureza total (como CaCO3)	X	Heptacloro y epóxido de heptacloro	
Fenoles o compuestos fenólicos		Metoxicloro	
Fierro	X	2,4-D	
Fluoruros (como F-)	X	Plomo	X
Hidrocarburos aromáticos en microgramos/l:		Sodio	X
Benceno		Sólidos disueltos totales	X
Etilbenceno		Sulfatos (como SO4)	
Tolueno		Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)	
Xileno (tres isómeros)		Trihalometanos totales	
Manganeso	X	Yodo residual libre	
Mercurio	X	Zinc	X

De los 18 parámetros analizados, únicamente nueve rebasaron los límites permisibles en aprovechamientos de uso público urbano y doméstico (tabla 10 y figura 73), los cuales fueron elementos mayores: sulfato, cloruro y sodio, elementos menores: fluoruro, elementos traza: mercurio, cadmio, arsénico y parámetros físicos: dureza total, y sólidos disueltos totales. A continuación, se describe cada uno:

Tabla 10. Resultados de aprovechamientos hídricos de uso público-urbano y parámetros físico-químicos.

Parámetros (mg/L)	<sup>a</sup> LMP	Roca			Material granular				
		Pozo 4	Pozo 19	Pozo 23	Noria 5	Noria 6	Pozo 17	Noria 25	
<b>Químicos</b>									
Elem. mayores	Cl	250	269	---	---	---	---	---	414
	F	1.5	---	1.87	---	2.2	2.07	---	---
	Na	200	---	---	---	---	---	---	211
	SO <sub>4</sub>	400	---	---	406.2	---	---	---	400
Elem. traza	As	0.025	---	---	---	0.037	0.0251	---	---
	Cd	0.005	---	---	---	---	---	1.23	---
	Hg	0.001	---	---	---	---	---	0.011	---
<b>Físicos</b>									
	<sup>b</sup> DT	500	---	---	---	---	---	595	605
	<sup>c</sup> SDT	1000	1096	1037	1274	---	---	1679	---

a: Límite máximo permisible, NOM-127- SSA1-1994; b: Dureza total; c: Sólidos disueltos totales.

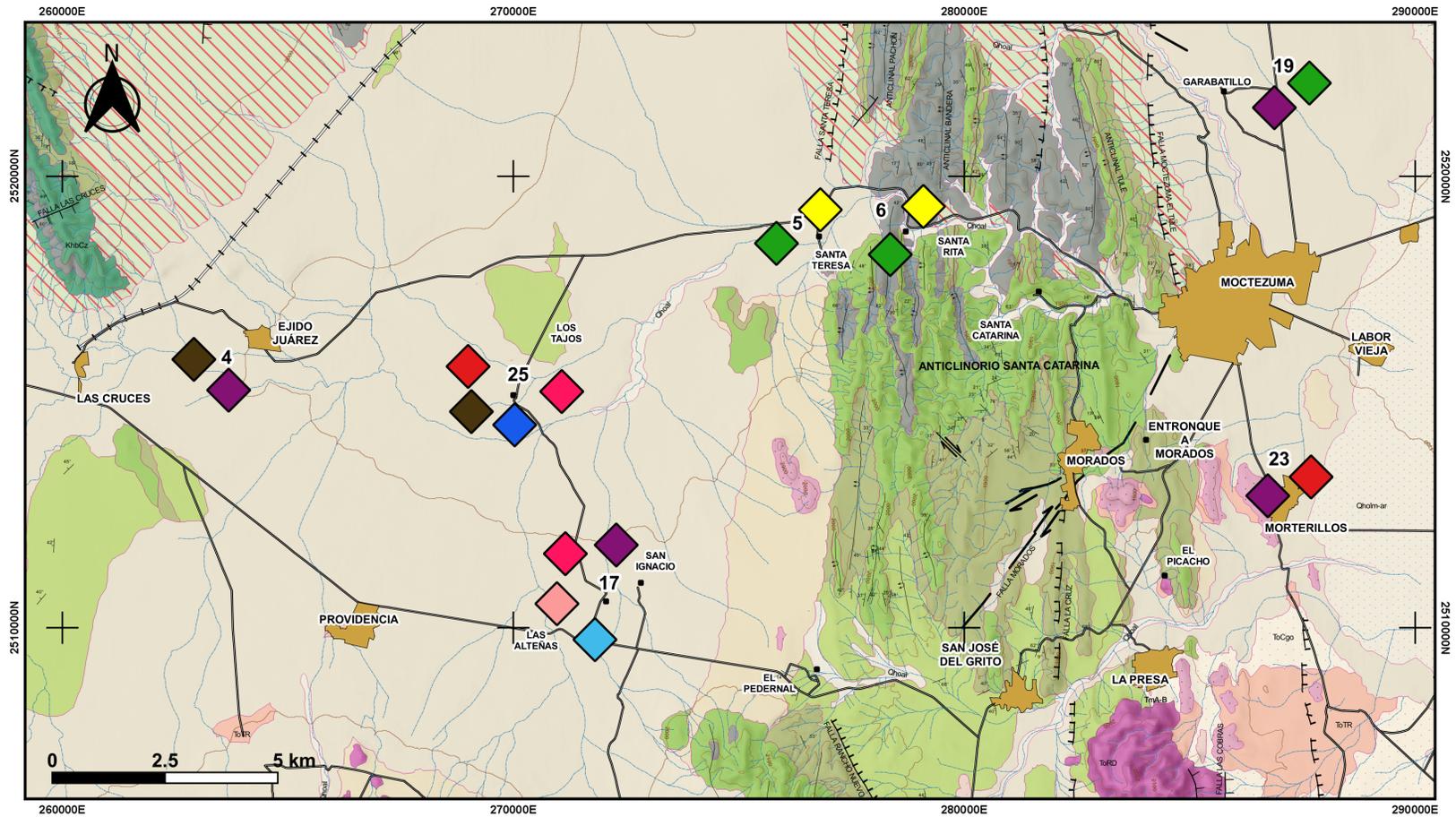


Figura 73. Parámetros físicos y químicos que rebasan la NOM-127-SSA1-1994. Elaboración propia.

SÍMBOLOS TOPOGRÁFICOS		Leyenda	
Corriente de agua	Rumbos y echados	Conglomerado polimíctico (Teo-Cgp)	F
Curvas de nivel 100 m	<b>CUATERNARIO</b>	Conglomerado polimíctico-arenisca (Teo Cgp-ar)	Na
Población	Aluvión (Qhoal)	<b>CRETÁCICO SUPERIOR</b>	SDT
Localidad	Limo-arena (Qholm-ar)	Fm. Caracol (Kse Ar-Lu)	SO4
Carretera	Basalto (Qptb)	Fm. Indidura (KtCz-Lu)	As
Vía férrea	<b>TERCIARIO-NEÓGENO</b>	<b>CRETACICO INFERIOR</b>	Cd
<b>SÍMBOLOS GEOLÓGICOS</b>	Conglomerado polimíctico-arenisca (TpiQpt Cgp-Ar)	Fm. Cuesta del Cura (Kace Cz-Lu)	Hg
<b>ESTRUCTURAL</b>	Andesita-basalto (TmA-B)	Fm. La Peña (Kapa Cz-Lu)	
Falla lateral	<b>TERCIARIO-PALEÓGENO</b>	Fm. Cupido (Khb Cz)	
Falla normal	Ignimbrita (Tolg)	<b>Parámetros que sobrepasan los límites permisibles</b>	
Falla normal inferida	Toba riolítica (ToTR)	Cl	
Falla lateral inferida	Conglomerado oligomíctico (ToCgo)	DT	
Anticlinal	Riodacita (ToRD)		

## Elementos mayores

### Sulfato (SO<sub>4</sub>)

Éste se encuentra en el pozo profundo 23 y la noria 25. El origen puede venir de varias fuentes, como de la oxidación de pirita proveniente la Formación La Peña la cual contiene concreciones de pirita; evidencia de esto son las bajas concentraciones de oxígeno disuelto en el pozo 23; de la contaminación difusa producto de la actividad minera asociada con sulfuros; o para el caso de la noria 25 por el mal manejo de aguas residuales de la localidad Los Tajos.

### Cloruro (Cl)

Se encuentra en el pozo 4 y la noria 25. La concentración de cloruro posiblemente proviene de los procesos de disolución de sales presentes en el suelo y subsuelo originado de las rocas sedimentarias de origen marino.

### Sodio (Na)

El sodio se encuentra ubicado en la noria 25. La presencia de este catión procede de la disolución de rocas sedimentarias de origen marino, debido al intercambio catiónico que ocurre en las calizas arcillosas de la Formación La Peña. Algunos estudios de toxicidad del sodio en las aguas subterráneas y su efecto adverso en la salud humana revelan que la ingestión de sodio en altas concentraciones puede causar hipertensión, falla del corazón, enfermedades renales, cirrosis hepática, toxemias del embarazo, enfermedad de Menier (afección del oído interno que causa vértigo), e hipernatremia (elevado nivel de sodio en la sangre) en los niños (Catalán, 1981).

## Elementos menores

### Fluoruro (F)

El origen probablemente se asocia con la disolución de fluorita principalmente, ya que su presencia ha sido reportada en el denominado "cinturón de fluorita" que corre a través de los estados de Coahuila, Zacatecas, San Luis Potosí Guanajuato y Querétaro (Ortega-guerrero, 2009). El flúor también se encuentra en minerales primarios de rocas ígneas (Edmunds and Smedley, 2005). Price (2003) describe que en San Luis Potosí la fuente del flúor proviene de rocas volcánicas fracturadas; Álvarez y Rivera (2016) reportan altas concentraciones de flúor en la parte centro, norte, noreste y noroeste del país, la cual se asocia con el aporte de rocas ígneas extrusivas de composición ácida, por lo que las rocas del Terciario-Paleógeno (toba riolítica, rioldacita e ignimbrita) que aflora en la parte sur

y centro de la zona de estudio podrían ser otra posible fuente de éste elemento. Según Pekdeger *et al.* (1992) el fluoruro es un contaminante natural que está relacionado con bajas concentraciones de calcio (<40 mg/L) y magnesio, lo que coincide con el promedio de calcio (38 mg/L) y el magnesio (14 mg/L) de las norias 5 y 6.

## **Elementos traza**

En el área de estudio, sobre el anticlinorio Santa Catarina existen obras mineras abandonadas y manifestaciones de mineral in situ en forma de vetas y mantos emplazados en zonas de falla de óxidos de hierro de origen hidrotermal como son la zona mineralizada de Santa Teresa, el prospecto Mojoneras antiguas, Antonio del Rul y Dulces Nombres; los principales minerales metálicos de la zona son principalmente antimonio, cobre, mercurio, oro, plata, plomo y zinc. Las altas concentraciones de elementos traza se relacionan con la actividad minera de la zona, lo que coincide con Stevanovic (2011) que describe que estos se encuentran naturalmente en zonas mineras y las actividades mineras refuerzan su liberación en el ambiente. El mercurio, cadmio y arsénico son de los metales tóxicos más dañinos a la salud humana.

## **Mercurio (Hg)**

Se encuentra en la noria 17 en la porción poniente de la zona de estudio. La fuente puede venir de la erosión de depósitos naturales asociados a toda la zona mineralizada de San Antonio del Rul y escorrentía de vertederos y tierras de cultivo. La exposición, incluso en pequeñas cantidades puede causar graves problemas de salud y es peligroso para el desarrollo intrauterino, puede ser tóxico para los sistemas nervioso e inmunitario, el aparato digestivo, la piel, los pulmones, riñones y ojos (OMS, 2017).

## **Cadmio (Cd)**

El cadmio se encuentra relacionado espacialmente con el mercurio, por lo que su fuente es la misma. Es un contaminante inorgánico de vida infinita, esto quiere decir que siempre permanecerá como cadmio, puede atenuarse por adsorción u otros procesos, pero ningún proceso natural reducirá realmente la masa total del cadmio (Stevanovic, 2011).

## **Arsénico (As)**

Con base en la distribución espacial se observa que el arsénico y el flúor están correlacionados en la zona noroeste del anticlinorio Santa Catarina, lo cual concuerda con Medellín-Milán *et al.* (1993) y Carrillo-rivera *et al.* (2002) que reportan la contaminación natural con flúor, arsénico, cadmio y plomo en aguas subterráneas en las cercanías de la ciudad de San Luis Potosí, las cuales comparten una fuente común.

De acuerdo a los resultados y a la información disponible, la posible fuente del arsénico podría deberse a la presencia de pirita en la Formación Indidura (Barboza-Gudiño *et al.*, 2004) y La Peña (Consejo de Recursos Minerales) ubicadas en la parte norte del anticlinorio Santa Catarina, en las cercanías de la zona mineralizada de Santa Teresa. Otra evidencia se encuentra con lo publicado por el Servicio Geológico Mexicano, en los mapas geoquímicos de Moctezuma F14-A63 (Olvera y González, 2004) y Venado F14-A53 (Flores *et al.*, 2003), en donde identificaron valores de arsénico en sedimento (figura 74). El contenido del arsénico en el agua subterránea puede deberse a la infiltración de las precipitaciones. El arsénico es un metaloide tóxico que causa contaminación geogénica a gran escala de las aguas subterráneas y enfermedades en varias regiones del mundo (Nickson *et al.*, 2000). La contaminación natural ocurre en cuencas continentales áridas a semiáridas y en la reducción de los acuíferos aluviales, es decir, en áreas planas y bajas, donde el agua subterránea es lenta y a menudo explotada por pozos de bombeo profundos (Smedley y Gkinniburgh, 2002). Otra fuente de arsénico son las zonas mineras.

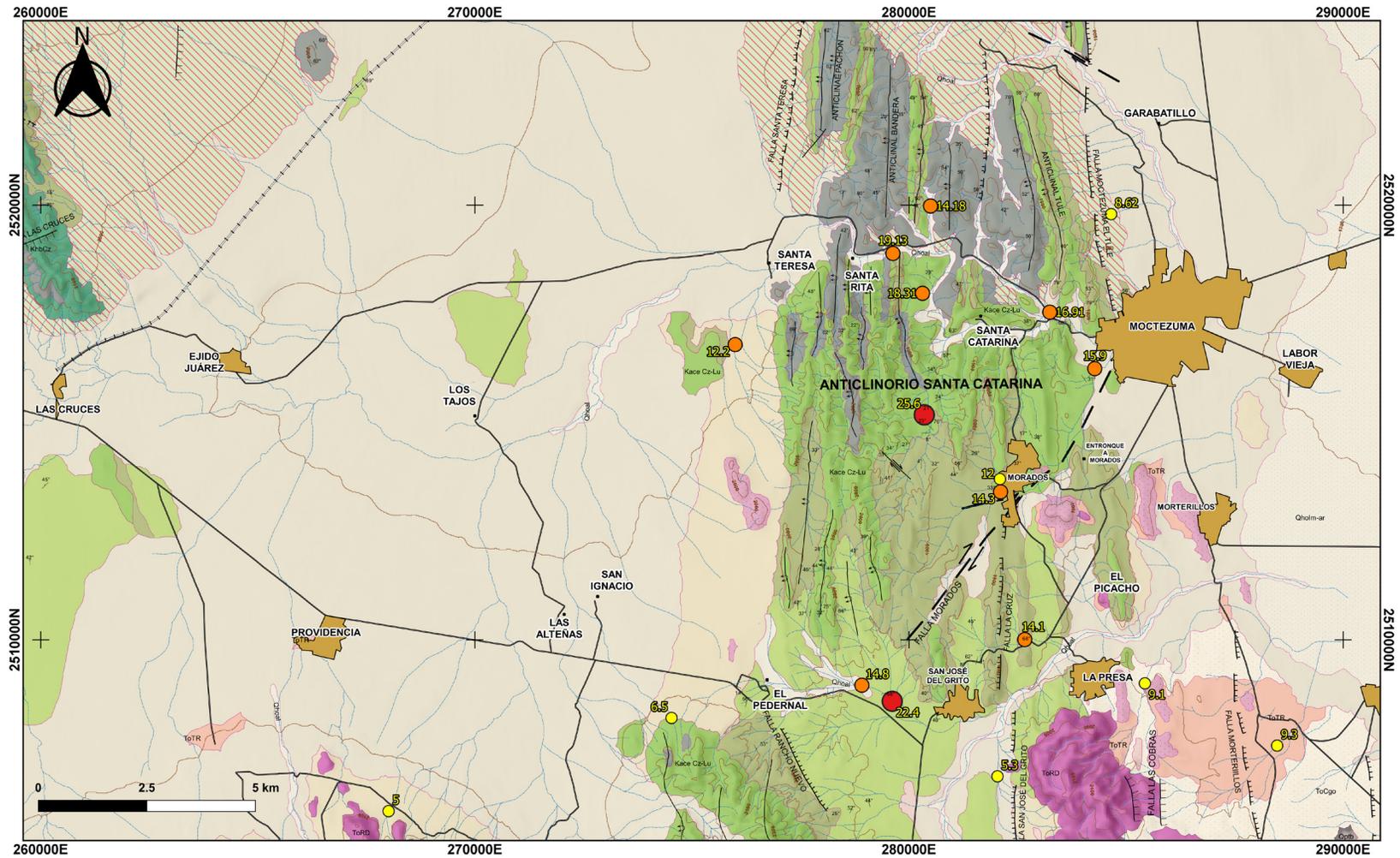


Figura 74. Concentraciones de arsénico en sedimento en ppm. Tomado y modificado de las cartas geoquímicas del SGM (Flores et al., 2003; Olvera y González, 2004).

<b>Leyenda</b>			
<b>SÍMBOLOS TOPOGRÁFICOS</b>	Pozo	Rumbos y echados	Riodacita (ToRD)
Corriente de agua	<b>ARSÉNICO (contenido en ppm)</b>	<b>CUATERNARIO</b>	Conglomerado polimíctico (Teo-Cgp)
Curvas de nivel 100 m	0-15	Aluvión (Qhoal)	Conglomerado polimíctico-arenisca (Teo Cgp-ar)
Población	16-25	Limo-arena (Qholm-ar)	<b>CRETÁCICO SUPERIOR</b>
Localidad	26-35	Basalto (Qptb)	Fm. Caracol (Kse Ar-Lu)
Carretera	<b>SÍMBOLOS GEOLÓGICOS</b>	<b>TERCIARIO-NEÓGENO</b>	Fm. Indidura (KtCz-Lu)
Vía férrea	<b>ESTRUCTURAL</b>	Conglomerado polimíctico-arenisca (TplQpt Cgp-Ar)	<b>CRETACICO INFERIOR</b>
<b>TIPOS DE APROVECHAMIENTO</b>	Falla lateral	Andesita-basalto (TmA-B)	Fm. Cuesta del Cura (Kace Cz-Lu)
Bordo	Falla normal	<b>TERCIARIO-PALEÓGENO</b>	Fm. La Peña (Kapa Cz-Lu)
Manantial	Falla normal inferida	Ignimbrita (Tolg)	Fm. Cupido (Khb Cz)
Noria	Falla lateral inferida	Toba riolítica (ToTR)	
	Anticlinal	Conglomerado oligomíctico (ToCgo)	

## Parámetros físicos

### Dureza total (DT)

La dureza total es evidencia de altas concentraciones de calcio y magnesio como ( $\text{CaCO}_3$ ). Con base en la clasificación de Dufor y Becker (1964) la noria 17 es considerada como muy dura ( $>180$  mg/L) y la noria 25 como dura (121-180 mg/L). Su origen puede provenir de la disolución de las calizas. Dentro de los problemas que pueden ocurrir por utilizar aguas muy duras se encuentran la mala cocción de los alimentos, la generación de sarro e incrustaciones en utensilios de cocina, la poca disolución del jabón y la predisposición a los pobladores de padecer ciertas enfermedades (Sánchez et al., 2016) como enfermedades cardiovasculares (National Academy of Sciences, 1979).

### Sólidos disueltos totales (SDT)

Las altas concentraciones se encuentran en los pozos profundos 19, 23 y 4 en agua alojada en roca y en la noria 17. Los SDT son evidencia de agua con mayor distancia de recorrido, lo cual coincide con las familias de agua.

## 8.4 Análisis de la cobertura vegetal en las zonas de recarga del manantial

### 8.4.1 Determinación de la zona de recarga

Para identificar la zona de recarga sin realizar análisis isotópicos es necesario tomar en cuenta distintos elementos del ambiente como es la geomorfología, topografía, suelo y vegetación.

Debido a que la composición hidrogeoquímica del manantial es bicarbonatada, se infirió que se corresponde con un tipo de flujo local (de poca distancia de recorrido); tomando en cuenta también que la dirección de flujo general es de oeste a este, se consideró que las sierras al oeste del manantial (anticlinorio Santa Catarina) funcionaban como zona potencial de recarga. Posteriormente se analizaron los indicadores para definir la zona de recarga, los cuales son (Tóth, 2009):

- a) Hidrogeoquímica: aguas bicarbonatadas (inicios de la evolución geoquímica).
- b) Topografía: el área de recarga debe estar en una elevación topográficamente más alta que el área de descarga (figura 75).
- c) Geología: para que en el área de recarga haya una buena infiltración, ésta se debe conformar por material poroso (material granular) o material fracturado (figura 76).

d) Tipo de suelo y vegetación: el suelo debe estar poco desarrollado y con poca cantidad de materia orgánica (tipo litosol o leptosol), cubierto con vegetación xerófila, la cual está relacionada con este tipo de suelo (figura 77).

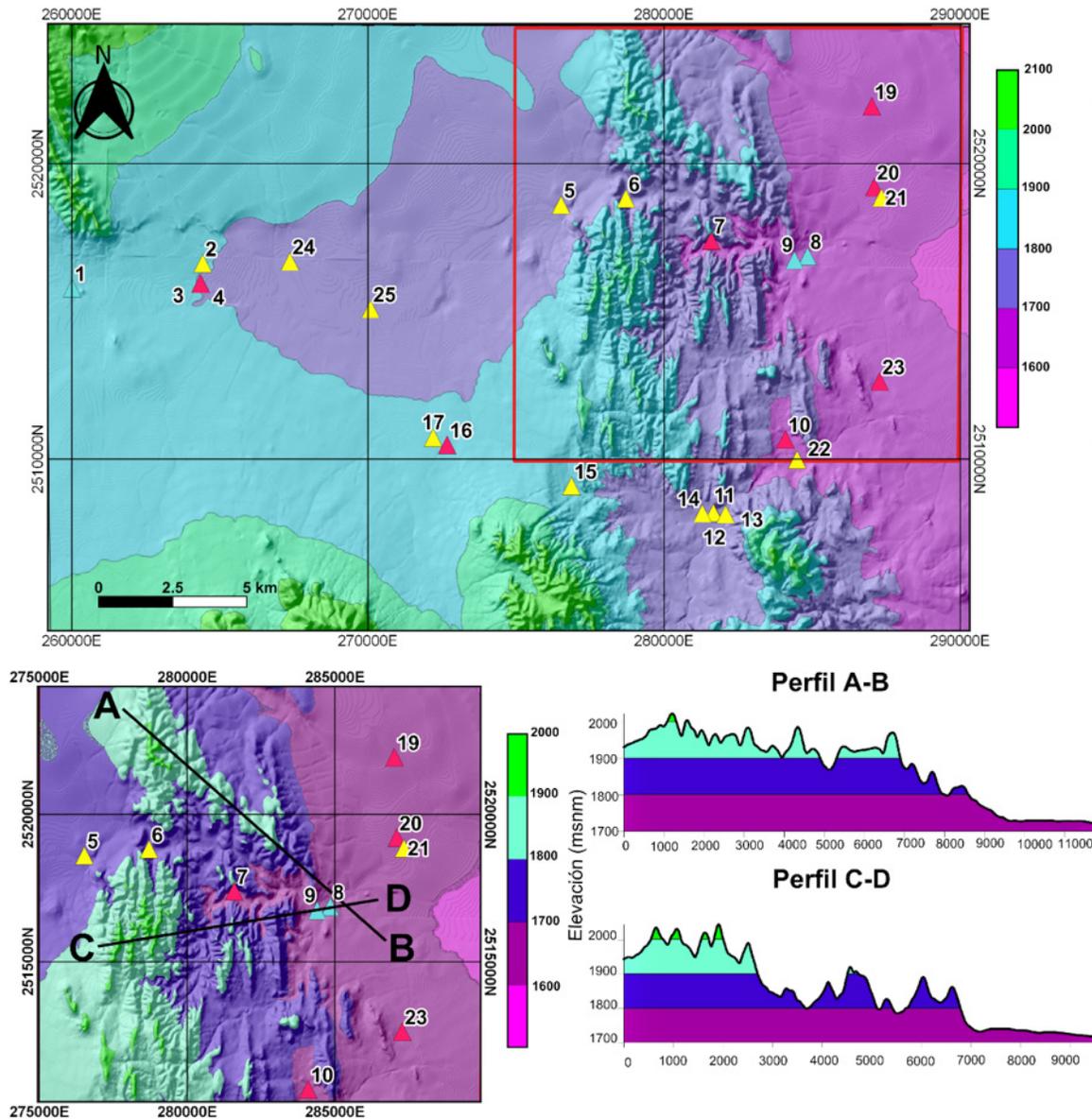
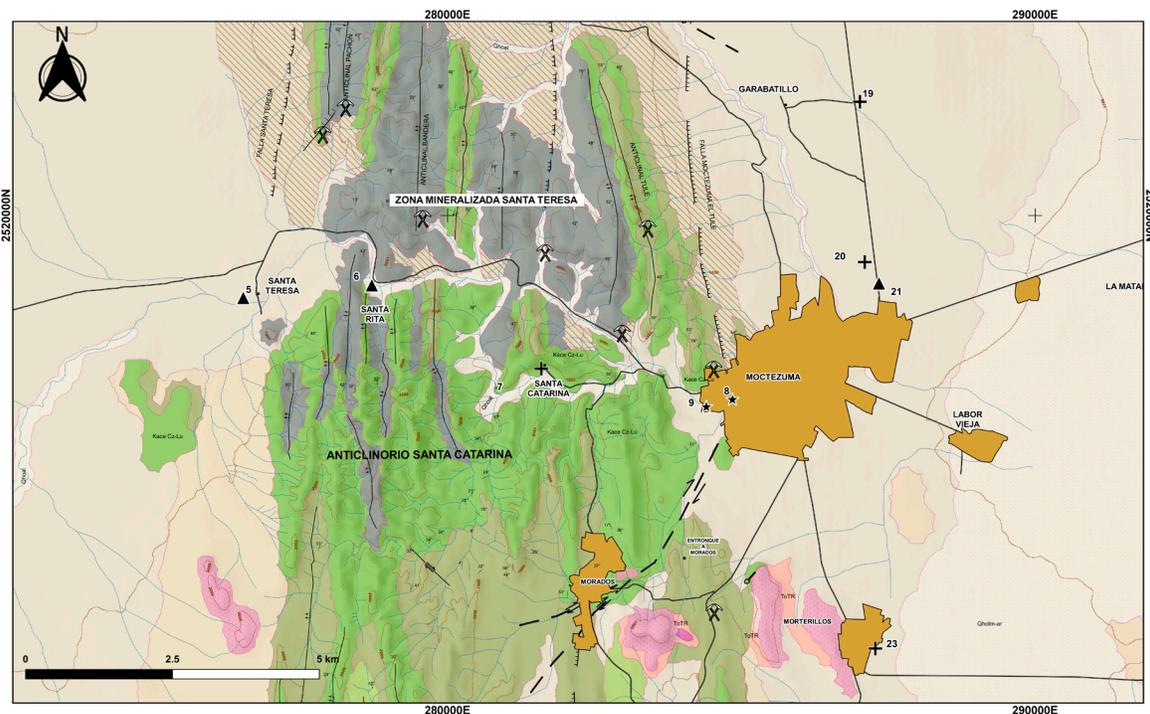


Figura 75. Perfil de elevación del anticlinorio Santa Catarina hasta el manantial.



Leyenda			
<b>SÍMBOLOS TOPOGRÁFICOS</b>	<b>SÍMBOLOS MINEROS</b>	<b>CUATERNARIO</b>	<b>CRETÁCICO SUPERIOR</b>
Corriente de agua	+	Aluvión (Qhoal)	Fm. Caracol (Kse Ar-Lu)
1000 Curvas de nivel 100 m	Mina abandonada	Limo-arena (Qholm-ar)	Fm. Indidura (KICz-Lu)
Población	Banco de material en producción	Basalto (Qptb)	<b>CRETÁCICO INFERIOR</b>
Localidad	<b>SÍMBOLOS GEOLÓGICOS</b>	<b>TERCIARIO-NEÓGENO</b>	Fm. Cuesta del Cura (Kace Cz-Lu)
Carretera	<b>ESTRUCTURAL</b>	Conglomerado polimítico-arenisca (TpIQpt Cgp-Ar)	Fm. La Peña (Kapa Cz-Lu)
Vía férrea	Falla lateral	Andesita-basalto (TmA-B)	Fm. Cupido (Khb Cz)
<b>TIPOS DE APROVECHAMIENTO</b>	Falla normal	<b>TERCIARIO-PALEÓGENO</b>	
Bordo	Falla normal inferida	Ignimbrita (Tolg)	
Manantial	Falla lateral inferida	Toba riolítica (ToTR)	
Noria	Anticlinal	Conglomerado oligomítico (ToCgo)	
			Rumbos y echados
			Riodacita (ToRD)
			Conglomerado polimítico (Teo-Cgp)
			Conglomerado polimítico-arenisca (Teo Cgp-ar)

Figura 76. Geología y estructuras geológicas del área de recarga potencial del manantial.

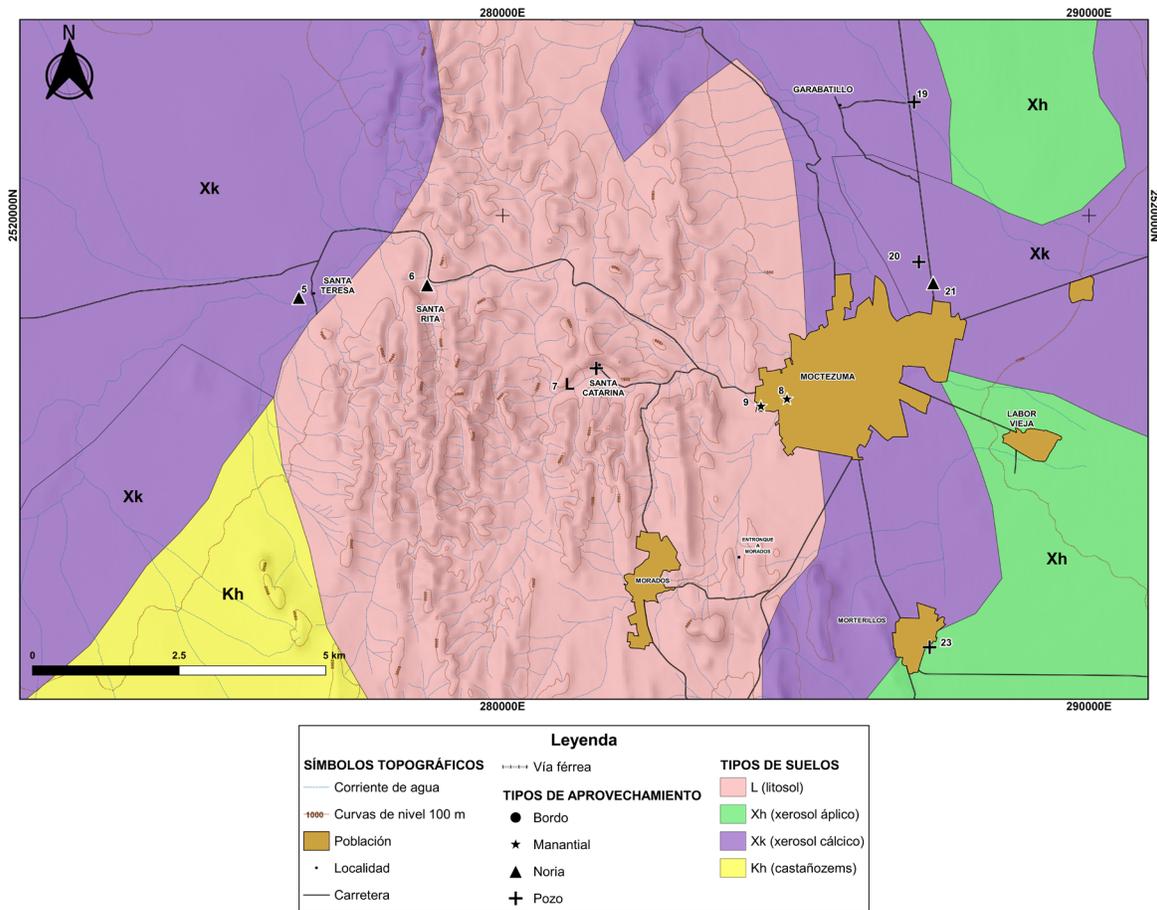


Figura 77. Tipo de suelo en el área de recarga potencial del manantial.

### 8.4.2 Cobertura superficial del suelo

Para cumplir con el objetivo específico número tres, se obtuvo el porcentaje de cobertura superficial del suelo en el área de recarga potencial identificada. Para su estimación se realizó una regresión con el porcentaje de cobertura superficial obtenido en campo y el NDVI de la imagen de satélite. El mejor ajuste se logró transformando los datos de NDVI y cobertura superficial “verde” (excluyendo suelo desnudo, roca y afloramientos de roca) transformados a su raíz cuadrada, dando como resultado un modelo polinomial lineal (figura 78) el cual fue significativo ( $P < 0.05$ ) y explicó el 47% de la variabilidad de la cobertura. El modelo tuvo la forma:  $4.8419 + 311.5787 * \text{NDVI}$  y fue aplicado para obtener la distribución espacial de la cobertura superficial.

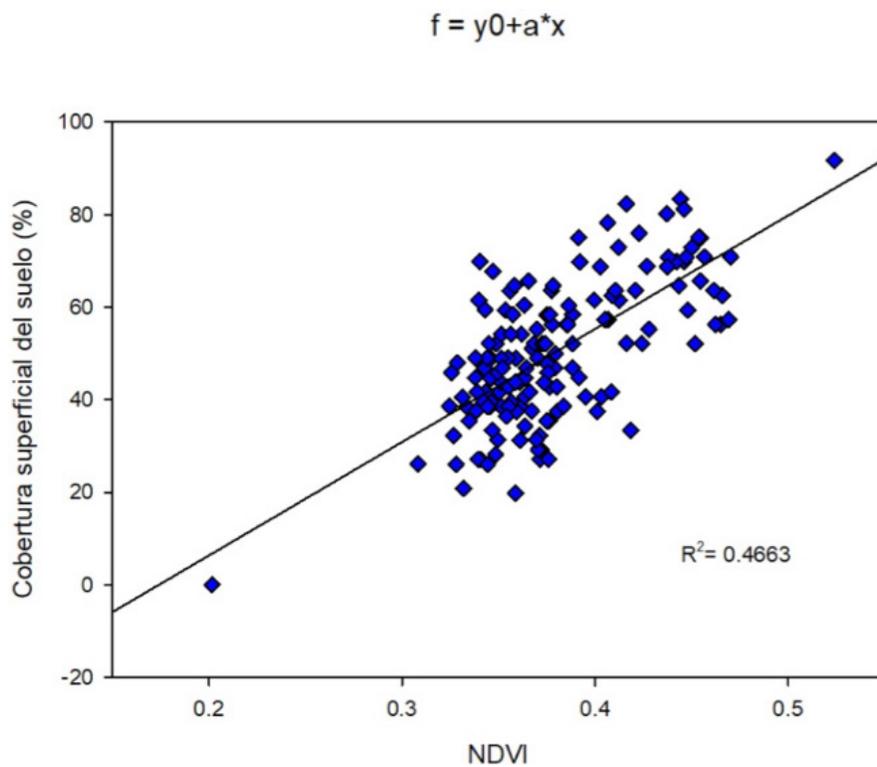


Figura 78. Modelo polinomial lineal del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) en relación con la cobertura del área de recarga del manantial “Ojo de Agua” de Moctezuma, SLP.

En el mapa de cobertura superficial se realizó un buffer de 1 km alrededor de las parcelas y un multibuffer con cinco anillos (de 1 km cada uno) alrededor de las localidades de Moctezuma y Morados. Ambos buffers fueron traslapados para formar un solo polígono, en donde cada banda indicó el porcentaje de la cobertura superficial.

Como se observa en la figura 79, el rango de cobertura vegetal va de 47.2 % a 54.4 %. El porcentaje de cobertura vegetal más alto corresponde al anillo que está inmediatamente al lado oeste de la localidad de Moctezuma, esto debido a la presencia de la vegetación alrededor del manantial "Ojo de Agua". En el anillo ubicado alrededor de la localidad de Morados el porcentaje correspondió al 49.9%, lo cual está asociado principalmente con el pastoreo de la población. El anillo que se encuentra después de las localidades en los cerros de La Fundición, La Bola, de en Medio y San Rafael muestra un 51.1 % de cobertura. Este porcentaje de cobertura puede explicarse por el hecho de que ha sido un lugar del que históricamente se ha extraído lechuguilla, que practicaban las familias de Moctezuma y Santa Catarina años atrás según lo reportado por las personas entrevistadas. Para el siguiente anillo de 52.8 % se deduce el aumento en el porcentaje de cobertura vegetal está relacionado con la lejanía de la población de Moctezuma, lo cual refleja menos perturbación antropogénica. Finalmente, el valor más bajo de 47.2 % se infirió que es a causa de dos obras principalmente: la primera es una mina de mármol abandonada, en la cual cuando se aprovechó, se deforestó la mayor parte del área y así permanece aún. Y la segunda por el potrero que separa al poblado de Santa Catarina con el de Santa Rita; este se convierte en una barrera física que impide el paso natural de partículas, fauna y posiblemente también desvía las corrientes de agua.

Independientemente del porcentaje de cobertura, en todos los puntos muestreados pudo observarse presencia de pastoreo siendo el ganado caprino el predominante, seguido por el equino, el cual puede influir de manera considerable en la vegetación.

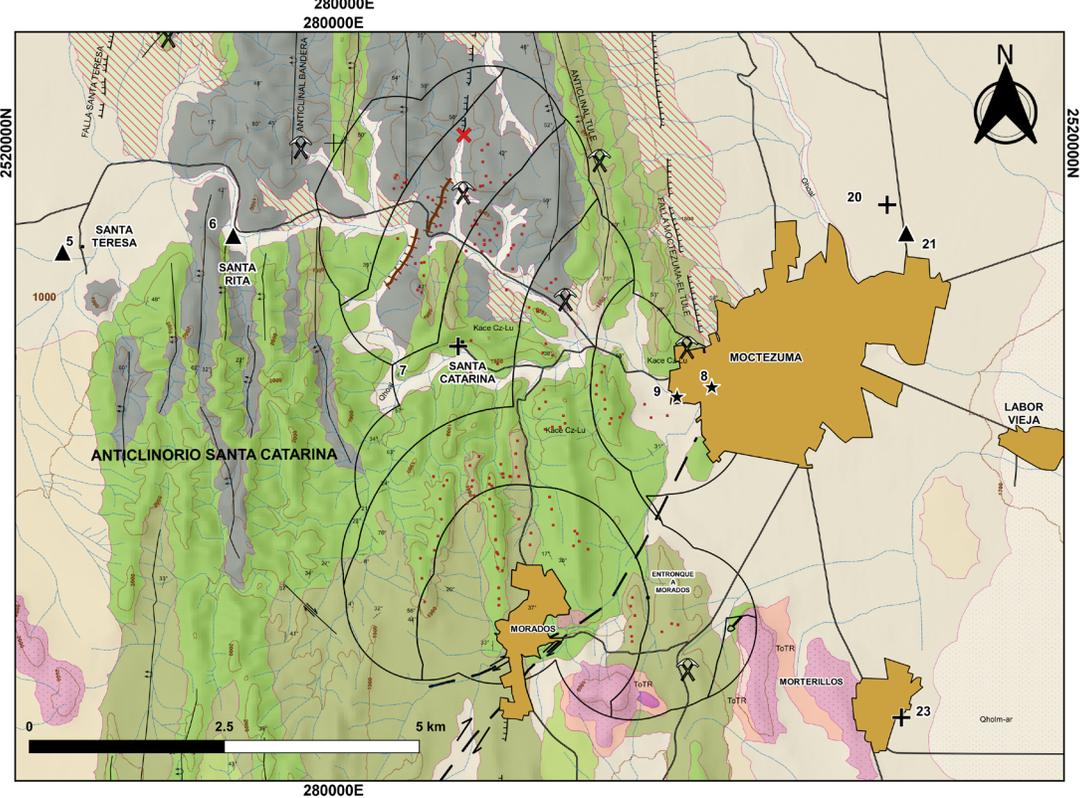
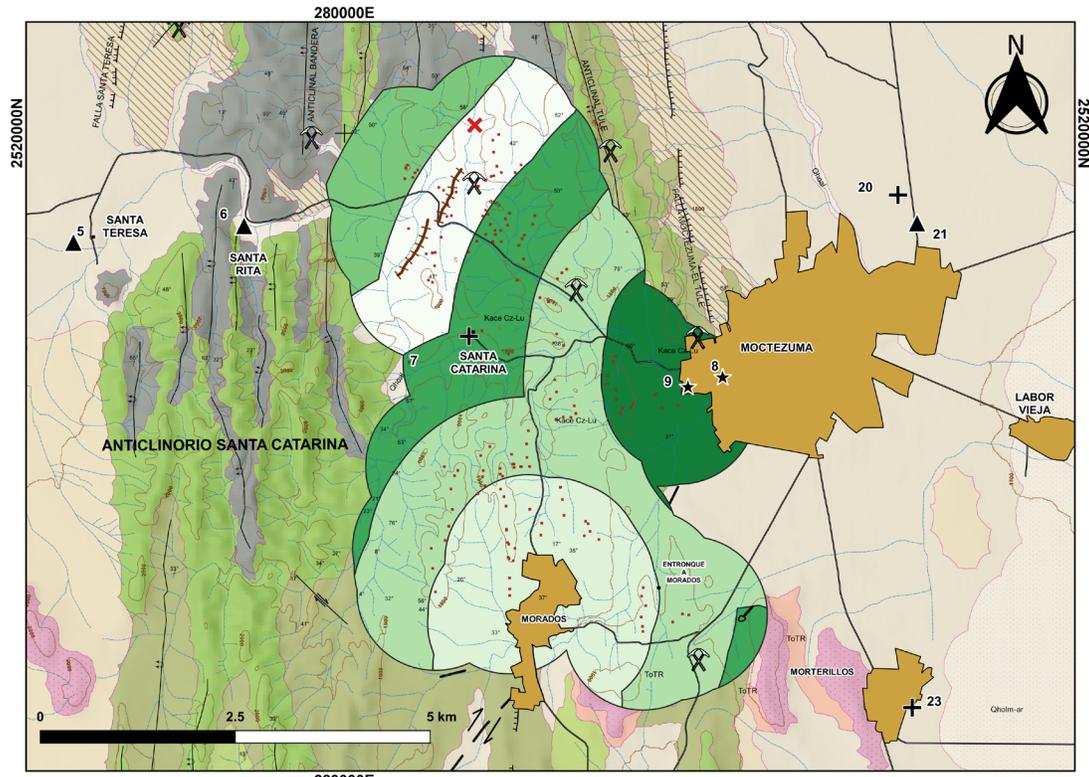


Figura 79. Mapa de porcentaje de cobertura vegetal de la zona de recarga potencial de agua subterránea.



La figura 80 muestra los porcentajes de los elementos identificados en campo para la cobertura superficial del suelo. Se considera que para las condiciones del sitio (laderas calizas, en sitios con una precipitación menor a 300 mm), el matorral desértico rosetófilo es la cobertura de mejor calidad (Rzedowski, 1965). En campo se determinaron tres tipos de calidad con respecto a los elementos observados: baja, media, alta (tabla 11).

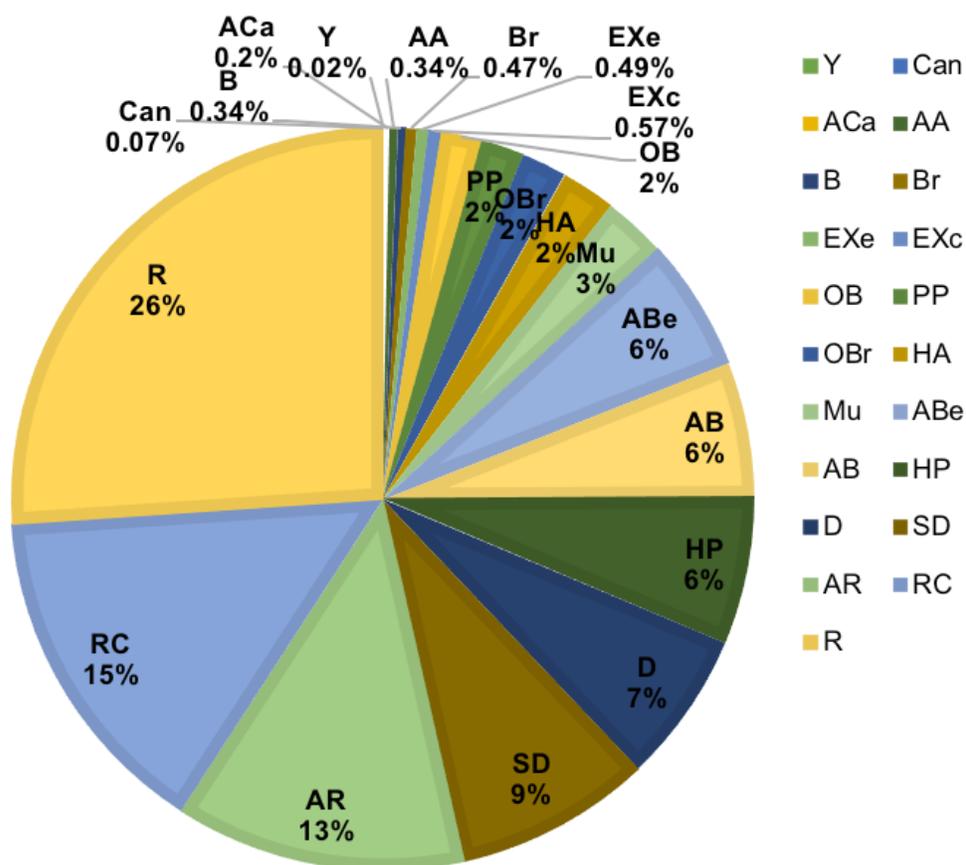


Figura 80. Porcentaje de cobertura superficial.

Tabla 11. Tipo de calidad de la cobertura superficial.

Calidad de la cobertura superficial		
Baja	Media	Alta
EXc: excremento de cabra	AA: arbusto alto	AR: arbusto rosetófilo
EXe: excremento de equino	AB: arbusto bajo	B: biznaga
D: detritus	ABe: arbusto bajo espinoso	Br: biznaga rasante
SD: suelo desnudo	ACa: arbusto crasicaule alto	Can: candelilla
Mu: musgo	HA: herbácea anual	OBr: opuntia baja rastrera
R: roca	OB: opuntia baja	HP: herbácea perenne
RC: Afloramiento rocoso	PP: pasto perenne	
SD: suelo desnudo	Y: yuca	

## 8.5 Análisis de series de tiempo de fenómenos meteorológicos

La prueba no-paramétrica de Mann Kendall para conocer la tendencia histórica de la precipitación y temperatura dio como resultado un modelo lineal significativo ( $P=0.05$ ) para cada uno de los fenómenos, con los cuales se demostró que no existe tendencia anual, ni mensual (anexo digital).

De acuerdo con la ecuación de la gráfica de precipitación anual (figura 81) la tasa de cambio para el periodo de 1970-2016 es  $<1$  mm/año, y es representada por la pendiente de la ecuación de la recta ( $y$ ).

Para el caso de la temperatura, la tasa de cambio para el periodo de 1969 a 2018 la tasa de cambio es de  $0.20^{\circ}\text{C}$  (figura 82).

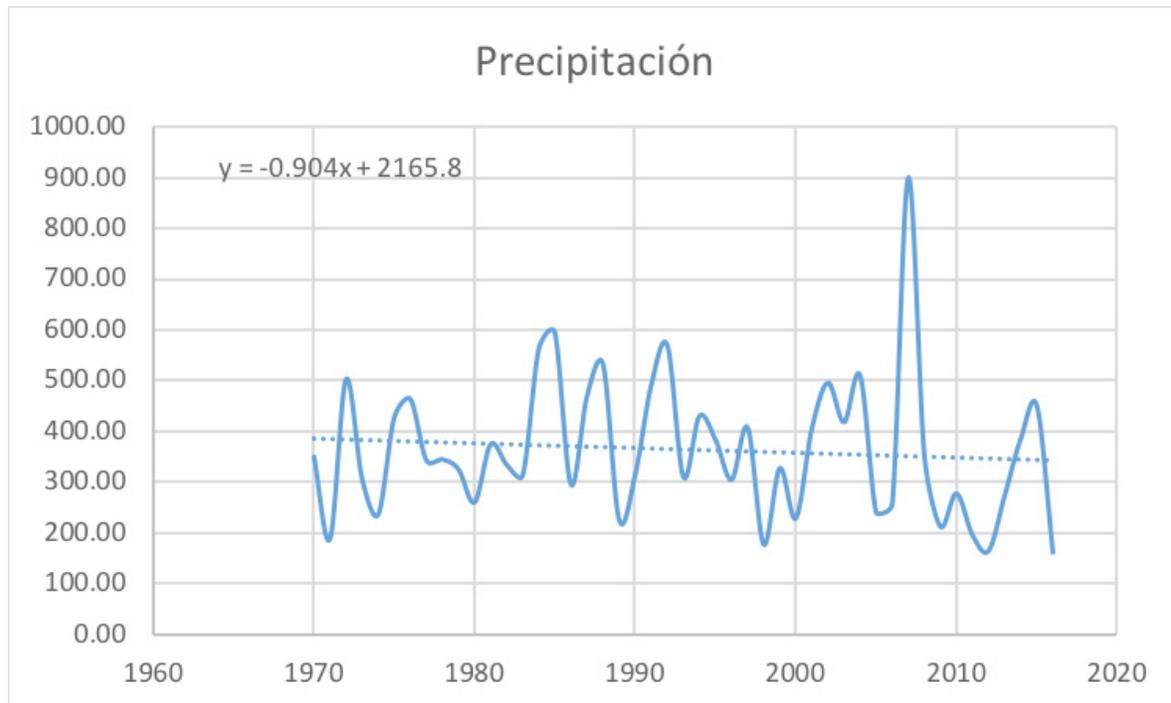


Figura 81. Tendencia de precipitación de la estación Moctezuma 24044, para el periodo de 1970-2016.

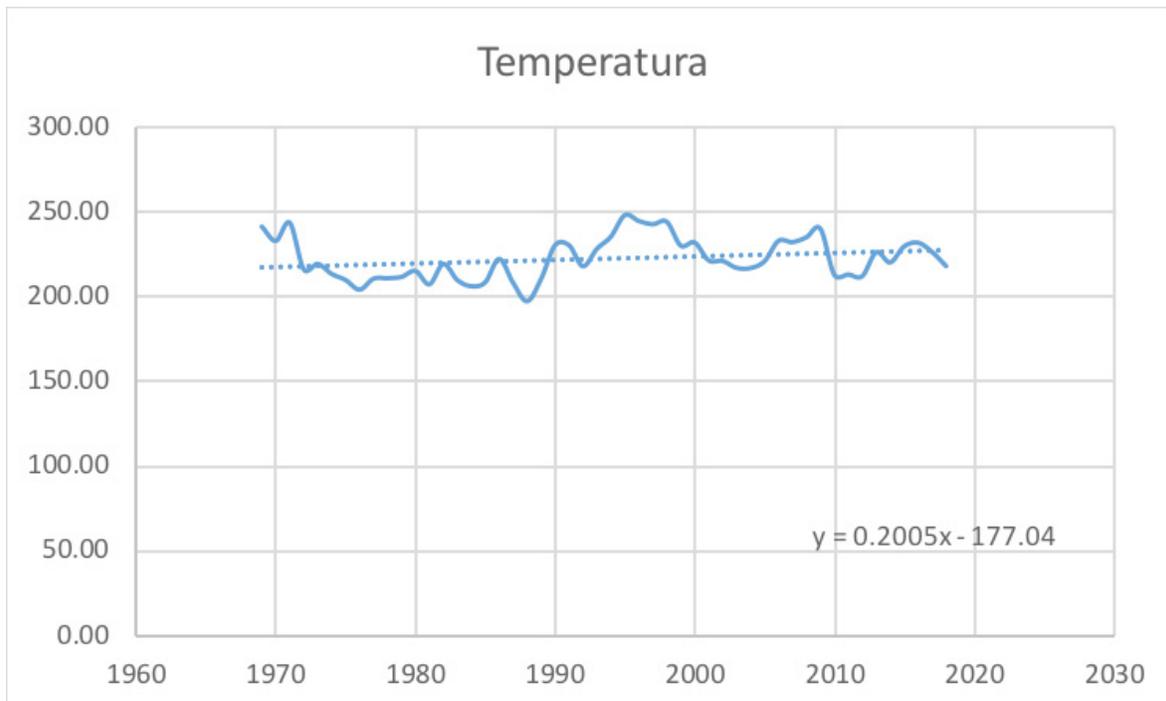


Figura 82. Tendencia de temperatura de la estación Moctezuma 24044, para el periodo de 1969-2018.

## 8.6 Identificación del nivel de interés y participación de la población de Moctezuma en relación con el tema de protección y conservación del manantial

Se aplicó un total de 61 entrevistas entre público en general (55 personas) y autoridades municipales (6 personas). El mínimo de edad de los entrevistados fue de 16 años, el máximo de 80 y el promedio de 42. Dentro de las actividades que realizan los entrevistados de público en general se encuentran el comercio (dueños o empleados de restaurantes, boutiques, farmacias y abarrotes), agricultura y actividades del hogar (amas de casa).

Según las respuestas de los participantes (público en general y autoridades municipales), desde aproximadamente el 2002 la cabecera de Moctezuma se ha abastecido de agua de pozos de otras comunidades como Garabatillo y El Picacho debido a que el manantial ya no se daba abasto. La percepción de la población con respecto a cuándo el manantial empezó a secarse es muy variada, sin embargo, la mayoría coincide que el problema tiene aproximadamente una década. Prácticamente todos los entrevistados reconocieron la importancia del manantial no sólo por haber sido la fuente principal de abastecimiento de agua, sino también por la importancia económica que éste representa por ser su

único atractivo turístico. Las personas que no consideraron que el manantial fuera de importancia, no eran pertenecientes a Moctezuma.

Durante las entrevistas se pudo identificar que el manantial ha sufrido cambios en el paisaje como disminución en la flora, fauna, lluvias y cosechas, incremento de basura y aumento en la temperatura, siendo la disminución de la vegetación la más notoria, especialmente por las personas de tercera edad, quienes han sido testigos vivientes del cambio transicional del manantial; algunos incluso mencionaron que cuando eran niños visitaban muy seguido el balneario y que había hasta árboles frutales. De las personas que contestaron que no ha habido un cambio en el ambiente se puede identificar que quienes mencionan esto son personas de la tercera edad o jóvenes menores de 20.

Dentro de los posibles factores por los cuales los ciudadanos creen que el manantial pudo haberse “secado” se encuentran:

- 1) Cambio climático y falta de lluvias y árboles (algunos mencionaron que los árboles “llaman la lluvia”) (33 %)
- 2) Se desconoce (29 %)
- 3) Mal manejo y falta de mantenimiento del manantial, falta de interés del municipio (15 %)
- 4) Falta de educación de la población (desperdicio y robo de agua, contaminación y deforestación (11 %)
- 5) Sobre población, sobre explotación de acuíferos (8 %)
- 6) Por la operación del pozo del Picacho (1 %)
- 7) Por la construcción de las albercas (1 %)
- 8) Contaminación de los cerros por la “mina de los chinos” (1 %)

La mayoría de los participantes mencionan que se han visto afectados por la disminución del agua, principalmente en dos aspectos: higiene y economía. El primero fue mencionado principalmente por mujeres amas de casa, esto es debido a que ellas son quienes realizan las actividades del hogar y padecen más la falta de agua, a diferencia de los hombres que se la pasan trabajando fuera; el segundo fue mencionado principalmente por comerciantes, ya que recientes más que nadie la ausencia de turistas al balneario y finalmente, por la gente que tenía cosechas y animales ya que se les han secado y han tenido que vender a sus animales porque no pueden mantenerlos.

A pesar de que la disminución del manantial ha afectado de maneras diversas a la población, la mayoría de los participantes (93 %) no han presentado quejas a las autoridades por motivos diferentes, algunos de ellos son: 1) piensan que la misma gente

tiene la culpa por no pagarla, 2) no tienen confianza y temen que haya represalias de parte del gobierno, 3) por desidia 4) creen que no tiene caso ya que las autoridades nunca hacen caso y no les toman importancia 5) por falta de tiempo, 6) porque tienen aljibe y no les afecta, 7) porque les pusieron drenaje u 8) porque la gente es muy apática y no hay unión. Por otro lado, la mayoría de las autoridades entrevistadas contestaron que sí han recibido quejas por parte de la población.

En general, tanto ciudadanos como autoridades municipales mencionaron que no ha habido conflictos entre la población de Moctezuma ni con otras comunidades, únicamente se menciona que la gente se ha manifestado para reclamarle al presidente municipal. Sin embargo, las autoridades no informaron sobre los resultados de las propuestas mencionadas por los ciudadanos.

El dato que más resalta de la entrevista en cuestión, es sobre las acciones que el gobierno municipal ha realizado para solucionar el problema de reducción del caudal del manantial, debido a que la mayoría de los ciudadanos contestaron que el gobierno no ha hecho nada o que no saben si han hecho algo y la mayoría de las autoridades afirman que sí han realizado acciones (figura 83 y 84):

### Ciudadanos

¿sabe si el gobierno ha realizado alguna acción para combatir el problema de la sequía del manantial?

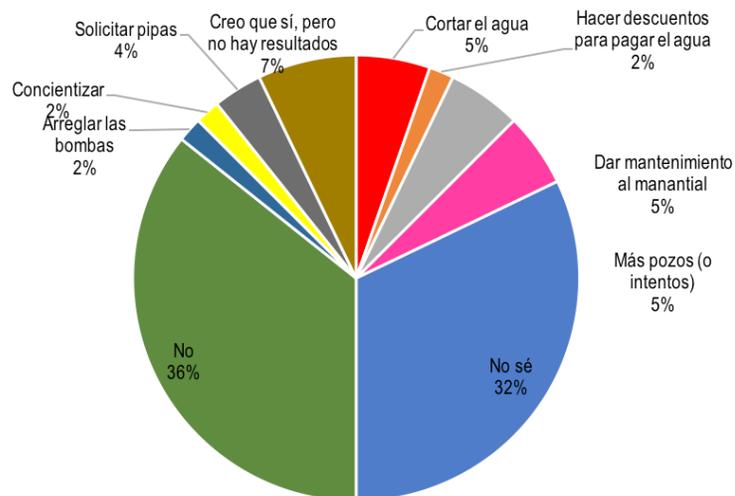


Figura 83. Respuestas de los ciudadanos (n= 55) a la pregunta: ¿sabe si el gobierno ha realizado alguna acción para combatir el problema de la sequía del manantial?

Autoridades  
¿qué acciones han realizado para combatir el problema de la sequía del manantial?

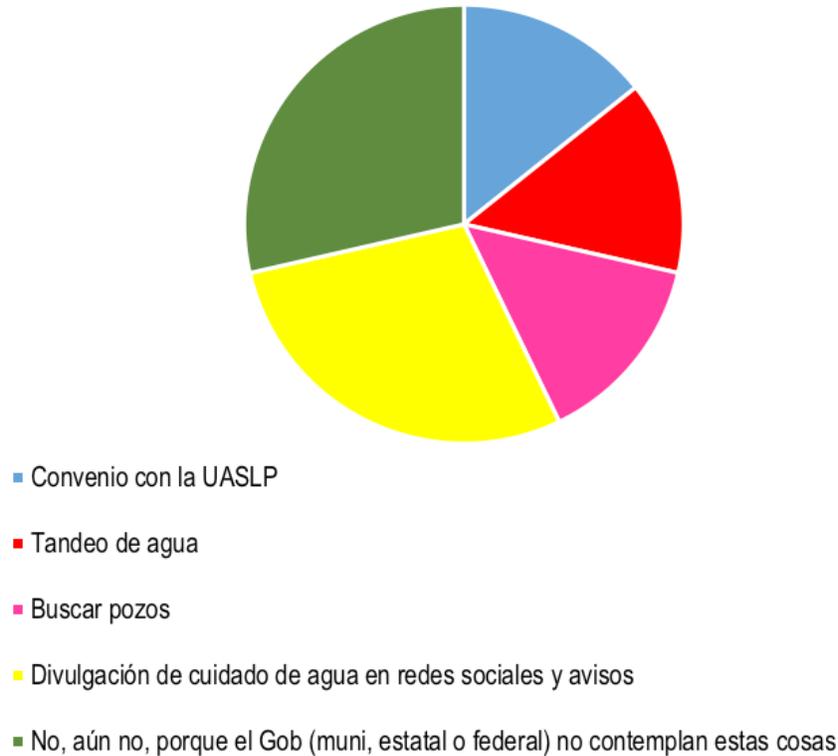


Figura 84. Respuestas de las autoridades (n=6) a la pregunta: ¿qué acciones han realizado para combatir el problema de la sequía del manantial?

Uno de los objetivos principales de la aplicación de entrevistas fue conocer el interés de la población de involucrarse en acciones que ayuden a resolver o mitigar el problema. La mayoría de los participantes contestó de manera positiva pero no tenían idea de qué podían hacer. Entre las respuestas que dieron se encuentran las siguientes:

- 1) No definido (no sé, la veo muy difícil)
- 2) Informar, concientizar, investigar sobre el cuidado del agua
- 3) Buscar nuevos sitios para hacer pozos o presas
- 4) Acciones del gobierno útiles (limpia, reforestar o realizar algún estudio en el manantial)
- 5) Buscar recursos económicos o que el gobierno invierta
- 6) Sanciones (para la gente que no paga el servicio del agua o contamine el manantial)

7) Acciones no útiles (que la gente no se peleó por el agua porque el agua es “celosa”) Posteriormente, se preguntó de manera específica si estarían dispuestos a participar en algún proyecto o actividad si se les facilitaran las herramientas o si existiera algún proyecto a implementar. La gran mayoría contestó que sí, quienes mencionan que tal vez o que no, especificaron que es por falta de tiempo, falta de preparación (educación), por la edad (tercera edad), también mencionaron que no lo harían porque la gente no es unida y costaría trabajo hacer que todos participaran, por conflicto de intereses (porque el presidente es de otro partido) o simplemente porque consideran que mientras no llueva no hay nada que hacer.

En el caso de las autoridades, todos comentaron que sí estarían dispuestos a participar o realizar alguna actividad para solucionar la problemática tanto personalmente y como voz de sus departamentos de los cuales están a cargo.

Para saber quiénes eran los más interesados, según lo que la gente percibía, se les preguntó a los participantes quiénes creían ello que estarían más dispuestos a participar o llevar a cabo en alguna actividad o proyecto, los resultados fueron los siguientes:

Jóvenes (24 %) porque ellos tienen más energía y están más involucrado en este tipo de temas, los adultos y adultos mayores (22 %) porque dicen que a los jóvenes ya no les gusta trabajar y sólo les interesa la tecnología, las mujeres amas de casa (20 %) porque ellas batallan más por el agua por ser amas de casa y porque los hombres trabajan o simplemente no les interesa, otros contestaron que todos participarían (15 %) porque es un problema compete a toda la población y en menor proporción contestaron que la gente afectada (7 %), no sabían (4 %), nadie (2 %), las autoridades (2 %), maestros (2 %) y personas con experiencia (2 %). Los porcentajes indican que la mayoría cree que es el otro el que se debe encargar del problema, cada uno argumenta sobre la capacidad del otro, pero es notorio que no se ha dado un “nosotros”.

Según las autoridades, en general piensan que los primeros que estarían dispuestos en participar en alguna actividad son los jóvenes ya que son más conscientes, las autoridades de las comunidades, el sector educativo ya que los estudiantes han vivido las carencias en las escuelas y también consideran que todos estarían dispuestos si se les explica de que se trata, ya que es un problema que afecta a toda la población.

Por último, se les pregunto a los ciudadanos cuáles creían ellos que serían los posibles obstáculos en la implementación de algún proyecto o actividad para mejorar la situación del agua, a lo que dieron diversas respuestas: en su mayoría dijeron que la falta de interés y unión de la gente, seguido por la falta de apoyo del gobierno y/o falta de algún incentivo

o apoyo económico, otros contestaron que la falta de información/comunicación y falta de organización, y en menor proporción, que simplemente no sabían.

Según los administrativos, dentro de los posibles obstáculos que puedan existir para la implementación de un proyecto, es la cuestión económica, ya que no se sabe si el municipio tiene el recurso para costear los gastos que se pudieran generar, también mencionan que sería complicado que se pusieran de acuerdo entre gobiernos ya que puede haber conflicto de intereses y por último, consideran que no darle seguimiento sería un problema como ya ha ocurrido en administraciones pasadas; mencionaron que anteriormente han llegado programas para reforestar lechuguilla y maguey y la responsabilidad termina cuando el incentivo económico se acaba.

A lo largo de las salidas de campo hubo gente que nos dio información que no estaba dentro de la guía de las entrevistas semi-estructuradas, pero que fue de utilidad para inferir las posibles causas de la disminución del manantial, las cuales fueron la ubicación de la "mina de los chinos", que según los ovejeros y agricultores que lo mencionaron trabajó de forma ilegal entre 2016 y 2017 y las actividades extracción de lechuguilla para la extracción del ixtle que practicaba la gente los poblados de Moctezuma, la cual supuestamente no se realiza más.

## 9. Discusión de los resultados

---

En este capítulo se presenta el análisis de los resultados obtenidos de esta investigación. i) Se presenta el modelo conceptual del manantial “Ojo de Agua” de Moctezuma, ii) relación entre familias de agua y elementos que sobrepasan la NOM-127-SSA1-1994 en los aprovechamientos de uso público-urbano y doméstico, iii) área de recarga potencial y su relación con la cobertura vegetal y iv) percepción social de la problemática ambiental del manantial.

### 9.1 Modelo conceptual del funcionamiento del manantial “Ojo de Agua”

Con los resultados obtenidos, se representó el ambiente hidrogeológico del manantial “Ojo de Agua” de Moctezuma, por medio de un modelo conceptual integrando parámetros geológicos, geoquímicos, edáficos, geomorfológicos y de vegetación los cuales a su vez, se relacionan con elementos ambientales como el clima que determina la magnitud del agua que puede entrar al sistema subterráneo y la topografía que determina la distribución, movimiento, cantidad de energía y jerarquía del sistema de flujo (Tóth, 1999). El modelo geológico establece las vías por donde entra y circula el agua controlando la dirección y esquema de flujo, así como las características hidrogeoquímicas del agua como edad y relación agua-roca (Carrillo-Rivera *et al.*, 2005).

La zona de interés del presente trabajo corresponde a la porción oriente del área de estudio, debido a que es donde se localiza el manantial “Ojo de Agua” de Moctezuma. En esta porción se identificaron cuatro familias de agua que, con base en la evolución teórica definida por Chevotareb (1955), las conductividades eléctricas, los sólidos disueltos totales y el potencial REDOX de las muestras de agua, la secuencia propuesta es  $\text{HCO}_3^-$ -MIX→MIX-MIX→MIX-Na→ $\text{SO}_4^-$ -MIX. Sin embargo, la información hidrogeológica no es suficiente para definir una evolución hidrogeoquímica.

En la figura 85 se presenta una sección hidrogeológica en la cual se incluyen los diagramas de Stiffs que representan las familias de agua de los aprovechamientos 1, 4, 3, 2, 24, 25, 5, 6, 7, 9, 8, 20 y 21 (de izquierda a derecha), los sistemas de flujo de agua subterránea, las Formaciones geológicas y los diferentes tipos de vegetación. En éste diagrama se identifica que el manantial “Ojo de Agua” de Moctezuma está asociado con las rocas calcáreas de la Formación Cuesta del Cura. Esta Formación está constituida

por calizas criptocristalinas compactas de color gris, en estratos delgados a medianos con bandas de pedernal negro, con horizontes de lutitas intercaladas con estratificación ondulante. Contiene fósiles marinos y corresponde a un paleo-ambiente de mar abierto y aguas profundas. Esta Formación sobreyace de forma concordante y transicional a la Formación La Peña.

La geología estructural del área de estudio es principalmente resultado de la orogenia Laramide del Cretácico superior. Éste evento tectónico formó el anticlinorio de Santa Catarina de dirección norte-sur, ubicado al poniente del manantial "Ojo de Agua", el cual se compone de las rocas sedimentarias calizas de la Formación La Peña, Cuesta del Cura, Indidura y Caracol. El anticlinorio se caracteriza por estar intensamente fracturado y plegado conformando serranías (con diferencias de elevación del orden de 300 m con respecto de la planicie). Los anticlinales presentes, tienen rumbo norte-sur y están volcados hacia el oriente. Debido a estas condiciones estructurales, el anticlinorio presenta una topografía accidentada, ubicando al manantial en las faldas de la sierra.

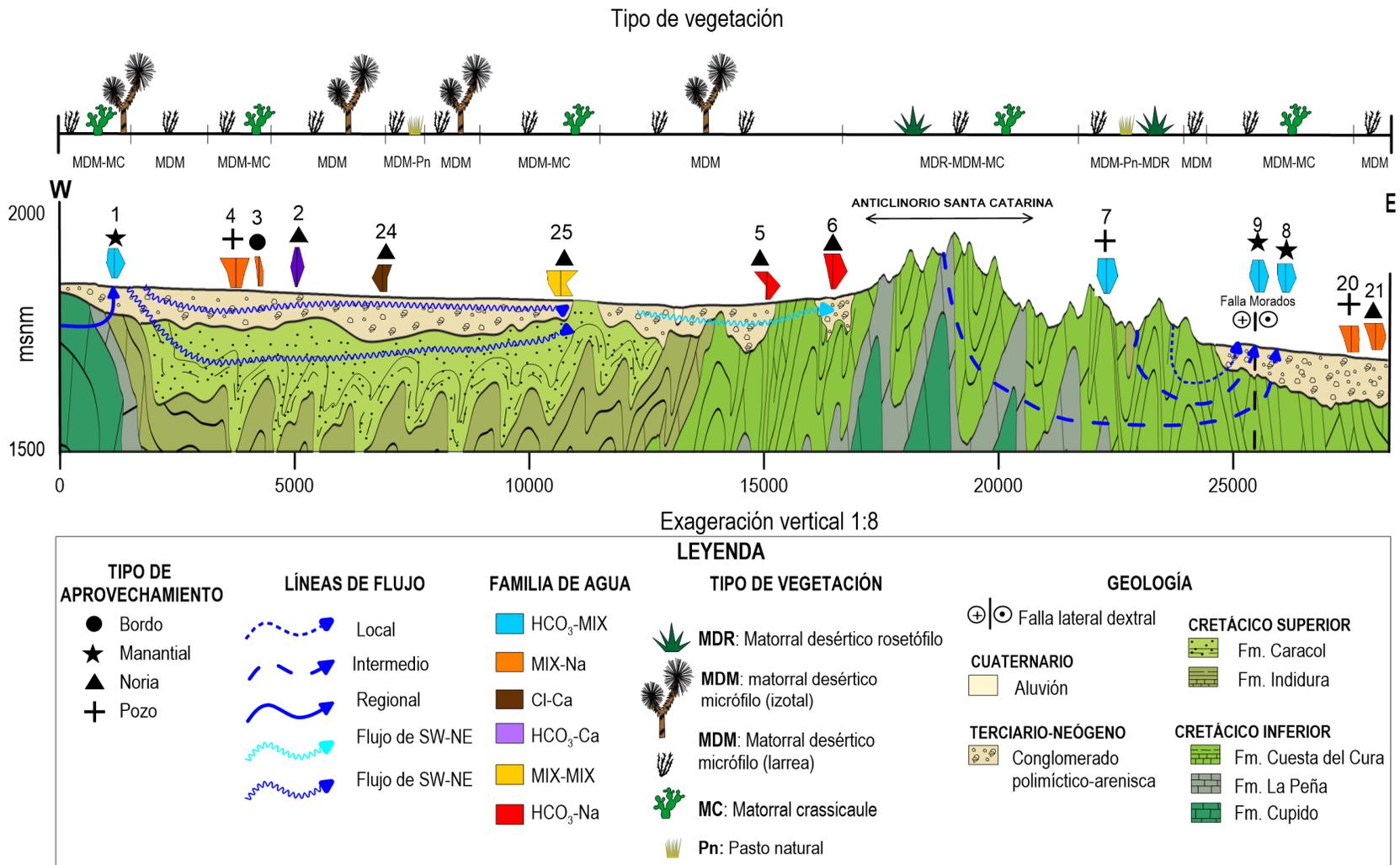


Figura 85. Modelo conceptual hidrogeoquímica del manantial “Ojo de Agua” Moctezuma.

Específicamente, el manantial se encuentra en la charnela del anticlinal "El Tule" (figura 26); la charnela es el punto del pliegue donde se produce la curvatura. El esfuerzo que ocurre al momento de su formación es de tipo distensivo, y es el punto más débil del anticlinal en donde comúnmente se generan fallas normales y relieves inversos debido a la erosión. También se ubica al manantial "Ojo de Agua" en la intersección de dos fallas, la falla normal "Moctezuma-El Tule", de dirección sureste-noroeste, en donde el bloque caído es hacia el oriente y la falla lateral dextral "Morados" con dirección suroeste-noreste.

El conjunto de características geológicas, estructurales y topográficas mencionadas anteriormente, favorecen las condiciones para que se desarrolle la descarga de agua del manantial "Ojo de Agua". Estos elementos ambientales en conjunto con la composición química del agua del manantial indican que el sistema de flujo subterráneo que alimenta al manantial presenta como principal zona de recarga potencial el anticlinorio Santa Catarina; en éste, el agua entra de manera indirecta por medio de fallas y fracturas y viaja a lo largo de los pliegues, los cuales permiten o facilitan el flujo de agua a hacia las faldas de la serranía. Debido a estas condiciones y de acuerdo a la clasificación de Stevanovic, (2011) el manantial "Ojo de Agua" corresponde al tipo de gravedad por desborde. Otra evidencia por la que se propone esta clasificación incluye los niveles de oxígeno disuelto (mayores a 1 mg/L) y los Eh positivos (mayores a 200 mV), debido a que son características comunes de condiciones oxidantes y aeróbicas en donde no existe una capa confinante por encima del material por donde fluye el agua subterránea (acuífero libre).

De acuerdo con la relación litio vs conductividad eléctrica (figura 86), litio vs cloruro (figura 87) y litio vs estroncio (figura 88), se observa que hay valores altos en el pozo 4 (litio >180 µg/L, CE >1500 µS/cm, Cl >250 mg/L y Sr >2500 µg/L) ubicado al poniente y en el pozo 19 (litio >160 µg/L, CE >1500 µS/cm, Cl >160 mg/L y Sr >3500 µg/L) ubicado al oriente, los cuales son pozos profundos, pertenecientes a la familia MIX-Na; mientras que los valores bajos corresponden al pozo 7 (litio=40 µg/L, CE=800 µS/cm, Cl =1200 mg/L y Sr=1100 µg/L) y a la noria 13 (litio <60 µg/L, CE=900 µS/cm, Cl=60 mg/L y Sr <1000 µg/L) ambos ubicados al oriente, los cuales corresponden a la familia HCO<sub>3</sub>-MIX. Los pozos 4 y 19 representan los aprovechamientos de mayor trayectoria, ya que de acuerdo con diversos autores (Edmunds *et al.*, 1986; Edmunds y Smedley, 2000; Carrillo-rivera *et al.*, 2002; Carrillo-Rivera *et al.*, 2007), el litio es un indicador de tiempo de residencia relativo, es decir, entre mayor sea su aparición, sugiere un mayor tiempo de residencia y mayor distancia de recorrido. Esto también se ve reflejado en el estroncio, el cual es un indicador de tiempo de residencia en aguas subterráneas que se mueven en rocas carbonatadas, como es el caso de las rocas carbonatadas de las Formaciones Cuesta del

Cura y La Peña que afloran en Moctezuma. Aunque no se tiene la suficiente información hidrogeoquímica para establecer las edades absolutas de las aguas subterráneas del área de estudio, es posible relacionar qué aprovechamientos tienen aguas con tiempos de residencia relativos similares.

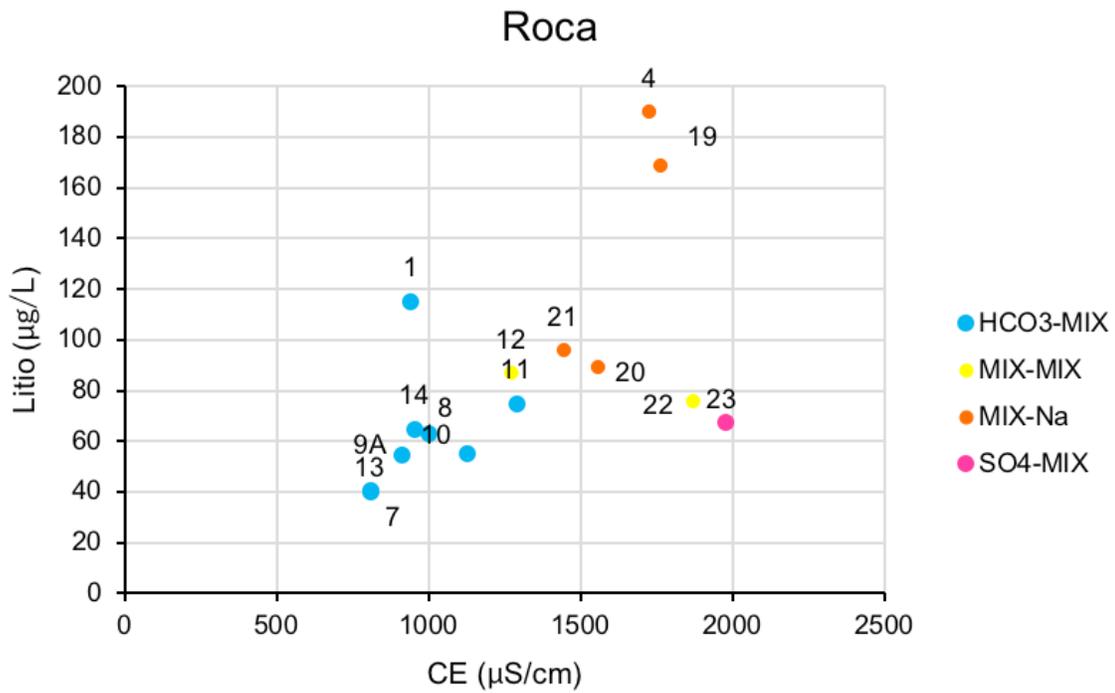


Figura 86. Diagrama de Litio y conductividad eléctrica de aprovechamientos alojados en roca.

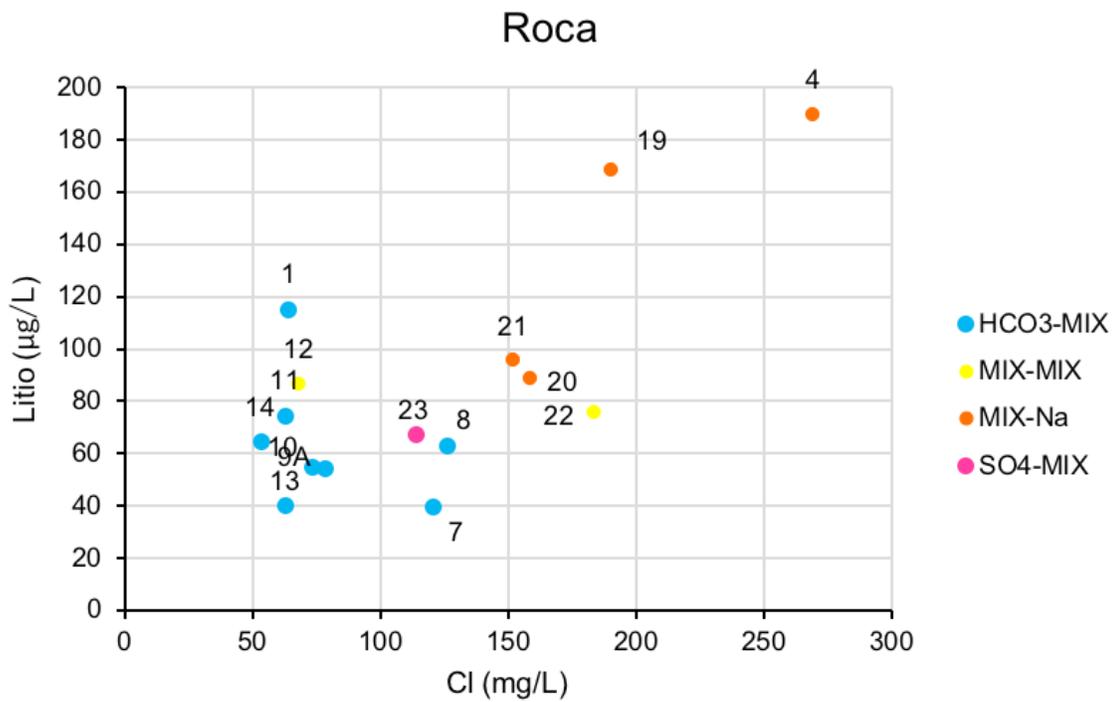


Figura 87. Diagrama de Litio y cloruros de aprovechamientos alojados en roca.

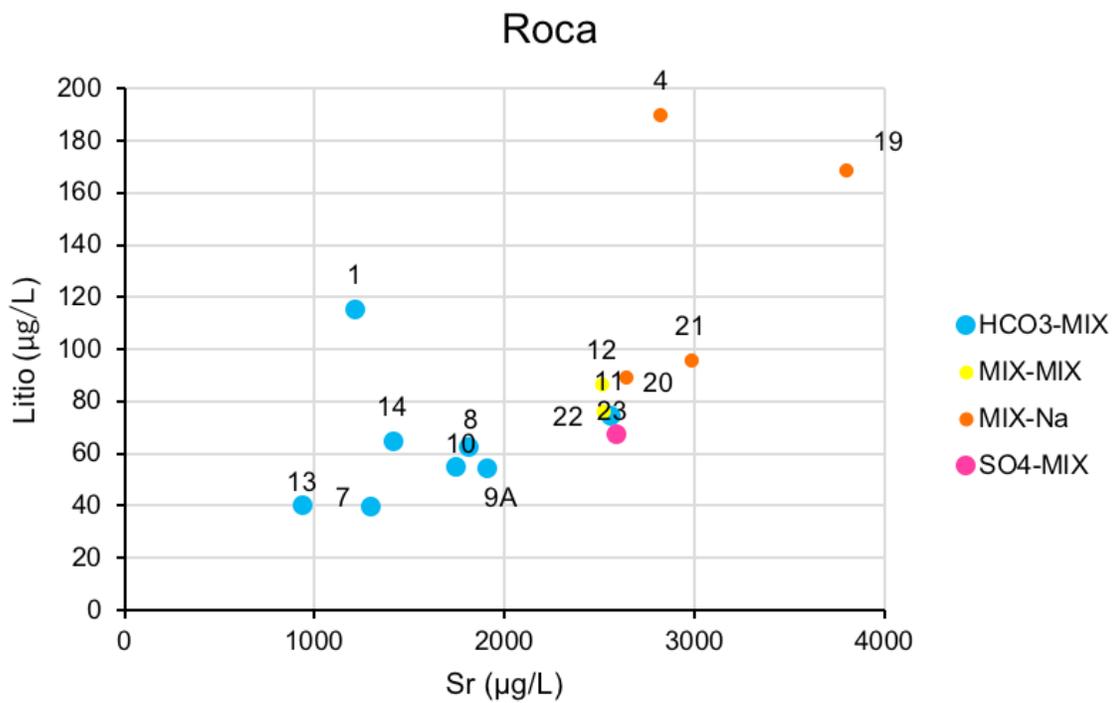


Figura 88. Diagrama de Litio y estroncio de aprovechamientos alojados en roca.

El pozo 10 del Picacho y el manantial 8 y 9 del “Ojo de Agua”, los cuales corresponden a la familia de agua bicarbonatada mixta (figura 89), presentan concentraciones similares de los elementos graficados anteriormente. Además, en la figura 70 de los resultados, se observa que el pozo 10 y el manantial 8 del “Ojo de Agua” se clasifican como aguas termales con base en la clasificación de Ergorov y Luge (1967). Estas características demuestran que ambos aprovechamientos corresponden al mismo sistema de flujo de agua subterránea. Sin embargo, el punto 9 que también corresponde al “Ojo de Agua” presenta temperaturas menores que el punto 8, evidenciando así la disminución del caudal. Esto se debe a que el agua que descarga del punto 9 ya no corre hacia el punto 8, provocando que el agua se estanque y se enfríe.

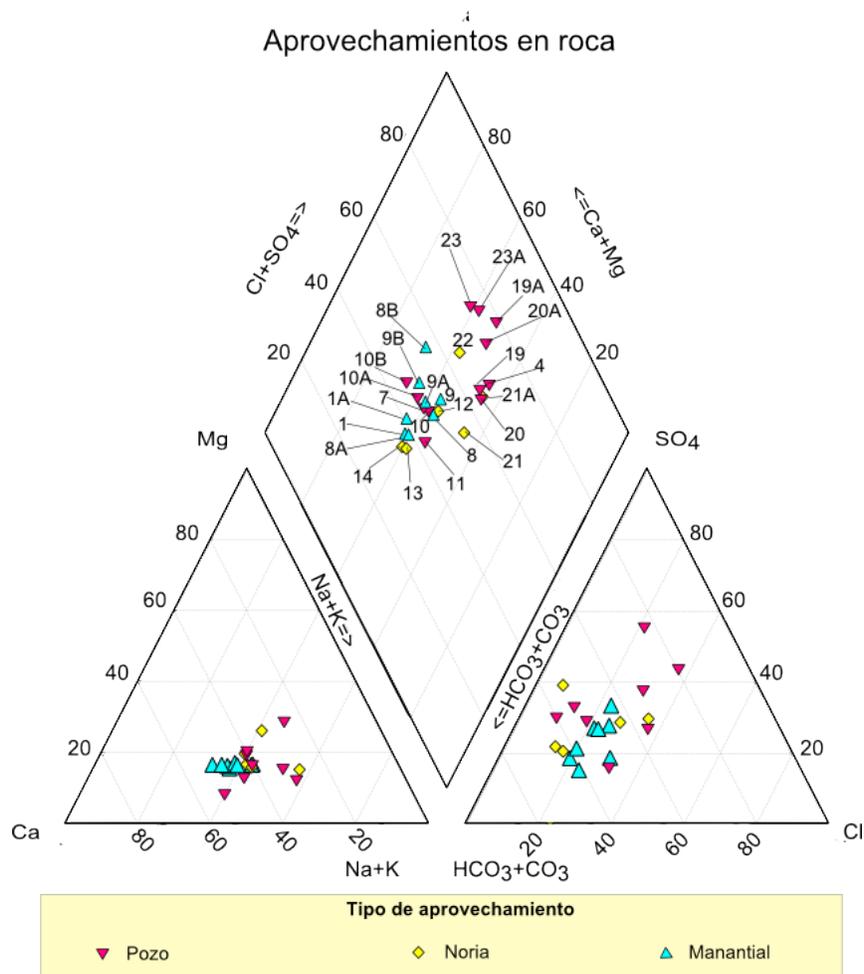


Figura 89. Familias de agua de los aprovechamientos de agua subterránea alojados en roca de la porción oriente y poniente, representados en un diagrama de Piper.

La geología es otro factor que explica la relación que existe entre el agua del pozo 10 y el agua que descarga en el manantial "Ojo de Agua", ya que con base en el mapa geológico (figura 26), ambos aprovechamientos corresponden a La Formación Cuesta del Cura. Además, la intersección de la falla lateral dextral "Morados" de dirección suroeste-noreste con la falla normal "La Cruz" de dirección norte-sur ubicada a menos de tres km al poniente del pozo 10, puede influir en el movimiento del agua subterránea de manera horizontal, viajando desde el anticlinorio Santa Catarina, hacia el sur. Considerando que ambos aprovechamientos corresponden a un mismo sistema de flujo, la extracción del pozo profundo 10 puede influir en el movimiento vertical del agua subterránea del "Ojo de Agua" debido a que el agua más somera ocupa el espacio del agua más profunda, provocando un movimiento descendente.

Se propuso que el manantial es alimentado por varios sistemas de flujo tanto local como intermedio. Para definir la presencia de un sistema local, se utilizaron parámetros indicativos como: la cercanía del área de recarga potencial con al área de descarga, la topografía accidentada de la zona de recarga, las bajas concentraciones de sólidos disueltos totales (<620 mg/L) y conductividad eléctrica (<990  $\mu$ S/cm) del agua subterránea que descarga en el manantial, su composición bicarbonatada mixta y la ausencia de vegetación halófila, las cuales son algunas de las características propuestas por Tóth (1963). Esto indica que el sistema de flujo del manantial es un sistema dinámico en donde el agua que entra, sale relativamente rápido. Estos sistemas de flujo local han permitido, además, el establecimiento de flora que no corresponde a vegetación de zonas áridas y semiáridas (como *Tamarix sp.* y *Populus*, que fueron identificados en las orillas del manantial), lo cual es una característica de los humedales.

Con los diagramas de Stiff (figuras 68, 69 y 70) se identificó la existencia de un sistema de flujo intermedio debido a que se observaron cambios de las familias de agua a través del tiempo, indicando dos cosas: 1) se ve reflejada una recarga de agua subterránea al término de la temporada de lluvias (entre octubre y noviembre) y 2) los flujos no tienen tanta trayectoria, por lo que el manantial es alimentado por más de un sistema de flujo local, existiendo posiblemente un flujo intermedio.

El manantial Las Cruces, ubicado en la porción poniente, corresponde a un sistema de flujo ajeno a los identificados en el área de estudio. Se identificó que el agua de éste manantial tiene una mayor trayectoria de recorrido tanto vertical como horizontal en comparación con el manantial "Ojo de Agua" de Moctezuma, debido a que su composición química es más homogénea, su temperatura es más alta (28.7°C) y presenta mayores concentraciones de litio (120  $\mu$ g/L). Posiblemente, el sistema de flujo transita en las calizas de la Formación Cupido. Estas características sirven como punto de comparación

para determinar que el manantial de Moctezuma no es alimentado por un sistema de flujo regional.

Considerando la relación que hay entre el agua del manantial y del pozo 10 del Picacho se propone que la extracción intensiva puede ser uno de los factores que provocan que la componente vertical de la dirección de flujo subterráneo sea descendente, afectando así la disminución del caudal del manantial. Sin embargo, Carrillo-Rivera *et al.* (2008) menciona que los cambios definidos en términos de calidad y cantidad del agua u otros impactos ambientales relacionados, sólo son evidentes después de largos períodos de tiempo, por lo que se tendría que tener mediciones del caudal del manantial en un periodo determinado para asegurar ésta propuesta.

## 9.2 Calidad del agua

La familia de agua bicarbonatada-mixta presenta la mejor calidad, debido a que ninguno de sus aprovechamientos sobrepasa los límites permisibles señalados en la NOM-127-SSA1-1994. Ambos manantiales, tanto el de Moctezuma como de Las Cruces corresponden a esta familia de agua (figura 82).

Los aprovechamientos de la porción oriente que presentaron algún parámetro con valor superior a lo establecido en la norma son los pozos profundos 19 del Garabatillo (sólidos disueltos totales y fluoruro) y 23 de Morterillos (sólidos disueltos totales y sulfato), los cuales están estrechamente relacionados con las familias de agua a la que corresponden (figura 73).

Los valores altos en sólidos disueltos totales son comunes en aguas subterráneas profundas. Originalmente, el agua de lluvia contiene bajo contenido de sólidos disueltos totales y a medida que el agua subterránea se mueve en la zona saturada, de acuerdo con el patrón de flujo subterráneo desde las zonas de recarga hasta las de recarga, generalmente el contenido aumenta, así como la salinidad (Price, 2003). También es posible que el contenido aumente porque cualquier mineral soluble presente en el acuífero no haya sido removido del todo por el agua, y quizá los productos solubles de intemperismo no hayan sido eliminados tan rápido como se formaron (Edmunds *et al.*, 1986). Debido a esto, usualmente la calidad química del agua en regiones áridas no es la mejor, ya que de manera natural los sólidos disueltos totales pueden estar en concentraciones inadecuadas para consumo humano.

El pozo 19 presentó valores mayores a los límites permisibles de fluoruro el cual es un contaminante natural relacionado con bajas concentraciones de calcio y magnesio, que

puede darse por el intercambio iónico con sodio, lo que es consistente con la información hidrogeoquímica, ya que a éste pozo le corresponde la familia MIX-Na.

El pozo 23 de Morterillos presentó niveles fuera del rango establecido por la norma en sulfatos, lo que se relaciona con la familia a la que corresponde ( $\text{SO}_4$ -MIX), la fuente de éste puede venir de la oxidación de pirita proveniente la Formación La Peña la cual contiene concreciones de pirita; evidencia de esto son las bajas concentraciones de oxígeno disuelto.

### 9.3 Relación entre cobertura vegetal y zonas de recarga

Debido a las diferentes condiciones ambientales que prevalecen en las zonas de descarga y recarga, las comunidades vegetales asociadas a cada una de ellas presentan características específicas. En el caso de las zonas de recarga de agua subterránea en zonas áridas Naumburg *et al.* (2005) y Tóth (2009) denominaron que la vegetación asociada corresponden a las freatófitas xéricas (figura 82). Así mismo, existe una estrecha relación en la respuesta de estos elementos cuando existe un cambio o alteración ya sea natural o antropogénico. Un ejemplo de ello se muestra en el trabajo de Patten *et al.* (2007) en donde identificaron en el Desierto de Mojave EUA, que la vegetación puede cambiar a través del tiempo en relación con la profundidad del nivel freático y a la descarga en respuesta a alteraciones hidrológicas; con datos históricos de respuesta a la extracción de agua subterránea observaron que la disminución del nivel freático se relacionaba con la reducción de la vegetación freatófita.

Es por ello que la cobertura representa un valor de importancia para la condición del sitio de estudio, ya que juega un papel importante que va a determinar si hay una mayor escorrentía o una mayor infiltración a nivel subterráneo (Liu *et al.*, 2018). El área de recarga del sitio de estudio presentó un porcentaje mínimo de 47.2 % y un máximo de 54.4 %, que según Liu *et al.* (2018) y Jiang *et al.* (1992) no se encuentra dentro del rango que consideran como un ecosistema saludable, ya que ellos determinan un umbral inferior para zonas áridas de entre 10 y 30 % y un umbral superior de entre >60 %. Denominan valor umbral al porcentaje de cobertura vegetal "óptimo" en donde la pérdida de suelo disminuye o permanece estable, la escorrentía disminuye y la infiltración y recarga de agua subterránea aumenta (Chen *et al.*, 2018). Aldrete (1981) trabajó con matorrales desérticos rosetófilos como la principal cobertura superficial, al noroeste de Zacatecas y registró una cobertura vegetal promedio de 7746.4 m<sup>2</sup>, lo que se interpreta que el suelo desnudo y/o roca fueron de 22.5 %, y el 77.5 % correspondía a la cobertura vegetal; a este porcentaje que clasificó como ecosistema saludable.

Según, Jiang *et al.* (1992), el valor idóneo de cobertura vegetal es del 60-70 % en zonas semi-áridas debido que en su trabajo demostraron que con éste porcentaje se disminuyó más del 90 % de pérdida del suelo. Gao *et al.* (2011) tras un monitoreo a largo plazo, identificaron que los sitios con una cobertura vegetal inferior al 20 % no pueden recuperarse, incluso después de tres décadas del cese de la tala de árboles y del pastoreo doméstico; explican que cuando la cobertura vegetal disminuyó por debajo de éste porcentaje, la tasa de erosión de suelo se aceleró y esto provocó que la cobertura se redujera aún más.

Tomando en cuenta lo anterior, se considera que el porcentaje idóneo de cobertura es del 60 % o más y el no deseado es por debajo del 30 %, siendo aceptable el valor intermedio; así, el área de estudio, con una cobertura entre 47.2 y 54.4 %, aunque no es el ideal, es al menos aceptable; sin embargo, que puede estar afectando la tasa de infiltración de agua subterránea por no alcanzar el valor idóneo; sin embargo, al no estar tampoco dentro del rango de riesgo de pérdida de suelo acelerada, todavía se está a tiempo de evitar que la cobertura disminuya. Para lo cual se deben diseñar estrategias que permitan la restauración del sitio, que con base en la figura 78, las áreas de prioridad deberían ser a los alrededores de la localidad de Morados y entre las poblaciones de Santa Catrina y Santa Rita.

Según la percepción de los pobladores de Moctezuma, Santa Catrina y Morados, las serranías San Rafel, La Bola y La Fundición que corresponden al área de recarga, en décadas pasadas presentaban una cobertura vegetal más densa, y la cual se ha reducido por dos motivos principales: cambios en la tasa de precipitación de los últimos años y actividades antrópicas. De acuerdo con las entrevistas realizadas y los comentarios de los ovejeros con los que se platicó durante las salidas de campo, se identificó que el pastoreo, las actividades mineras y la deforestación afectan en la tasa de cobertura vegetal. Según Sasaki *et al.* (2015) un cambio suficiente en la cobertura vegetal por perturbaciones como el pastoreo intenso y el cambio climático pueden acelerar la tasa de erosión del suelo, degradar los estados de la vegetación y, a su vez, aumentar las tasas de erosión en los ecosistemas áridos.

Es por esto que no se puede determinar que exista un solo “culpable” que provocara la degradación del área de recarga de agua subterránea, sino que es consecuencia de varios factores que han persistido a través del tiempo. Dicha perturbación se observó en campo, principalmente en el cerro conocido como San Rafael, en donde existe la presencia del arbusto *Mimosa aculeticarpa*, la cual es una especie indicadora de perturbación ambiental.

Del total de la cobertura vegetal identificada, únicamente el 13% correspondió al matorral desértico rosetófilo, el cual es considerado como la vegetación de mejor "calidad" para la captación de agua de lluvia, que debería predominar el área de recarga del manantial "Ojo de Agua". Chen *et al.* (2018) menciona que los diferentes tipos de vegetación (con diferentes morfologías y estructuras) lleva a diferencias en la intercepción de las precipitaciones; por ejemplo, Vásquez- Méndez *et al.* (2010) comprobaron que en general, bajo condiciones ambientales similares (por ejemplo, clima y topografía), los arbustos son más eficientes en la reducción de los niveles de escorrentía y sedimentos, seguidos por árboles y herbáceas. Para el caso de las zonas áridas y semiáridas, los patrones de vegetación se caracterizan por el tamaño, la forma y la distribución espacial de los parches de cubierta vegetal alta (Aguiar y Sala, 1999), siendo los matorrales desérticos rosetófilos, la vegetación de mejor calidad para la intercepción del agua de lluvia e infiltración al suelo y que favorece a la recarga natural. Esto es debido principalmente a la morfología de las especies dominantes, que las hace buenas captadoras. En campo pudo observarse en las laderas y cimas de las serranías la ocurrencia de parches de este tipo de matorral, sin embargo, no eran muy comunes y algunos incluso se encontraban impactados por el hombre.

Un dato de suma importancia es que se observó la presencia de plantas invasoras como el carrizo, en las orillas del cauce del manantial; éstas causan pérdida directa de la biodiversidad y alteración de los procesos naturales en los ecosistemas como alteración en procesos geomorfológicos (aumentan las tasas erosión), ciclos hidrológicos y biogeoquímicos (características químicas del suelo agua) afectando la composición, estructura y función de los ecosistemas (CONABIO, 2014a; Sevillano and Val, 2014).

En la parte norte del país se han reportado especies invasoras como el carrizo (*Arundo donax*) en el oriente y centro Durango (CONABIO y SRNMAD, 2017), los cuales causan daño al ecosistema ya que desplaza a las especies nativas (pertenecientes al matorral desértico micrófilo y rosetófilo), llegando a formar colonias densas a la orilla de ríos y estanques. En el caso de la zona de estudio pudo observarse carrizo en la orilla de todo el cauce, desde el punto de descarga del manantial hasta el parque recreativo (figura 90).



Figura 90. Carrizo en las orillas del arroyo seco que conecta los puntos 8 y 9 del manantial

También se encontró *Tamarix* sp. (pino salado), el cual por su condición como freatófita tiene un alto consumo de agua, además de incrementar la salinidad del suelo debido a su habilidad para exudar sales (Brock *et al.*, 1994); se ha registrado para estados como Nuevo León, Tamaulipas, Durango, Zacatecas y San Luis Potosí (Sevillano y Val, 2014). Esta especie también está relacionada con *Populus* (álamo), también observada en campo (figura 91). Por último, también fue observada en campo a *Casuarina* sp., la cual es una especie que altera radicalmente la luz y la temperatura provocando el desplazamiento de especies nativas de plantas y destrucción de hábitats de insectos, se ha reportado su existencia en Zacatecas (CONABIO, 2014b).



Figura 91. Punto de descarga del manantial. Al fondo se observa la presencia de álamos.

La presencia de todas estas especies invasoras puede estar jugando un papel importante en la disminución del agua del manantial debido a su capacidad de absorción de grandes cantidades de agua.

## 9.4 Visión social de la problemática ambiental

Vargas(1998), menciona que en las disciplinas o enfoques teóricos que ofrecen definiciones de “ambiente”, integran no sólo la caracterización como el conjunto de factores físicos que rodean a los seres vivos, sino que también amplían su significado para incluir las circunstancias sociales, culturales y económicas de los grupos humanos. De esta manera asumen una perspectiva sistémica para el análisis de las condiciones ambientales, a partir de la cual es posible caracterizar las relaciones de los sistemas sociales regionales con los sistemas naturales. Sólo con una perspectiva de este tipo es posible examinar el impacto de las políticas de desarrollo regional y de gestión de los recursos naturales en la relación población-ambiente, al reconocer su carácter multicausal, así como su “indeterminación” por los factores -considerados individualmente- que intervienen y las diferentes y complejas conexiones entre las escalas espaciales y temporales en las que ocurre la relación agua-sociedad.

Para preservar la calidad natural de las aguas subterráneas, protegerlas de la contaminación y promover prácticas de gestión nuevas y sostenibles a nivel local y regional, es necesario desarrollar estrategias integradas en donde los estudios científicos y técnicos se complementen con análisis de los problemas sociales relacionados con el recurso (Gutiérrez, 2008; Re, 2015). En este trabajo, las entrevistas aplicadas fueron una herramienta útil no sólo para conocer qué es lo que la población piensa acerca de la disminución del nivel del agua del manantial, sino que también ayudó a identificar factores que posiblemente están relacionados con esta problemática ambiental.

El ejemplo más claro, fue la información que los participantes dieron acerca de la existencia y ubicación de “la mina de los chinos”, de la cual se extraía mármol y según la percepción de la gente, operó de manera ilegal entre 2016 y 2017. Esta actividad no sólo demandó grandes cantidades de agua (del manantial según los participantes) sino que también disminuyó los valores de cobertura vegetal identificados en el área de recarga debido al desmonte que se hizo para la extracción de la materia prima. Otra valiosa información fue proporcionada por uno de los participantes de mayor edad (76 años), quien comentó acerca de la actividad de extracción de lechuguilla (temporada de marzo a septiembre) en los cerros ubicados entre Moctezuma y Santa Catarina; esta práctica realizada por familias de dichos poblados, se hacían con el objetivo de fabricar ixtle. Actualmente esta actividad ya no se realiza, pero la extracción se ve reflejada en los bajos porcentajes de cobertura vegetal (menores a 50 %), así como la presencia de mimosa aculeticarpa. Las actividades de pastoreo también aportan en la perturbación de la cobertura vegetal.

Originalmente se creía que la falta de lluvias provocaba la disminución del manantial, pues esto fue percibido por los participantes. Sin embargo, con el análisis estadístico de series de tiempo del año 1970 al año 2016 realizado con las estaciones meteorológicas Moctezuma (24044), El grito (24021), Guanamé (24150), El Mezquite (24098), Coronado (24188) y San Francisco de la Dicha (24192) para datos de temperatura y precipitación (anexo digital), se comprobó que esta suposición era incorrecta, ya que no se vio ninguna tendencia en ninguno de estos parámetros (figuras 80 y 81). Por lo que se puede excluir las causas naturales meteorológicas como uno de los factores de reducción del caudal del manantial.

Entonces, eliminando las causas naturales meteorológicas, quedarían los factores antropogénicos. Los ciudadanos mencionaron que existía contaminación, extracción excesiva e incluso discriminación, tres de los cuatro grandes problemas del recurso hídrico mencionados por Gutiérrez (2008).

Otra de las hipótesis que se tenían originalmente, era que posiblemente el aumento de población, influyó en el abastecimiento per cápita, sin embargo, según el intercenso de INEGI en 2015 la población total era de 19 539, mientras que en el Informe anual sobre la situación de pobreza y rezago social 2018 se presenta un total de 19,121 habitantes, lo que indica que la población no sólo se ha mantenido con los años, sino que ha disminuyó. De acuerdo con las entrevistas, la disminución del caudal del manantial podría ser factor para la pérdida de empleos y por ende migración.

Es bien sabido que en todo el país existe extracción excesiva de agua subterránea y que incluso, va en aumento. De los 653 acuíferos, 32 se encontraban en sobre-explotación en 1975, para 2007 aumentó a 101 acuíferos; pasando de una disponibilidad natural media de agua per capita de 18,035 m<sup>3</sup>/hab/año, a sólo 4,312,8 disminuyendo, cerca del 70% del agua disponible (CONAGUA, 2014). El acuífero administrativo de Villa de Arista dentro del cual se encuentra el manantial "Ojo de Agua", está considerado como en situación crítica.

El volumen de extracción total destinado a la agricultura es del orden de 72.6 mm<sup>3</sup>/año, lo que ha generado la disminución de los niveles de agua y por consecuencia podría haber provocado la disminución del manantial, lo que coincide con la dirección de flujo regional hacia el oriente provocado por el basculamiento de los grabens de la zona de estudio.

Por otra parte, se comprobó que el manantial presenta buena calidad con respecto al uso público-urbano, sin embargo, existen norias y pozos de uso público-urbano (pozo 19

y 23) que presentan parámetros que rebasan lo establecido en la NOM-127-SSA1-1994 (sólidos disueltos totales, fluoruro y sulfatos), lo que podría derivar en problemas de salud pública (National Academy of Sciences, 1979; Medellín-Milán *et al.*, 1993; Smedley y GKinniburgh, 2002; Gutiérrez, 2008).

Los ciudadanos dieron respuestas variadas sobre las posibles causas de disminución del manantial, lo que denotó dos cosas: 1) la falta de información con respecto a la situación ambiental y 2) que existe una diferencia en el nivel educativo y arraigo de creencias de “pensamiento mágico”. Nemeroff y Rozin en Petra-Micu y Estrada-Avilés (2015) definen al pensamiento mágico como intuiciones o creencias en la habilidad de influenciar eventos a distancia, sin una explicación física. Por ejemplo, la respuesta más común del factor que creían provocó que el manantial se secase fue: se secaron las plantas y “los árboles llaman a la lluvia”.

Para una aproximación exitosa de parte de las autoridades hacia la población, es importante considerar lo anterior, evitando ofender creencias y provocar rechazo o el desinterés de los habitantes. Pabón (2018) menciona que el mundo del conocimiento se mueve en la lógica de la racionalidad científica, la cual ya no puede estar solamente en las cabezas de los científicos, sino que debe ser patrimonio común de la gente.

Existe un alto porcentaje de personas conscientes sobre su responsabilidad, sin embargo, no hay quejas formales por temor a la imagen de la autoridad. Lo cierto es que la cultura de no pagar servicios es ahora considerada por la misma población como un error, pero también se nota la incapacidad de las autoridades para resolver el problema debido a la mala gestión del agua (Barkin, 2018).

Se observa contradicción entre la población entrevistada de Moctezuma y gobierno municipal, la mayoría de los ciudadanos mencionan que no saben si las autoridades han realizado algún esfuerzo por solucionar el problema de falta del agua (36 %) y otros aseguran que no han hecho nada (32 %), mientras que, de acuerdo a las entrevistas, las autoridades afirman haber tomado cartas en el asunto (60 %), dentro de las acciones que mencionaron se encuentran: tandeear el agua, buscar pozos, divulgación para concientizar a la gente sobre el cuidado del agua y convenio con la UASLP. Lo anterior denota la comunicación deficiente entre el gobierno y población, ya que lo que las autoridades ven como una solución (tandeear el agua), la gente lo ve como una privación de sus derechos.

Una de las estrategias de difusión del cuidado del agua planteada por las autoridades del municipio, fue el uso de las redes sociales, sin embargo, ésta fue deficiente,

debido a que casi la mitad de la población son adultos y adultos mayores (INEGI, 2015) estadísticamente con menor acceso a internet. Como menciona Jansky et al. (2005) es importante proporcionar a la gente información adecuada sobre los planes de manejo propuestos e involucrar a todas las partes interesadas en las actividades y los procesos de toma de decisiones.

Tanto las autoridades como los ciudadanos mencionaron la importancia de concientizar a la población con respecto al cuidado del agua, que como menciona Re (2015), la sensibilización de las poblaciones locales sobre los problemas ambientales puede ayudar a hacer que la población se involucre y jueguen un papel importante en la conservación del ambiente y protección de recursos hídricos.

Al preguntar a los ciudadanos si tenían alguna propuesta para combatir el problema de falta de agua se emitieron muchas ideas, dentro de las cuales resaltan: crear conciencia sobre la importancia del agua, reforestar, realizar algún estudio en el manantial, limpiar el manantial, buscar pozos y cortar el agua a quien no la; pero, igual que en otras partes de la República se puede decir que no hay participación directa y activa por parte de los pobladores en la toma de decisiones o en estrategias que ayuden a dar soluciones. Las autoridades piensan que es necesario buscar asesoramiento profesional para primero investigar qué es lo que está ocurriendo y así poder dar alguna solución pertinente.

Dentro de los posibles obstáculos que mencionaron ambos grupos se encuentra principalmente la falta de unión, interés, comunicación y organización de la gente, falta de apoyo por parte del gobierno y falta de algún incentivo (económico). Según Barkin (2002), el punto de vista de los más necesitados, la inversión en actividades como proyectos de conservación del agua y reforestación produciría beneficios después de un largo tiempo, sin embargo, en Moctezuma no se ha tenido en cuenta esto en consideración

Dentro de las consecuencias que se cree que puedan ocurrir son las carencias en salud pública vinculado a la escasez de agua para sus necesidades básicas (problemas de higiene); clausura del parque y migración causando, por ende, problemas económicos, principalmente para los comerciantes. Estas últimas están relacionadas ya que, como menciona Figueroa *et al.* (2012) la migración se ha convertido en un problema social por la falta de oportunidades laborales de los millones que buscan un empleo digno, bien remunerado y mejores condiciones de vida; y por último el aumento de los costos para conseguir agua de otros lugares. Simplemente, si no se cuenta con agua y espacios ambientales sanos para poder vivir, las posibilidades que tienen para desarrollar sus propios planes de vida con libertad se reducen de forma drástica (Gutiérrez, 2008).

El estudio de los diferentes elementos tanto ambientales como sociales, ayudó no sólo a detectar el origen de los probables factores, sino también a descartar hipótesis que se tenían desde el principio. Es por eso que adoptar un enfoque multidisciplinario mediante la combinación de las ciencias de la tierra, las ciencias exactas y las ciencias sociales facilita la evaluación de las relaciones entre las aguas subterráneas y la sociedad, y necesariamente implica considerar no sólo cómo las actividades humanas pueden afectar a las aguas subterráneas, sino también cómo el agua subterránea afecta las actividades humanas.

Dentro de lo que plantea Re (2015), el presente trabajo se puede considerar como un ejemplo a pequeña escala de un estudio socio-hidrogeológico, en donde, con apoyo de las entrevistas se buscó comprender si existe correlación entre componentes, es decir, cómo las acciones humanas ejercen presión sobre el recurso y cómo la escasez y/o contaminación del recurso influyen en el bienestar humano. El enfoque multidisciplinario que se dio a este trabajo puede contribuir en la gobernanza del agua, en donde el muestreo y análisis de datos en conjunto con la percepción de la problemática de las partes involucradas, contribuyen a la discusión aportando elementos para mejorar la gestión del agua subterránea, basada en la ciencia y en la implicación social de los problemas relacionados a esta.

## 10. CONCLUSIONES y RECOMENDACIONES

Debido a la variedad de familias de agua, así como la dirección de flujo propuesta, se pudo dividir el área en dos partes: la porción poniente en el graben de Santa Teresa y la porción oriente en el graben de Villa de Arista, siendo el anticlinorio de Santa Catarina la línea divisoria entre ambas. Esto confirma que cada porción tiene un sistema de flujo subterráneo independiente. Para la porción poniente se identificó que la dirección de flujo subterráneo va de suroeste a noreste. Para el caso de la porción oriente, no se obtuvieron los niveles estáticos para poder determinar la dirección de flujo subterráneo, sin embargo, con base en la tectónica del sitio, se infiere que la dirección es preferentemente al este.

De acuerdo con los diagramas de Piper se identificó que el agua del manantial, corresponde a la familia HCO<sub>3</sub>-MIX, lo que indica que se encuentra cercana al inicio de la evolución hidrogeoquímica. Considerando la química del agua y los elementos del ambiente como topografía, geología y vegetación, se pudo definir al anticlinorio de Santa Catarina al poniente del mismo, como el área de recarga potencial de agua subterránea del manantial "Ojo de Agua".

Los cambios en el tiempo de las familias, representados por los diagramas de Stiffs, indican que el manantial "Ojo de Agua" es alimentado por una combinación de sistemas de flujo locales e intermedios.

Las aguas de la zona poniente presentan una evolución más avanzada, indicando un sistema de flujo subterráneo complejo, en el cual no se tiene la suficiente información hidrogeoquímica para conocer el área de recarga, el número de sistemas de flujo y la línea de evolución del agua.

Las ocho familias de agua identificadas son resultado de procesos ambientales como evaporación, procesos fisico-químicos de interacción agua-roca como disolución de carbonato, intercambio catiónico y oxidación, y procesos antropogénicos como contaminación difusa. Para el caso de los aprovechamientos que presentaron algún parámetro por arriba del límite permisible de la NOM-127-SSA1-2004, se identificó que hay una estrecha relación con la familia de agua a la que pertenecen; siendo la familia HCO<sub>3</sub>-MIX la de mejor calidad, ya que ninguno de los aprovechamientos correspondientes a esta familia presentó algún problema. Las familias de agua que presentaron algún parámetro rebasado fueron la MIX-MIX (cloruro, sulfato, cadmio, sodio, mercurio, y sólidos disueltos totales), la MIX-Na (cloruro, fluoruro y sólidos disueltos totales), SO<sub>4</sub>-MIX (sulfato y sólidos disueltos totales) y HCO<sub>3</sub>-Na (fluoruro y arsénico).

Se considera como ecosistema saludable en las zonas áridas a la cobertura vegetal superior a 60 %. Las mediciones en el área de estudio indican que el área de recarga se encuentra por debajo de éste rango, sin embargo, al no encontrarse tampoco en el umbral inferior (<30 %) es posible que, en un mediano o largo plazo, el área pueda llegar al valor óptimo. Los impactos ambientales en el área de recarga potencial pueden estar asociados con la disminución del caudal del manantial “Ojo de Agua”, debido a que la vegetación es un componente importante para la infiltración de agua al subsuelo, por lo que sería importante pensar en un plan de restauración en las zonas más afectadas con vegetación local (arbustos rosetófilos).

También se identificó la presencia de flora invasiva en las zonas aledañas al “Ojo de Agua” las cuales algunas de ellas son grandes consumidoras de agua, por lo que se recomienda que se extraigan del manantial.

Las entrevistas fueron una herramienta importante para conocer lo que la gente piensa acerca del impacto ambiental del manantial “Ojo de Agua” y como éste les ha afectado en su vida cotidiana, además, se obtuvo información que ayudó a relacionar actividades antrópicas que pueden estar relacionadas con la problemática ambiental.

La comunicación entre la ciudadanía y el gobierno municipal no ha sido eficiente, por lo que se recomienda que se mejoren las estrategias de difusión considerando las diferentes formas de percibir el problema ambiental con base en sus experiencias y niveles de estudio.

Dentro de las afectaciones que la población ha tenido debido a la disminución del caudal del manantial se encuentran problemas económicos (por falta de turistas al balneario), problemas de higiene y en general inconformidad del pueblo con las autoridades municipales; por el contrario, el 50 % de las autoridades entrevistadas mencionaron que no han sido afectadas debido a que no viven en Moctezuma.

Se comprobó que la percepción de la gente con respecto a la disminución de lluvias no es un factor de la disminución del manantial ya que, con los análisis de series de tiempo de precipitación y temperatura se demostró que no hay tendencia en periodo de tiempo de 1970 a 2016.

De acuerdo con el análisis realizado, se identificó que la disminución del caudal del manantial “Ojo de Agua”, es multifactorial, debido a la disminución de la cobertura vegetal en el área de recarga la cual reduce la capacidad de infiltración de agua subterránea, la extracción intensiva de pozos y norias en los alrededores, especialmente

en el área agrícola del municipio de Villa de Arista y localmente, debido a la similitud de la composición química del manantial y el pozo 10 del Picacho posiblemente exista competencia en el flujo de agua del manantial "Ojo de Agua" de Moctezuma de manera horizontal y verticalmente. Se recomienda continuar monitoreando el manantial para comprender mejor su funcionamiento y llegar a soluciones adecuadas.

## Bibliografía citada:

Aguiar, M.R., and Sala, O.E., 1999, Patch structure, dynamics and implications for the functioning of arid ecosystems: v. 14, p. 273–277.

Aguilar M., C., 2018, Entrevista:

Aguillón-Robles, A., Tristán-González, M., 1981, Cartografía geológica de la hoja “Moctezuma”, S.L.P.: Instituto de Geología y Metalurgia, UASLP, p. 30 p., doi:10.13140/RG.2.1.4435.7365.

Al-ruzouq, R., Shanableh, A., Merabtene, T., and Siddique, M., 2019, Catena Potential groundwater zone mapping based on geo-hydrological considerations and multi-criteria spatial analysis : North UAE: Catena, v. 173, p. 511–524, doi:10.1016/j.catena.2018.10.037.

Aldrete, M., 1981, Estudio ecológico de los agostaderos del noreste de Zacatecas. Tesis profesional. Universidad Autónoma de Chapingo, Chapingo, México: 205 p.

Álvarez, R.H., and Rivera, J.J.C., 2016, Fluoruro en el agua subterránea : niveles , origen y control natural en la región de Tenextepango , Morelos , México Fluoride in groundwater : levels , origin and natural control at the Tenextepango region , Morelos , Mexico: Investigaciones Geográficas: Boletín del Instituto de Geografía, v. 2016, p. 40–58, doi:10.14350/rig.47374.

Apello, 2007, GROUNDWATAND POLLUTION , 2ND EDITION:

Barboza-Gudiño, J.R., Hoppe, M., Gómez-Anguiano, M., and Martínez-Macías, P.R., 2004, Aportaciones para la interpretación estratigráfica y estructural de la porción noroccidental de la Sierra de Catorce, San Luis Potosí, México: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v. 21, p. 299–319.

Barchuk, A.H.B.A.H., 1988, Dinámica de la cobertura vegetal y los usos de la tierra a través de modelos de no-equilibrio: , p. 3–12.

Barkin, D., 2018, El Agua como Instrumento para el Rediseño de la Sociedad Mexicana: Liquid Governance: Water Resources, Adjudication and Neo-liberalism en las reuniones del American Association of Geographers, p. 1–15.

Barrenechea, M., 2004, Aspectos fisicoquímicos de la calidad del agua. Perú: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente.:

Bogan, M.T., Noriega-Felix, N., Vidal-Aguilar, S.L., Findley, L.T., Lytle, D.A., Gutiérrez-Ruacho, O.G., Alvarado-Castro, J.A., and Varela-Romero, A., 2014, Biogeography and conservation of aquatic fauna in spring-fed tropical canyons of the southern Sonoran Desert, Mexico: *Biodiversity and Conservation*, v. 23, p. 2705–2748, doi:10.1007/s10531-014-0745-z.

Bragado-Alcaraz, R., 2016, Diagramas de Piper - Tiloom: , p. 1–4, <https://www.tiloom.com/diagramas-de-piper/>.

Brock, J.H., Waal, L.C., Child, L.E., and Wade, P.M., 1994, *Tamarix* spp. (Salt Cedar), an invasive exotic woody plant in arid and semiarid riparian habitats of western USA: *Ecology and Management of Invasive riverside plants*, p. 27–44.

Bueno, A., 2005, Interpretación hidrogeológica de los sistemas de flujo de la parte norte del Altiplano Potosino.

Campos, A., 1998, *Procesos del Ciclo Hidrológico: San Luis Potosí, México*, 30 p., <https://books.google.es/>

CONAGUA, 2014, *Estadísticas del agua en México.*:

CONAGUA, 2015, *Manual De Muestreo, Técnicas De Medición De Parámetros in Situ, Y Estrategias De Monitoreo Para La Vigilancia Del Agua Subterránea:* , p. 48.

Consejo de Recursos Minerales Carta Moctezuma F14-A63.:

Custodio, E., and Llamas, M.R., 1996, *Hidrología subterránea* (Omega, Ed.): 1968 p.

D’Odorico P, F.L., Porporato, A., Ridolfi, L., Rinaldo, A., and Rodriguez-Iturbe, I., 2010, *Ecohydrology of terrestrial Ecosystems*. *BioScience* 60: 898-907:

Davis, J.A., Kerezszy, A. Nicol, S., 2017, *Springs: Conserving perennial water is critical in arid landscapes:*

*Biological Conservation*, v. 211, p. 30–35.

Delgado, M.G., Pournavab, R.F., and Domínguez, L.R., 2016, *Composición florística y caracterización estructural del matorral desértico micrófilo en Galeana , Nuevo León* *Floristic composition and y structural characterization of the microphyllic desert scrub*

in Galeana , Nuevo León State: v. 8, p. 83–98.

DOF, 2015a, ACUERDO por el que se da a conocer el resultado de los estudios técnicos de aguas nacionales subterráneas del acuífero Villa de Arista, clave 2408, en el Estado de San Luis Potosí, Región Hidrológico-Administrativa Cuencas Centrales del Norte.; [http://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5404129&fecha=17/08/2015](http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5404129&fecha=17/08/2015).

DOF, 2015b, NORMA Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, Conservación del recurso agua-Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales.; [http://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5387027&fecha=27/03/2015](http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5387027&fecha=27/03/2015).

Edmunds, W.M., Cook, J.M., and Mile, D.L., 1986, Lithium mobility and cycling dilute continental water: Water-Rock Interaction, v. V, Proc. I, p. 183–187.

Edmunds, M., and Smedley, P., 2005, Fluoride in natural waters –occurrence, controls and health aspects, en Selinus, O., Alloway, B., Centeno, J.A., Finkleman, R.B., Fuge, R., Lindh, U., Smedley, P. (eds.), *Essentials of Medical Geology: Impacts of the Natural Environment on Public Health*: Elsevier Academic Press, p. 812.

Edmunds, W.M., and Smedley, P.L., 2000, Residence time indicators in groundwater : the East Midlands Triassic sandstone aquifer: v. 15, p. 737–752.

Ergorov, S.V. y J.R.L., 1967, *Hidrogeología de Cuba*” INRH, ICRM, La Habana, 84 Págs:

Ezcurra, E., 2006, *Global desert Outlook*: 148 p., <https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=EEz8yAMp7SAC&oi=fnd&pg=PR4&dq=ezcurra+2006+global+desert+UNEP&ots=6KBMW-uuq7R&sig=NtZCmRC-lWFSVwC1uG75b7P5lJ0#v=onepage&q=ezcurra+2006+global+desert+UNEP&f=false>.

Fachinello, J.C., Pretto, A., Galarça, S.P., and Betemps, D.L., 2015, Performance of eight Prunus rootstocks for peach in South Brazil: *Acta Horticulturae*, v. 1084, p. 85–88, doi:10.17660/ActaHortic.2015.1084.9.

FAO, 2019, *Water governance*.; <http://www.fao.org/land-water/water/watergovernance/es/>.

Figuroa, H.E., Ramírez, A.O., González, E.J.M., Pérez, S.F., and Espinosa, T.L.E., 2012, ANÁLISIS DEL DESEMPLEO, LA MIGRACIÓN Y LA POBREZA EN MÉXICO: *Revista Mexicana de Agronegocios*. Sociedad Mexicana de Administración Agropecuaria A.C.

Torreón, México, v. 30, p. 835–847.

Flores F., J.L., 1985, Evaluación de tierras en el área de estudio del CREZAS-CP. Tesis profesional. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 407 p.:

Flores, A.G., Torreblanca, C.T., Pérez, V.M.A., Carrizales, A.A., and Soto, A.R.G., 2003, Carta Geoquímica por arsénico Venado F14-A53 San Luis Potosí. Secretaría de Economía. Escala 1:50,000; [https://mapserver.sgm.gob.mx/Cartas\\_Online/geoquimica/1409\\_F14-A53\\_as.pdf](https://mapserver.sgm.gob.mx/Cartas_Online/geoquimica/1409_F14-A53_as.pdf).

Folke, C., Carpenter, S., Walker, B., Scheffer, M., Elmqvist, T., Gunderson, L., and Holling, C.S., 2004, Regime Shifts, Resilience, and Biodiversity in Ecosystem Management. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 35: 557-581:

Freeze, R.A., and Cherry, J.A., 1979, *Groundwater* (Prentice-Hall, Ed.): Inc. Englewood Cliffs, NJ, 604 p., <http://hydrogeologistswithoutborders.org/wordpress/1979-espanol/>.

Gandhi, G.M., Parthiban, S., Thummalu, N., and Christy, A., 2015, Ndvi: Vegetation Change Detection Using Remote Sensing and Gis – A Case Study of Vellore District. *Procedia Computer Science*, 57, 1199-1210. doi:10.1016/j.procs.2015.07.415; [https://www.researchgate.net/publication/273520952\\_Ndvi\\_Vegetation\\_change\\_detection\\_using\\_remote\\_sensing\\_and\\_gis\\_-\\_A\\_case\\_study\\_of\\_Vellore\\_District](https://www.researchgate.net/publication/273520952_Ndvi_Vegetation_change_detection_using_remote_sensing_and_gis_-_A_case_study_of_Vellore_District).

Gao, Y., Zhong, B., Yue, H., Wu, B., and Cao, S., 2011, Un umbral de degradación para la pérdida irreversible de la productividad del suelo: un estudio de caso a largo plazo en China: *J. Appl. Ecol.*, v. 48, p. 1145–1154.

García, E., 2004, Modificación al sistema de clasificación climática de Köppen: 90 p.

Gilbert, R., 1987, *Statistical Methods for Environmental Pollution Monitoring*: 239 p.

Global Water Partnership, 2002, *Introducing Effective Water Governance*, mimeo: mimeo,.

Gobierno del estado de San Luis Potosí, 2015, *Agua y reservas hidrológicas*, Plan Estatal de Desarrollo 2015-2021.:

González-Abraham, A., Fagundo-Castillo, J.R., Carrillo-Rivera, J.J., and Rodríguez-Estrella, R., 2012, *Geoquímica de los sistemas de flujo de agua subterránea en rocas sedimentarias y rocas volcánicas de Loreto, BCS, México*: Boletín de la Sociedad

Geologica Mexicana, v. 64, p. 319–333, doi:10.1155/2012/604543.

Gutiérrez, R.R., 2008, EL DERECHO AL AGUA Y SU RELACIÓN CON EL MEDIO AMBIENTE: Biblioteca Jurídica Virtual del Instituto de Investigaciones Jurídicas de la UNAM, p. 123–143, [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-91932008000100003](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-91932008000100003).

Gyssels, G., Poesen, J., and Liu, G., 2006, Effects of cereal roots on detachment rates of single- and double-drilled topsoils during concentrated flow.: *European Journal of Soil Science*, v. 57, p. 381–391.

Helsel, D.R., and Hirsch, R.M., 2002, Hydrologic Analysis and Interpretation, in *Statistical Methods in Water Resources*, p. 503.

Hunt, R.E., Everitt, J.H., Ritchie, M., Morans, S., Booth, T., Anderson, G., Clark, P.E., and Seyfried, M.S., 2003, Applications and Research Using Remote Sensing for Range- land Management. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 69: 675-693:

Hunter, M.L. et al., 2017, Conserving small natural features with large ecological roles: A synthetic overview: *Biological Conservation*, v. 211, p. 88–95, doi:10.1016/j.biocon.2016.12.020.

Ibañez, E.B., 2017, Identificación de procesos hidrogeoquímicos aplicando modelación inversa en el acuífero Soconusco, Chiapas.; <https://repositorio.ipicyt.edu.mx/handle/11627/3252>.

Imeson, A.C., and Prinsen, H.A.M., 2004, Vegetation patterns as biological indicators for identifying runoff and sediment source and sink areas for semi-arid landscapes in Spain: v. 104, p. 333–342, doi:10.1016/j.agee.2004.01.033.

INEGI, 2015a, Encuesta intercensal 2015: Principales resultados.; [http://www.beta.inegi.org.mx/contenidos/proyectos/enchogares/especiales/intercensal/2015/doc/eic\\_2015\\_presentacion.pdf](http://www.beta.inegi.org.mx/contenidos/proyectos/enchogares/especiales/intercensal/2015/doc/eic_2015_presentacion.pdf).

INEGI, 2015b, Panorama sociodemográfico de San Luis Potosí.:

INEGI, 2010, Síntesis de Información Geográfica del Estado: Livestock Research for Rural Development, v. 1, p. 620, doi:10.1145/2505515.2507827.

Jansky, L., Sklarew, D.M., and Uitto, J.I., 2005, Enhancing public participation and governance in water resources management: Enhancing participation and governance

in water resources management: conventional approaches and information technology. United Nations Unive,.

Jiang, D., Jiang, Z., and Hou, X., 1992, A study on process of soil and water conservation and disposition model of its control measures in loess hilly regions: *Journal of Soil and Water Conservation*, v. 6, p. 14–17.

Jiménez-Cisneros, B.E., 2001, *La contaminación ambiental en México: causas, efectos y tecnología apropiada*. México: Limusa:

Kehew, A., 2000, *Applied Chemical Hidrogeology*:

Liu, J., Gao, G., Wang, S., Jiao, L., Wu, X., and Fu, B., 2018, The effects of vegetation on runoff and soil loss: Multidimensional structure analysis and scale characteristics: *Journal of Geographical Sciences*, v. 28, p. 59–78, doi:10.1007/s11442-018-1459-z.

Lloyd, J. w., and Heathcote, J.A., 1985, *Natural inorganic hydrochemistry in relation to groundwater*: 295 p.

López-Ramos, 1979, *Estratigrafía Cretácica y Tectónica de una porción del centro y noreste de México*:

Ludwig, J., Tongway, D., Basting, G., and James, C., 2004, Monitoring ecological indicators of rangeland functional integrity and their relation to biodiversity at local to regional scales. *Austral Ecology*, 29: 108-120:

Mata, J., 2015, *Estructura y composición florística del matorral desértico rosetófilo del noreste de México*: , p. 67–74.

Medellín-Milán, P., Alfaro-De la Torre, M.C., De Lira-Santillán, A.G., Nieto-Ahumada, B., and Sarabia-

Meléndez, I., 1993, Fluoride in drinking water its correlation with parameters of the aquifer and effect on dental health in the City of San Luis Potosí, México.: *Proceedings of Water Quality Technology Conference, American Water Works Association 2*, p. 1011–1024.

Mendoza-Maya, A.K., Moreno-Bedmar, J.A., and Chávez-Cabello, G., 2017, Amonites del Aptiano superior de la Formación La Peña de la sección de Los Chorros , Coahuila , noreste de México: *Paleontología Mexicana*, v. 6, p. 43–49.

Meneses-Tovar, C.L., 2011, El índice normalizado diferencial de la vegetación como indicador de la vegetación del bosque: v. 62, p. 39–46.

Metcalf y Eddy, I., 1996, Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización. (3ra. ed., Vol. 1). México: Mc Graw Hill:

Miró, J., Estrela, M.J., Pastor, F., and Millán, M., 2010, ANÁLISIS COMPARATIVO DE TENDENCIAS EN LA PRECIPITACIÓN, POR DISTINTOS INPUTS, ENTRE LOS DOMINIOS HIDROLÓGICOS DEL SEGURA Y DEL JÚCAR (1958-2008): Investigaciones Geográficas, v. 49, p. 129–157.

Monforte, G.G., and Cantú, M.P.C., 2009, Escenario Del Agua En Mexico: Cultura Científica y Tecnológica, p. 31–40, <http://erevistas.uacj.mx/ojs/index.php/culcyt/article/view/356/336>.

Montejano, A.R., 1994, Moctezuma. Pulso Diario de San Luis: Livestock Research for Rural Development, v. 6, p. 3C, doi:10.1145/2505515.2507827.

Nakamura, T., 2006, Development of decision-making indicators for ecosystem-based river basin management: Hydrological Processes, v. 20, p. 1293–1308, doi:10.1002/hyp.6091.

National Academy of Sciences, 1979, Geochemistry of water in relation to cardiovascular disease, <https://books.google.com.mx/>

Naumburg, E., Mata-gonzalez, R., Hunter, R.G., and Martin, D.W., 2005, Phreatophytic Vegetation and Groundwater Fluctuations : A Review of Current Research and Application of Ecosystem Response Modeling with an Emphasis on Great Basin Vegetation: v. 35, p. 726–740, doi:10.1007/s00267-004-0194-7.

Nickson, R.T., McArthur, J.M., Ravenscroft, P., Burgess, W.G., and Ahmed, K.M., 2000, Mechanism of arsenic release to groundwater , Bangladesh and West Bengal: Applied Geochemistry, v. 15, p. 403–413.

Nieto-Samaniego, Á.F., Alaniz-Álvarez, S.A., and Camprubí Cano, A., 2005, La Mesa Central de México: estratigrafía, estructura y evolución tectónica cenozoica: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, v. 57, p. 285–318, doi:10.18268/bsgm2005v57n3a3.

Noy-Meir, I., 1973, Desert Ecosystems: Environment and producers. Annual Review of

Ecology and Systematics 4: 25-51:

Olvera, C.A., and González, M.P., 2004, Carta Geoquímica por arsénico Moctezuma F14-A63 San Luis Potosí. Secretaría de Economía. Escala 1:50,000.:

OMS, 2017, El mercurio y la salud:, <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/mercury-and-health>.

ONU, 2016, Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe: 50 p., doi:10.1017/CBO9781107415324.004.

ONU, 2017, Agua: Asuntos que nos importan, <http://www.un.org/es/sections/issues-depth/water/index.html>.

ONU MÉXICO Objetivos del Desarrollo Sostenible:, [www.onu.org.mx/agenda-2030/objetivos-del-desarrollo-sostenible/](http://www.onu.org.mx/agenda-2030/objetivos-del-desarrollo-sostenible/) (accessed May 2019).

Ortega-guerrero, M.A., 2009, Presencia, distribución, hidrogeoquímica y origen de arsénico, fluoruro y otros elementos traza disueltos en agua subterránea, a escala de cuenca hidrológica tributaria de Lerma-Chapala, México: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v. 26, p. 143-161.

Ortíz, E., 2008, Características edafológicas, fisiográficas, climáticas e hidrográficas de México.: Instituto Nacional de Estadística y Geografía., p. 30, doi:10.1007/s10578-017-0774-4.

Pabón, C.A., 2018, Apropiación social del conocimiento : una aproximación teórica y perspectivas para Colombia Social: Educación y humanismo, v. 20, p. 116-139.

Patten, D.T., Rouse, L., and Stromberg, J.C., 2007, Isolated spring wetlands in the Great Basin and Mojave deserts, USA: potential response of vegetation to groundwater withdrawal: Environmental Management, p. 398-413, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18060450>.

Pedraza M., J.F., 1995, Sinopsis histórica de los municipios del estado de San Luis Potosí. Municipio de: Moctezuma:, doi:10.1145/2505515.2507827.

Pekdeger, A., Özgür, N., and J., S.H., 1992, Hydrogeochemistry of fluorine in shallow aqueous systems of the Gölcük area, SW Turkey: Institut für Geologie, Geophysik und Geoinformatik der Freien Universität Berlin, Germany, v. 1.

Peñuela-Arévalo, L.A., and Carrillo-Rivera, J.J., 2013a, Definición de zonas de recarga y descarga de agua subterránea a partir de indicadores superficiales: Centro-sur de la Mesa Central, México: *Investigaciones Geograficas*, v. 81, p. 18–32, doi:10.14350/rig.30518.

Peñuela-Arévalo, L.A., and Carrillo-Rivera, J.J., 2013b, Discharge areas as a useful tool for understanding recharge areas, study case: Mexico Catchment: *Environmental Earth Sciences*, v. 68, p. 999–1013, doi:10.1007/s12665-012-1803-z.

Petra-Micu, I., and Estrada-Avilés, A., 2015, El pensamiento mágico: diseño y validación de un instrumento: *Investigación en Educación Médica*, v. 3, p. 28–33, doi:10.1016/s2007-5057(14)72722-x.

Price, M., 2003, *AGUA SUBTERRANEA* (LIMUSA, Ed.): México, 341 p.

Raisz, E., 1959, *Lanforms of Mexico*: Cambridge Mass. Mapa con texto, escala 1:3,000,000 aprox:

Raymond, A.E., and Merton, L., 1957, The step-point method of sampling. A practical tool in range research: *Journal of Range Management*, v. 10, p. 208–212.

Re, V., 2015, Incorporating the social dimension into hydrogeochemical investigations for rural development : the Bir Al-Nas approach for socio-hydrogeology: *Hydrogeology Journal*, p. 1293–1304, doi:10.1007/s10040-015-1284-8.

Reynolds JF, FT Maestre, E Huber-Sannwald, and J Herrick, P.K., 2005, Aspectos socioeconómicos y biofísicos de la desertificación. *Ecosistemas* 14: 3-21:

Rzedowski, J., 1965, *Vegetación del estado de San Luis Potosí*: 228 p.

Sahuquillo, A., 2009, La gestión de las aguas subterráneas (Segunda parte): *Tecnología del Agua*, v. 29, p. 54–67, doi:10.1371/journal.pone.0142994.

Sánchez, J.A., Álvarez, T., Pachecho, J.G., Carrillo, L., and Amílcar, G.R., 2016, Calidad del agua subterránea: acuífero sur de Quintana Roo, México: *Tecnología y Ciencias del Agua*, v. VII, p. 75–96.

Sasaki, T., Furukawa, T., Iwasaki, Y., Seto, M., and Mori, A.S., 2015, Perspectives for ecosystem management based on ecosystem resilience and ecological thresholds against multiple and stochastic disturbances: *Ecological Indicators*, v. 57, p. 395–408, doi:10.1016/j.ecolind.2015.05.019.

Sawyer, C., McCarty, P., & Parkin, G., 2001, *Química para Ingeniería Ambiental* (4a. ed.). Colombia: Mc Graw Hill. Schoeller,:

Scheffer, M., Bascompte, J., Brock, W., Brovkin, V., Carpenter, S., and Dakos, V., 2009, Early warnings of critical transitions. *Nature*, 461: 53-59:

SEDESOL, 2018, Informe anual sobre la situación de pobreza y rezago social 2018 Silao: , p. 4, [www.gob.mx/sedesol](http://www.gob.mx/sedesol).

SEMARNAT, 2018, CONAGUA, hacia una gestión integrada y sustentable del agua; <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/conagua-hacia-una-gestion-integrada-y-sustentable-del-agua> (accessed May 2019).

Servicio Geológico Mexicano, 2005a, INVENTARIO FÍSICO:

Servicio Geológico Mexicano, 2005b, Inventario físico de los recursos minerales del municipio de Venado, San Luis Potosí.:

Sevillano, L., and Val, E. del, 2014, Identificación de estrategias para controlar el crecimiento poblacional de la especie invasora *Tamarix ramosissima* (Tamaricaceae) en el norte de México: Centro de Investigaciones en Ecosistemas-UNAM,.

Smedley, P.L., and GKinniburgh, D., 2002, A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters: *Applied Geochemistry*, v. 17, p. 517–568, doi:[https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(02\)00018-5](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(02)00018-5).

SMET, J., and WIJK, C., 2002, *Small Community Water Supplies: Technology, People and Partnership*. Delft, the Netherlands. IRC International Water and Sanitation Centre. (Technical paper Series 40).:

Søgaard, E.G., and Madsen, H.T., 2013, *Groundwater Chemistry and Treatment: Application to Danish Waterworks: Water Treatment*, p. 223–246, doi:10.5772/2883.

Sonney, R., and Sonney, R., 2014, Groundwater flow , heat and mass transport in geothermal systems of a Central Alpine Massif . The Groundwater flow , heat and mass transport in geothermal systems of a Central Alpine Massif . The cases of Lavey-les-Bains , Saint-Gervais-les-Bains and Val :

Springer, A., Stevens, L., Anderson, D., Parnell, R., Kreamer, D., Levin, L., and Flora, S., 2008, A comprehensive springs classification system: integrating geomorphic,

hydrogeochemical, and ecological criteria: Aridland springs in North America: ecology and conservation, p. 49–75, <http://docs.springstewardship.org/PDF/SpringerEtAlClassification.pdf>.

Stevanovic, K.&, 2011, Groundwater Hydrology of Springs;, doi:10.1360/zd-2013-43-6-1064.

Taylor, S., and Bogdan, R., 1984, Introducción a los métodos cualitativos de investigación:, [https://iessb.files.wordpress.com/2015/07/05\\_taylor\\_mc3a9todos.pdf](https://iessb.files.wordpress.com/2015/07/05_taylor_mc3a9todos.pdf).

Tongway, D.J., Cortina, J., and Mestre, F.T., 2004, Heterogeneidad espacial y gestión de medios semiáridos. Ecosistemas, 13: 2-15:

Tóth, J., 1999, Groundwater as a geologic agent: An overview of the causes, processes, and manifestations: Hydrogeology Journal, v. 7, p. 1–14, doi:10.1007/s100400050176.

Tóth, J., 2009, GROUNDWATER DISCHARGE : A COMMON GENERATOR OF DIVERSE GEOLOGIC AND MORPHOLOGIC PHENOMENA: v. 6024, doi:10.1080/02626667109493029.

Tristán, M., 2008, Evolución tectono-volcánica durante el paleógeno en la porción sur-oriental de la mesa central.

UNESCO, 2017, Los recursos de agua subterránea del mundo están sufriendo los efectos de una gobernanza insuficiente, dicen los expertos:, [http://www.unesco.org/new/es/media-services/single-view-tv-release/news/los\\_recursos\\_de\\_agua\\_subterránea\\_del\\_mundo\\_estan\\_sufriendo/](http://www.unesco.org/new/es/media-services/single-view-tv-release/news/los_recursos_de_agua_subterránea_del_mundo_estan_sufriendo/).

Vargas, V.S., 1998, El uso del agua: un enfoque crítico de la relación población-ambiente-recursos: Papeles de Población, v. 4, p. 177–192.

Velez, O.M. V., 1999, Hidraulica de aguas subterranas: , p. 313, doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.09.075>.

Worldometers, 2019, Población mundiao:, <https://www.worldometers.info/es/>.

WWAP, 2015, Informe de las Naciones Unidas sobre los recursos hídricos en el mundo 2015: Agua para un mundo sostenible: UN WATER, United Nations Educational Scientific and Cultural Organization, p. 1-12, <http://www.unesco.org/water/wwap%0AAWWDR>.

Zhang, Y., Xu, X., Li, Z., Liu, M., Xu, C., Zhang, R., and Luo, W., 2019, Effects of vegetation restoration on soil quality in degraded karst landscapes of southwest China: *Science of the Total Environment*, v. 650, p. 2657-2665, doi:10.1016/j.scitotenv.2018.09.372.

## Anexo 1.

ID-CAMP O	ID-LABORATO RIO	FECHA DE TOMA DE MUEST RA	LOCALID AD	TIPO DE APROVECHAMIE NTO	TIPO DE AGUA SUPERFICIAL/SUBTERR ÁNEA	USO	X- UTM- WGS8 4	Y- UTM- WGS8 4	Z-	PROFUNDID AD (m)
1	346	08-sep- 18	Las Cruces	Manantial	Subterránea	Agrícola	26001 3	25157 85	193 7	0.4
2	347	08-sep- 18	Ranchería Juárez	Noria	Subterránea	Doméstico, abrevadero y público-urbano	26442 4	25166 22	191 8	17.14
3	348	08-sep- 18	Ranchería Juárez	Bordo	Superficial	Abrevadero	26434 9	25159 44	191 5	0.3
5	349	08-sep- 18	Santa Teresa	Noria	Subterránea	Doméstico	27652 4	25186 01	185 5	10.37
6	350	08-sep- 18	Santa Rita	Noria	Subterránea	Abrevadero y, doméstico	27871 2	25188 15	183 5	11.69
7	351	08-sep- 18	Santa Catarina	Pozo	Subterránea	Público- urbano y doméstico	28159 6	25173 92	179 5	15
8	352	08-sep- 18	Moctezum a	Manantial	Subterránea	Público- urbano y recreativo	28484 9	25168 63	175 2	0.8
9	353	08-sep- 18	Moctezum a	Manantial	Subterránea	Público- urbano y recreativo	28440 5	25167 39	175 7	1.5
10	354	08-sep- 18	El Picacho	Pozo	Subterránea	Público-urbano y doméstico	28410 0	25106 69	179 0	300
11	439	28-sep- 18	San José del Grito	Pozo	Subterránea	Público- urbano	28167 3	25081 94	182 3	
12	440	28-sep- 18	San José del Grito	Noria	Subterránea	Abrevadero	28166 8	25081 84	182 3	17
13	441	28-sep- 18	San José del Grito	Noria	Subterránea	Abrevadero y doméstico	28208 0	25081 36	181 8	10.25
14	442	28-sep- 18	San José del Grito	Noria	Subterránea	Abrevadero	28129 5	25081 66	182 7	8.9
15	443	28-sep- 18	El Pedernal	Noria	Subterránea	Abrevadero	27687 5	25090 92	192 7	16.07

<b>16</b>	444	28-sep-18	San Ignacio/Los Ramírez	Pozo	Subterránea	S/U	27267 6	25104 84	192 6	
<b>17</b>	445	28-sep-18	Las Alteñas	Noria	Subterránea	Abrevadero y doméstico	27220 5	25107 27	192 6	17.18
<b>18</b>	446	28-sep-18	Los Ramírez	Bordo	Superficial	Abrevadero	27316 0	25093 39	194 9	0.8
<b>8A</b>	515	03-nov-18	Ojo de Agua	Manantial	Subterránea	Público- urbano y recreativo	28484 9	25168 63	175 2	0.8
<b>9A</b>	516	03-nov-18	Ojo de Agua	Manantial	Subterránea	Público- urbano y recreativo	28440 5	25167 39	175 7	0.5
<b>10A</b>	517	03-nov-18	El Picacho	Pozo	Subterránea	Público- urbano y doméstico	28410 0	25106 73	179 4	350
<b>19</b>	518	03-nov-18	El Garabatillo	Pozo	Subterránea	Público-urbano	28701 7	25219 38	176 9	250
<b>20</b>	519	03-nov-18	Bloquera	Pozo	Subterránea	Agrícola e industrial	28709 9	25192 08	172 4	70
<b>21</b>	520	03-nov-18	Moctezuma	Noria	Subterránea	Abrevadero y agrícola	28734 3	25188 49	172 1	22.86
<b>22</b>	521	03-nov-18	La Presa	Noria	Subterránea	Abrevadero	28449 4	25099 81	178 3	21
<b>23</b>	522	03-nov-18	Morterillos	Pozo	Subterránea	Público-urbano	28728 2	25126 27	173 9	303
<b>1A</b>	37	09-feb-19	Las Cruces	Manantial	Subterránea	Agrícola	26001 3	25157 85	193 7	1.2
<b>2A</b>	38	09-feb-19	Ranchería Juárez	Noria	Subterránea	Doméstico, abrevadero y público-urbano	26442 4	25166 22	191 8	17
<b>3A</b>	39	09-feb-19	Ranchería Juárez	Bordo	Superficial	Abrevadero	26434 9	25159 44	191 5	0.3
<b>4</b>	40	09-feb-19	Ranchería Juárez	Pozo	Subterránea	Público-urbano y doméstico	26434 9	25159 42	191 5	130
<b>24</b>	41	09-feb-19	Ejido Providencia	Noria	Subterránea	Abrevadero	26736 8	25166 87	190 5	21.9
<b>25</b>	42	09-feb-19	Los Tajos	Noria	Subterránea	Público-urbano	27009 2	25150 79	188 9	23.21

<b>5A</b>	43	09-feb-19	santa Teresa	Noria	Subterránea	Doméstico	27652 4	25186 01	185 5	9.89
<b>8B</b>	54	02-mar-19	Ojo de Agua	Manantial	Subterránea	Público-urbano y recreativo	28484 9	25168 63	175 2	0.8
<b>9B</b>	55	02-mar-19	Ojo de Agua	Manantial	Subterránea	Público-urbano y recreativo	28440 5	25167 39	175 7	1.5
<b>10B</b>	56	02-mar-19	El Picacho	Pozo		Público-urbano y doméstico	28410 0	25106 69	179 0	300
<b>19A</b>	57	02-mar-19	Garabatillo	Pozo	Subterránea	Público-urbano	28701 7	25219 38	176 9	250
<b>20A</b>	58	02-mar-19	Bloquera	Pozo	Subterránea	Agrícola e industrial	28709 9	25192 08	172 4	70
<b>21A</b>	59	02-mar-19	Moctezuma	Noria	Subterránea	Abrevadero y agrícola	28734 3	25188 49	172 1	22.86
<b>23A</b>	60	02-mar-19	Morterillos	Pozo	Subterránea	Público-urbano	28728 2	25126 27	173 9	303

## Anexo 2.

Clave	Localidad	Fecha	Geology	pH	SDT	Na	Cl	SO <sub>4</sub>	F	NO <sub>3</sub>
Límites permisibles (mg/L)				6.5-8.5	1000	200	250	400	1.5	44.2
1	Las Cruces	08-sep-18	Manantial	7.22	478	77.11814	64.320	83.610	0.6	2.2
2	Ranchería Juárez	08-sep-18	Noria	7.27	252	19.46473	32.160	2.668	0.32	3.3
3	Ranchería Juárez	08-sep-18	Bordo	9.01	224	56.74662	14.293	101.386	0.26	35.8
5	Santa Teresa	08-sep-18	Noria	7.79	468	175.9469	21.440	88.058	2.2	7.2
6	Santa Rita	08-sep-18	Noria	7.29	432	109.89007	105.216	37.358	2.07	10.6
7	Santa Catarina	08-sep-18	Pozo	7.06	420	88.57781	120.998	72.047	0.82	3.7
8	Ojo de Agua	08-sep-18	Manantial	6.99	485	106.31144	126.259	104.958	1.09	2.9
9	Ojo de Agua	08-sep-18	Manantial	7.22	479	99.45364	103.627	152.100	1.13	3.5
10	El Picacho	08-sep-18	Pozo	6.95	523	102.47551	73.651	154.768	0.99	2.9
11	San José del Grito	28-sep-18	Pozo	7.29	915	149.11966	63.129	197.463	1.45	0
12	San José del Grito	28-sep-18	Noria	7.78	940	151.09545	68.390	293.526	1.16	9.5
13	San José del Grito	28-sep-18	Noria	7.85	612	91.32046	63.129	98.731	0.96	7.8
14	San José del Grito	28-sep-18	Noria	7.33	728	98.53793	53.600	133.421	1.19	6.6
15	El Pedernal	28-sep-18	Noria	7.32	1797	134.03706	63.129	774.558	2.04	8.9
16	San Ignacio/Los Ramírez	28-sep-18	Pozo	8.13	397	77.91149	85.761	127.194	1.31	1.2
17	Las Alteñas	28-sep-18	Noria	7.36	1679	173.55673	220.953	326.152	1.43	6.3
18	Los Ramírez	28-sep-18	Bordo	10.31	48	3.46365	26.304	9.370	0.21	0.9
8-A	Ojo de Agua	03-nov-18	Manantial	7.47	607	74.06661	78.685	68.646	1.27	2.3
9-A	Ojo de Agua	03-nov-18	Manantial	7.66	619	80.71289	78.685	132.166	1.05	2.6
10-A	El Picacho	03-nov-18	Pozo	7.26	710	89.57335	55.841	186.747	1.03	2.4

19	El Garabatlillo	03-nov-18	Pozo	7.4	1037	166.63338	190.367	215.120	1.87	3.6
20	Bloquera	03-nov-18	Pozo	7.44	1031	171.3901	158.639	219.525	1.53	3.5
21	Noria, Moctezuma	03-nov-18	Noria	7.68	1062	166.86847	152.293	190.636	1.36	3.2
22	La Presa	03-nov-18	Pozo	7.44	1533	149.78531	184.021	220.105	0.67	23.5
23	Morterillos	03-nov-18	Pozo	7.26	1274	132.13259	114.220	406.180	0.61	13.6
1-A	Las Cruces	09-feb-19	Manantial	6.99	528	70.91101	65.228	95	0.72	2.2
2-A	Ranchería Juárez	09-feb-19	Noria	7.36	310	18.74807	28.36	20	0.19	4.2
3-A	Ranchería Juárez	09-feb-19	Bordo	7.69	514	112.5499	172.996	185	0.52	4.3
4	Ranchería Juárez	09-feb-19	Pozo	6.88	1096	206.90841	269.42	150	0.93	3.3
24	Ejido Providencia	09-feb-19	Noria	6.91	738	58.54867	205.61	135	0.49	3.9
25	Los Tajos	09-feb-19	Noria	7.13	1514	210.68047	413.583333	400	0.83	11.4
5-A	Santa Teresa	09-feb-19	Noria	7.5	716	155.60041	36.868	50	2.7	8.7
8-B	Ojo de Agua	02-mar-19	Manantial	7.08	660	73.02749	92.90736	180	1.14	3.1
9-B	Ojo de Agua	02-mar-19	Manantial	7.24	747	73.68881	79.408	125	1.18	2.3
10-B	El Picacho	02-mar-19	Pozo	7.05	672	78.88993	67.89384	150	0.89	3.3
19-A	El Garabatlillo	02-mar-19	Pozo	7.11	1260	188.97614	258.076	375	1.61	5.5
20-A	Bloquera	02-mar-19	Pozo	7.11	1182	181.89406	294.944	225	1.36	5.1
21-A	Noria, Moctezuma	02-mar-19	Noria	7.3	1041	178.44396	226.88	175	1.61	4.1
23-A	Morterillos	02-mar-19	Pozo	7.03	1359	158.04637	242.98848	250	0.72	33.3

Sample ID	Location	Fecha	Geology	Al_diss ug/L	As_diss ug/L	Ba ug/L	Cd_diss ug/L	Cu_diss ug/L	Fe_diss ug/L	Hg_diss ug/L
Límites permisibles				200	50	700	5	2000	300	1
1	Las Cruces	08-sep-18	Manantial	<1.7859	16.3318	54.3443	0.0289	0.2736	8.7962	0.7221
2	Ranchería Juárez	08-sep-18	Noria	2.0114	6.6206	108.739	<0.0077	7.2468	5.1784	0.6435
3	Ranchería Juárez	08-sep-18	Bordo	612.9821	11.4372	15.8893	0.7322	9.5331	205.4980	0.8363
5	Santa Teresa	08-sep-18	Noria	13.7808	37.1688	48.3035	0.3240	0.6469	7.7305	0.6576
6	Santa Rita	08-sep-18	Noria	<3.8999	25.1274	75.7682	0.0414	<0.212	4.8785	0.6811
7	Santa Catarina	08-sep-18	Pozo	<4.416	9.5323	61.2857	0.0508	<0.437	6.9899	0.6491
8	Ojo de Agua	08-sep-18	Manantial	1.6000	6.8471	49.9457	0.0060	<0.463	9.5477	0.6328
9	Ojo de Agua	08-sep-18	Manantial	<3.795	5.8919	43.5259	<0.005	<0.409	7.8233	0.6406
10	El Picacho	08-sep-18	Pozo	<2.592	6.0447	73.9589	0.0946	0.1015	22.0065	0.6779
11	San José del Grito	28-sep-18	Pozo	1.9788	19.5046	37.9309	<0.222	<0.482	9.2994	0.7734
12	San José del Grito	28-sep-18	Noria	4.1426	8.3575	31.7045	1.111	<0.256	9.8643	0.7658
13	San José del Grito	28-sep-18	Noria	12.9073	6.9111	120.5783	<0.252	<1.374	6.2058	0.7235
14	San José del Grito	28-sep-18	Noria	2.1029	7.3836	141.2542	328.6607	0.6464	7.9456	0.7339
15	El Pedernal	28-sep-18	Noria	5.1996	2.5586	55.1503	2.4596	0.2999	53.0429	0.7719
16	San Ignacio/Los Ramírez	28-sep-18	Pozo	1.9107	2.1375	171.7762	0.3374	<1.170	292.0151	0.7430
17	Las Alteñas	28-sep-18	Noria	3.1880	6.2878	35.4445	122.7007	0.4026	53.8608	1.0687
18	Los Ramírez	28-sep-18	Bordo	86.6853	3.3258	92.5372	3.8513	0.5960	55.8454	0.7372
8-A	Ojo de Agua	03-nov-18	Manantial	2.2471	6.3784	49.3522	<0.271	<1.918	13.2511	0.6740

SampleID	Location	Fecha	Geology	Meas_Hardness mg/L	Mn_diss ug/L	Pb_diss ug/L	Cr_diss ug/L	Zn_diss ug/L
Límites permisibles				500	150	25	50	5000
1	Las Cruces	08-sep-18	Manantial	283.277	1.118	0.178	0.1874	9.6420
2	Ranchería Juárez	08-sep-18	Noria	167.618	0.747	0.185	0.2698	8.9478
3	Ranchería Juárez	08-sep-18	Bordo	89.392	2.616	1.669	1.4386	4.9182
5	Santa Teresa	08-sep-18	Noria	91.213	1.474	0.329	0.8155	6.2876
6	Santa Rita	08-sep-18	Noria	212.002	0.877	0.238	0.3235	6.5102
7	Santa Catarina	08-sep-18	Pozo	278.486	0.739	0.258	0.1562	3.2487
8	Ojo de Agua	08-sep-18	Manantial	317.000	5.401	0.194	0.1619	5.5933
9	Ojo de Agua	08-sep-18	Manantial	301.114	3.393	0.200	0.1692	2.5914
10	El Picacho	08-sep-18	Pozo	336.966	6.678	0.260	0.1613	27.3718
11	San José del Grito	28-sep-18	Pozo	391.845	<0.121	0.184	<0.057	62.9577
12	San José del Grito	28-sep-18	Noria	422.986	0.126	0.165	<0.235	3.4357
13	San José del Grito	28-sep-18	Noria	294.767	0.250	0.072	<0.128	21.6595
14	San José del Grito	28-sep-18	Noria	332.146	<0.025	0.049	<0.005	1.4749
15	El Pedernal	28-sep-18	Noria	747.526	11.102	0.013	<0.554	39.8434
16	San Ignacio/Los Ramírez	28-sep-18	Pozo	188.052	123.987	0.053	<0.744	32.9234
17	Las Alteñas	28-sep-18	Noria	595.210	2.594	0.111	<0.671	61.2298
18	Los Ramírez	28-sep-18	Bordo	56.205	11.665	0.241	<0.752	10.4438
8-A	Ojo de Agua	03-nov-18	Manantial	275.285	4.385	0.117	<0.755	2.3186
9-A	Ojo de Agua	03-nov-18	Manantial	289.516	7.272	0.134	<0.779	1.6632

SampleID	Location	Fecha	Geology	Meas_Hardness mg/L	Mn_diss ug/L	Pb_diss ug/L	Cr_diss ug/L	Zn_diss ug/L
Límites permisibles				500	150	25	50	5000
1	Las Cruces	08-sep-18	Manantial	283.277	1.118	0.178	0.1874	9.6420
2	Ranchería Juárez	08-sep-18	Noria	167.618	0.747	0.185	0.2698	8.9478
3	Ranchería Juárez	08-sep-18	Bordo	89.392	2.616	1.669	1.4386	4.9182
5	Santa Teresa	08-sep-18	Noria	91.213	1.474	0.329	0.8155	6.2876
6	Santa Rita	08-sep-18	Noria	212.002	0.877	0.238	0.3235	6.5102
7	Santa Catarina	08-sep-18	Pozo	278.486	0.739	0.258	0.1562	3.2487
8	Ojo de Agua	08-sep-18	Manantial	317.000	5.401	0.194	0.1619	5.5933
9	Ojo de Agua	08-sep-18	Manantial	301.114	3.393	0.200	0.1692	2.5914
10	El Picacho	08-sep-18	Pozo	336.966	6.678	0.260	0.1613	27.3718
11	San José del Grito	28-sep-18	Pozo	391.845	<0.121	0.184	<0.057	62.9577
12	San José del Grito	28-sep-18	Noria	422.986	0.126	0.165	<0.235	3.4357
13	San José del Grito	28-sep-18	Noria	294.767	0.250	0.072	<0.128	21.6595
14	San José del Grito	28-sep-18	Noria	332.146	<0.025	0.049	<0.005	1.4749
15	El Pedernal	28-sep-18	Noria	747.526	11.102	0.013	<0.554	39.8434
16	San Ignacio/Los Ramírez	28-sep-18	Pozo	188.052	123.987	0.053	<0.744	32.9234
17	Las Alteñas	28-sep-18	Noria	595.210	2.594	0.111	<0.671	61.2298
18	Los Ramírez	28-sep-18	Bordo	56.205	11.665	0.241	<0.752	10.4438
8-A	Ojo de Agua	03-nov-18	Manantial	275.285	4.385	0.117	<0.755	2.3186
9-A	Ojo de Agua	03-nov-18	Manantial	289.516	7.272	0.134	<0.779	1.6632

10-A	El Picacho	03-nov-18	Pozo	336.503	5.050	0.009	<0.825	21.5961
19	El Garabatillo	03-nov-18	Pozo	336.585	2.065	0.061	<0.714	3.9629
20	Bloquera	03-nov-18	Pozo	322.616	<0.026	0.009	<0.652	<0.823
21	Noria, Moctezuma	03-nov-18	Noria	320.711	5.125	0.050	<0.678	8.8909
22	La Presa	03-nov-18	Pozo	450.434	0.281	0.074	<0.067	0.0389
23	Morterillos	03-nov-18	Pozo	464.609	72.333	0.122	<0.502	30.5981
1-A	Las Cruces	09-feb-19	Manantial	271.64	0	1.0535	0	31.095
2-A	Ranchería Juárez	09-feb-19	Noria	180.6986831	1.2585	1.116	0	32.785
3-A	Ranchería Juárez	09-feb-19	Bordo	258.0243002	0.02746			0.33201
4	Ranchería Juárez	09-feb-19	Pozo	381.8958086	88.26	1.3985	0	39.5
24	Ejido Providencia	09-feb-19	Noria	395.5739431	1.0275	1.0635	0	22.375
25	Los Tajos	09-feb-19	Noria	604.7550369	3.5675	1.0415	0	100.615
5-A	Santa Teresa	09-feb-19	Noria	102.7300435	0	0.954	3.152	13.775
8-B	Ojo de Agua	02-mar-19	Manantial	350.2998511	2.238	0.9165	0	8.995
9-B	Ojo de Agua	02-mar-19	Manantial	318.5316675	28.48	1.092	0	34.145
10-B	El Picacho	02-mar-19	Pozo	377.0633023	5.965	1.095	0	43.785
19-A	El Garabatillo	02-mar-19	Pozo	454.67608	4.416	1.3205	0	52.22
20-A	Bloquera	02-mar-19	Pozo	431.7735949	1.168	1.162	0	19.56
21-A	Noria, Moctezuma	02-mar-19	Noria	344.1558271	6.5175	1.05	0	16.2
23-A	Morterillos	02-mar-19	Pozo	490.1644387	8.6285	2.863	0	162.1