



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO
INSTITUTO INTERAMERICANO DE TECNOLOGÍA Y
CIENCIAS DEL AGUA

**ESTUDIO HIDROGEOQUÍMICO DEL
ACUÍFERO VALLE DE SAN JUAN DEL RÍO,
QUERÉTARO**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRÍA EN CIENCIAS DEL AGUA

PRESENTA

MARÍA ELENA GABINA HERNÁNDEZ VENEGAS

DIRECTORA DE TESIS

DRA. MARÍA VICENTA ESTELLER ALBERICH

CODIRECTOR DE TESIS

DR. EN I. JOSÉ LUIS EXPÓSITO CASTILLO



TOLUCA, MÉXICO, NOVIEMBRE DE 2020

CONTENIDO

CAPÍTULO 1. Introducción	1
1.1. Introducción general.....	1
1.2. Justificación	2
1.3. Hipótesis.....	3
1.4. Objetivos	3
1.4.1. Objetivo principal.....	3
1.4.2. Objetivos específicos	3
1.5. Contenido de la tesis	4
CAPÍTULO 2. Marco teórico.....	5
2.1. Hidrogeoquímica.....	5
2.2. Técnicas de estudio de la hidrogeoquímica.....	5
2.3. La hidrogeoquímica en formaciones volcánicas	7
2.4. Problemáticas en relación con la calidad del agua subterránea.....	8
2.4.1. Nitratos.....	9
2.4.2. Fluoruro.....	10
2.4.3. Arsénico	11
2.5. La evaluación del peligro de contaminación como estrategia de protección	12
2.5.1. Métodos para determinar la vulnerabilidad a la contaminación.....	13
2.5.2. Evaluación de fuentes potenciales de contaminación	16
2.6. Estudios hidrogeoquímicos sobre As, F ⁻ y NO ₃ ⁻ en acuíferos de la Faja Volcánica Transmexicana	18
CAPÍTULO 3. Descripción de la zona de estudio	20
3.1. Ubicación y características generales.....	20
3.2. Clima.....	20
3.3. Edafología	23
3.4. Uso de suelo	25
3.5. Geología.....	27
3.6. Hidrología superficial.....	31
3.7. Hidrogeología.....	33
3.8. Hidrogeoquímica.....	36
CAPÍTULO 4. Materiales y métodos	39
4.1. Recopilación, síntesis y análisis de la información.....	40

4.2. Confección de la cartografía de la configuración piezométrica	40
4.3. Confección de la cartografía de peligro de contaminación	42
4.3.1. Revisión de la cartografía de vulnerabilidad.....	42
4.3.2. Actualización del inventario de fuentes potenciales de contaminación y su clasificación mediante el método POSH.....	43
A) <i>Identificación y localización de los focos potenciales de contaminación</i>	43
B) <i>Clasificación de focos potenciales de contaminación</i>	44
4.3.3. Evaluación del peligro de contaminación	45
4.4. Trabajo de campo, muestreo y análisis de laboratorio	46
4.4.1. Visita a campo y selección de los puntos de muestreo.....	46
4.4.2. Muestreo y determinación <i>in situ</i>	49
4.4.3. Análisis de las muestras de agua en laboratorio.....	52
4.5. Caracterización hidrogeoquímica.....	53
4.5.1. Evaluación de los resultados de análisis químicos.....	53
4.5.2. Representación gráfica de las facies hidroquímicas.....	53
4.5.3. Tratamiento estadístico de los parámetros fisicoquímicos.....	55
4.5.4. Identificación de origen y procesos hidrogeoquímicos	55
4.6. Evaluación de la calidad del agua subterránea.....	56
4.6.1. Agua para uso y consumo humano	56
4.6.2. Agua para uso agrícola.....	56
CAPÍTULO 5. Resultados y discusión	58
5.1. Introducción	58
5.2. Cartografía de la configuración piezométrica	59
5.3. Cartografía de peligro de contaminación	61
5.3.1. Evaluación del índice de vulnerabilidad DRASTIC	61
5.3.2. Actualización del inventario de fuentes potenciales de contaminación	63
5.3.3. Evaluación de la cartografía de peligro de contaminación.....	69
5.4. Caracterización hidrogeoquímica.....	71
5.4.1. Balance iónico.....	71
5.4.2. Parámetros <i>in situ</i>	72
5.4.3. Iones mayoritarios.....	74
5.4.4. Iones minoritarios y traza: As, F, SiO ₂ y Sr	77
5.4.5. Facies hidroquímicas.....	78
5.4.6. Correlación de parámetros fisicoquímicos	85
5.4.7. Posibles orígenes y procesos hidrogeoquímicos	91

5.4.8. Secciones geológicas en relación con los pozos que presentan As y F ⁻	102
5.5. Calidad del agua.....	107
5.5.1. Agua destinada al uso público urbano.....	107
5.5.2. Agua destinada al uso agrícola.....	108
CAPÍTULO 6. Conclusiones y recomendaciones	112
6.1. Conclusiones	112
6.2. Recomendaciones.....	114
Referencias.....	115
Anexos	123

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1.	Mapa de localización del acuífero Valle de San Juan del Río.....	21
Figura 3.2.	Mapa climatológico de la zona de estudio.....	23
Figura 3.3.	Mapa de tipos de suelos de la zona de estudio.....	25
Figura 3.4.	Mapa de uso de suelo de la zona de estudio.....	27
Figura 3.5.	Mapa geológico de la zona de estudio.....	31
Figura 3.6.	Mapa hidrográfico de la zona de estudio.....	34
Figura 3.7.	Mapa hidrogeológico de la zona de estudio.....	38
Figura 4.1.	Diseño metodológico de la investigación.....	47
Figura 4.2.	Localización de pozos de muestreo en el año 2011 con respecto al muestreo del 2019.....	50
Figura 4.3.	Toma de muestras y mediciones de parámetros inestables en campo.....	53
Figura 4.4.	Representación gráfica mediante los diagramas a) Piper; b) Schöeller-Berkaloff; c) Stiff.....	59
Figura 5.1.	Mapa hidrogeológico del acuífero Valle de San Juan del Río. Datos piezométricos del año 2019.....	61
Figura 5.2.	Mapa de vulnerabilidad DRASTIC del acuífero Valle de San Juan del Río...	64
Figura 5.3.	Localización de focos potenciales de contaminación existentes en el acuífero Valle de San Juan del Río.....	67
Figura 5.4.	Clasificación de los focos potenciales de contaminación en el acuífero Valle de San Juan del Río.....	69
Figura 5.5.	Cartografía de peligro de contaminación del agua subterránea en el acuífero Valle de San Juan del Río.....	79
Figura 5.6.	Diagramas de Piper de las muestras recolectadas en el acuífero Valle de San Juan del Río. (a) Antes de temporada de lluvias, junio, 2019 (b) Después de temporada de lluvias, diciembre, 2019.....	81
Figura 5.7.	Diagramas de Schöeller-Berkaloff de las muestras recolectadas en el acuífero Valle de San Juan del Río. (a) Antes de temporada de lluvias, junio, 2019 (b) Después de temporada de lluvias, diciembre, 2019.....	82
Figura 5.8.	Distribución espacial de los diagramas de Stiff. Muestreo de junio, 2019.....	83

Figura 5.9.	Distribución espacial de los diagramas de Stiff. Muestreo de diciembre, 2019.....	86
Figura 5.10.	Relación de correlación Temperatura/CE (a) antes de temporada de lluvias, junio, 2019 y (b) después de temporada de lluvias, diciembre, 2019.....	87
Figura 5.11.	Relación de correlación (a) CE /Na ⁺ y (b) CE /Cl ⁻ , antes de temporada de lluvias, junio, 2019. (c) CE /Na ⁺ y (d) CE /Cl ⁻ , después de temporada de lluvias, diciembre, 2019.....	89
Figura 5.12.	Relación de HCO ₃ ⁻ / Ca ²⁺ + Mg ²⁺ . (a) Antes de temporada de lluvias, junio 2019, y (b) después de temporada de lluvias, diciembre, 2019.....	89
Figura 5.13.	Relación de HCO ₃ ⁻ / Na ⁺ + K ⁺ . (a) Antes de temporada de lluvias, junio, 2019 (b) Después de temporada de lluvias, diciembre, 2019.....	90
Figura 5.14.	Relación de Na ⁺ / Cl ⁻ (a) Antes de temporada de lluvias, junio 2019, y (b) después de temporada de lluvias, diciembre, 2019.....	96
Figura 5.15.	Concentración de NO ₃ ⁻ en el AVSJR, sobre mapa de hidrogeología. Temporadas antes (a) y después (b) de lluvias, 2019.....	99
Figura 5.16.	Concentración de F ⁻ en el AVSJR, sobre mapa de geología. Temporadas antes (a) y después (b) de lluvias, 2019.....	100
Figura 5.17.	Concentración de As ⁺ en el AVSJR, sobre mapa de geología. Temporadas antes (a) y después (b) de lluvias, 2019.....	103
Figura 5.18.	Mapa geológico con secciones longitudinales en el acuífero Valle de San Juan del Río.....	104
Figura 5.19.	Sección longitudinal A – A'. Acuífero Valle de San Juan del Río.....	104
Figura 5.20.	Sección longitudinal B – B' Acuífero Valle de San Juan del Río.....	108
Figura 5.21.	Diagramas de Wilcox para la clasificación del agua para uso agrícola. (a) Antes de temporada de lluvias, junio, 2019 (b) Después de temporada de lluvias, diciembre, 2019.....	110
Figura 5.22.	Diagramas de SAR para la clasificación del agua para uso agrícola. (a) Antes de temporada de lluvias, junio, 2019 (b) Después de temporada de lluvias, diciembre, 2019.....	111

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1.	Principales contaminantes que afectan la calidad del agua subterránea.....	9
Tabla 2.2.	Clasificación de fuentes puntuales de contaminación por el método POSH....	17
Tabla 2.3.	Clasificación de fuentes difusa de contaminación por el método POSH.....	17
Tabla 3.1.	Porcentaje de ocupación de los diferentes tipos de suelo	25
Tabla 3.2.	Estudios hidroquímicos realizados en la zona de estudio.....	37
Tabla 4.1.	Niveles piezométricos del agua subterránea ASJR, año 2019 (NP: nivel piezométrico).....	41
Tabla 4.2.	Clasificación de fuentes puntuales de contaminación por el método POSH...	44
Tabla 4.3.	Clasificación de fuentes difusas de contaminación por el método POSH...	45
Tabla 4.4.	Matriz metodológica para confeccionar la cartografía de peligro de contaminación.....	46
Tabla 4.5.	Red primaria de muestreo definida por el COTAS SJR para el año 2011.....	47
Tabla 4.6.	Relación final de los pozos de muestreo del acuífero del Valle de San Juan del Río. Campaña 2019.....	50
Tabla 5.1.	Focos de contaminación para el año 2011 vs. 2019.....	66
Tabla 5.2.	Clasificación de las fuentes potenciales de contaminación del acuífero Valle de San Juan del Río	67
Tabla 5.3.	Valores de error del balance iónico de las muestras de agua recolectadas en diferentes campañas.....	72
Tabla 5.4.	Características fisicoquímicas del agua determinadas in situ, valores mínimos, máximos, promedio y desviación estándar correspondientes a junio y diciembre de 2019.....	74
Tabla 5.5.	Resultados de iones mayoritarios presentes en el agua, valores mínimos, máximos, promedios y desviación estándar. Las concentraciones se reportan en mg /L.....	75
Tabla 5.6.	Clasificación de dureza del agua según OMS (2004).....	77
Tabla 5.7.	Resultados de iones minoritarios y traza presentes en el agua, valores mínimos, máximos, promedios y desviación estándar. Las concentraciones se reportan en mg/L.....	78
Tabla 5.8.	Facie hidroquímica identificada en cada una de las muestras tomadas en junio y diciembre, 2019.....	79

Tabla 5.9.	Matriz de coeficientes de correlación de parámetros fisicoquímicos. Junio 2019.....	86
Tabla 5.10.	Matriz de coeficientes de correlación de parámetros fisicoquímicos. Diciembre 2019.....	86
Tabla 5.11.	Datos de los pozos con altos contenidos de As y F, 2011 vs 2019.....	106
Tabla 5.12.	Resultados de los parámetros con respecto a la NOM-127-SSA1-1994 (SSA1-2005) y la OMS (2008).....	106
Tabla 5.13.	Resultados de los parámetros con respecto a la NOM-127-SSA1-1994 (SSA1-2005) y la OMS (2008).....	107
Tabla 5.14.	Relación de los pozos destinados al uso agrícola y el diagrama de Wilcox...	110

RESUMEN

El estudio hidrogeoquímico del acuífero Valle de San Juan del Río, Querétaro, permitió identificar y evaluar las propiedades fisicoquímicas del agua subterránea, así como establecer posibles procesos que controlan la presencia de los iones de NO_3^- , F^- y As. Cabe mencionar que el acuífero en estudio es de carácter libre y está constituido por dos medios: poroso y fracturado, siendo un acuífero vulcanosedimentario.

Como parte de este estudio, se confeccionó la cartografía de peligro a la contaminación del acuífero, lo que permitió identificar las zonas de mayor peligro, las cuales se localizan en la porción centro y noroeste del valle, y que corresponden a zonas de agricultura de riego. Esta cartografía sirvió de apoyo para la configuración de la red de muestreo y la evaluación de los procesos contaminantes de origen antropogénico que afectan al acuífero.

La caracterización hidrogeoquímica se realizó con base en los datos fisicoquímicos obtenidos a partir del análisis de 20 muestras de agua tomadas en el año 2019 en dos temporadas. Una característica a destacar es el termalismo que tiene el agua subterránea, con una temperatura promedio de 31.5 °C. La facies dominante es bicarbonatada sódica, no identificándose variaciones en las concentraciones de cationes y aniones entre campañas de muestreo. Este quimismo estaría controlado, fundamentalmente, por procesos de alteración de silicatos, que darían lugar a la presencia de los iones HCO_3^- y Na^+ , así como del silice.

Dentro de los iones de interés, se detectó la presencia de As y el F^- , cuyas concentraciones superaron los límites máximos permisibles para agua de uso y consumo humano en 4 pozos, mismos que presentaron como características a considerar una temperatura entre 35 y 40 °C y su proximidad a fallas geológicas, por lo que su origen estaría relacionado con un proceso geogénico. También se determinaron concentraciones de NO_3^- superiores a 10 mg/L, en la mayoría de los pozos muestreados, lo cual se atribuye a un proceso antropogénico, ligado a las actividades que se llevan a cabo en zonas agrícolas (zona de alto peligro de contaminación), siendo este el principal uso de suelo en la región central del acuífero.

Por otra parte, se llevó a cabo una evaluación de la calidad del agua para uso público-urbano lo cual permitió identificar tres pozos con altos contenidos de arsénico ($\text{As} > 0.025$ mg/L, NOM-127; $\text{As} > 0.010$ mg/L, OMS) y flúor ($\text{F}^- > 1.5$ mg/L NOM-127 y OMS), ubicados al noroeste del acuífero. En cuanto a la evaluación de la calidad del agua para uso agrícola, se encontró en óptimas condiciones.

ABSTRACT

The hydrogeochemical study in the aquifer Valle de San Juan del Río, Querétaro allowed to identify and evaluate the physicochemical properties of groundwater, as well as to establish processes that affect NO_3^- , F^- and As ions. The aquifer under study is free and consists of two means: porous and fractured. It is a volcanic-sedimentary aquifer

As part of this study, pollution hazard cartography of aquifer was made, which allowed to identify the areas of greatest hazard, which are in the central and northwest portion of the valley, and which correspond to irrigation agriculture areas. This cartography served the configuration of the sampling network and the evaluation of the polluting processes affecting the aquifer.

Hydrogeochemical characterization was based on physicochemical data obtained from the analysis of 20 water samples taken in 2019 in two seasons. One feature to note is the thermalism, with an average temperature of 31.5 °C. The dominant facie is Na- HCO_3 , with no variations in cation and anion concentrations identified between sampling campaigns. This chemism will be controlled by silicate alteration processes, which would result in the presence of the HCO_3^- and Na^+ ions, as well as silica.

Within the ions of interest, the presence of As and F^- was discovered, whose concentrations exceeded the permissible maximum limits for drinking water in 4 wells, which presented as characteristics a temperature between 35 and 40 °C and their proximity to geological faults, so their origin would be related to a geogenic process. Concentrations of NO_3^- greater than 10 mg/L were also determined in most sampled wells, which is attributed to an anthropogenic process, linked to activities carried out in agricultural areas (high pollution hazard zone), this being the main land use in the central region of the aquifer.

On the other hand, an assessment of water quality for drinking use was carried out, identifying three wells with high arsenic content ($\text{As} > 0.025$ mg/L, NOM-127; $\text{As} > 0.010$ mg/L, WHO) and fluoride ($\text{F}^- > 1.5$ mg/L NOM-127 and WHO), located northwest of the aquifer. The assessment of water quality for agricultural use, it was found in optimal conditions.

CAPÍTULO 1

Introducción

1.1. Introducción general

El agua subterránea desempeña un papel de suma importancia en el desarrollo socioeconómico del país, pero a su vez presenta tres problemas principales en relación con su cantidad, su calidad y su gestión ya que, ante la presión ejercida por las actividades antropogénicas, los acuíferos se vuelven cada vez más susceptibles a la contaminación, la sobreexplotación, los procesos de salinización y los fenómenos de subsidencia, entre otros. A pesar de la enorme importancia del agua subterránea, muchos gestores del agua tienen un conocimiento limitado del funcionamiento de los acuíferos en cuanto a sus procesos de recarga, circulación y descarga, así como de los procesos hidrogeoquímicos. Como consecuencia, no le dan su debida importancia (FEA y CEMDA, 2006).

En el caso del estado de Querétaro, su desarrollo histórico y económico ha ejercido un papel importante en el país debido a su alto crecimiento industrial y poblacional, principalmente. Este crecimiento ha creado una demanda de agua significativa en las diversas zonas de la Entidad, lo que ocasiona que exista un incremento en los volúmenes de extracción del agua subterránea y la proliferación de focos potenciales de contaminación que podrían, bajo determinadas condiciones, poner en peligro la calidad del agua del acuífero. Uno de los acuíferos más afectados en la Entidad es el acuífero Valle de San Juan del Río donde se han registrado concentraciones de As, F⁻ y NO₃⁻ que superan los valores de los límites máximos permisibles para uso y consumo humano de la NOM-127 (MAV, 2012).

Debido a esta problemática, es necesario llevar a cabo un estudio hidrogeoquímico, así como el monitoreo periódico de la calidad del agua subterránea, y con base en la información derivada de estas actividades identificar los procesos geogénicos y/o antropogénicos que determinan las características fisicoquímicas del agua y definir estrategias para la gestión, conservación y protección del acuífero.

1.2. Justificación

El acuífero Valle de San Juan del Río, Querétaro, funge como principal fuente de abastecimiento de agua potable para la población, por lo cual es importante conservar su cantidad y calidad en un buen estado. Sin embargo, el crecimiento acelerado de la población, el desarrollo industrial, el aumento de servicios y la agricultura ubicada en el valle, no sólo han provocado la sobreexplotación del acuífero, sino que además han inducido a la proliferación de focos contaminantes que, bajo determinadas condiciones, podrían poner en peligro la calidad del agua para uso y consumo humano, así como para su utilización en actividades agrícolas (MAV, 2012).

En 2012, el Comité Técnico de Aguas Subterráneas de San Juan del Río (COTAS SJR) identificó zonas con presencia de As , F^- y NO_3^- , cuyas concentraciones se detectaron por encima de los límites máximos permisibles para uso y consumo humano de la NOM-127-SSA-1994. Este estudio recomienda valorar la evolución hidroquímica del acuífero, así como los focos potenciales de contaminación. Por otro lado, se señala la necesidad de contar con información piezométrica actualizada, y realizar un monitoreo continuo sobre la cantidad y calidad del agua subterránea.

En este sentido, el estudio hidrogeoquímico en el acuífero Valle de San Juan del Río ayudará a obtener una visión más profunda de las características fisicoquímicas del agua subterránea e identificar los procesos hidrogeoquímicos que dan origen a dichas características.

Los resultados proporcionarán información a autoridades en el tema, mismas que pueden definir estrategias para una mejor toma de decisiones en la gestión, conservación y protección del recurso hídrico subterráneo.

1.3. Hipótesis

El estudio hidrogeoquímico del acuífero Valle de San Juan del Río permitirá mejorar el conocimiento de la evolución hidrogeoquímica del agua subterránea, así como de la presencia, distribución y origen de los elementos químicos que afectan su calidad.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo principal

Identificar y evaluar las características fisicoquímicas del agua subterránea del acuífero Valle de San Juan del Río, Querétaro, mediante la realización de un estudio hidrogeoquímico, para establecer el origen y los procesos, tanto geogénicos como antropogénicos, que modifican dichas características.

1.4.2. Objetivos específicos

- i.** Recopilar, sintetizar y analizar la información disponible sobre la zona de estudio para contar con los insumos necesarios para el estudio hidrogeoquímico del acuífero Valle de San Juan del Río, Querétaro.
- ii.** Efectuar la cartografía piezométrica del acuífero para identificar la dirección del flujo subterráneo, así como las zonas de recarga, tránsito y descarga.
- iii.** Evaluar el peligro de contaminación del agua subterránea, con base en la cartografía de vulnerabilidad y las características de las fuentes potenciales de contaminación, para identificar procesos contaminantes que influyen en la química del agua.
- iv.** Realizar una caracterización hidrogeoquímica del acuífero para establecer el origen y los procesos, tanto geogénicos como antropogénicos, que modifican la calidad del agua subterránea.
- v.** Determinar la calidad del agua según los criterios para su uso en riego y la normatividad aplicable para el agua de uso y consumo humano, para definir estrategias sobre la toma de decisiones en el uso racional, conservación y la protección de la calidad del agua subterránea.

1.5. Contenido de la tesis

La presente tesis se estructura en 6 capítulos, cuyo contenido se presenta a continuación:

Capítulo 1. En este capítulo se presenta una breve introducción sobre las problemáticas del agua subterránea en relación con la calidad. Así como una justificación para llevar a cabo el estudio hidrogeoquímico en el acuífero Valle de San Juan del Río, Querétaro, la hipótesis planteada y el establecimiento de los objetivos que permitieron desarrollar el presente trabajo de investigación.

Capítulo 2. Se expone el marco teórico con conceptos desde el punto de vista hidrogeológico que permiten adentrar al lector en el tema. También se presentan algunos ejemplos de estudios hidrogeoquímicos que coinciden con las características de la zona de estudio.

Capítulo 3. Se describe la zona de estudio a través de las características generales como son: ubicación, clima, edafología, uso de suelo, geología, hidrogeología superficial, hidrogeología y algunas características sobre hidrogeoquímica.

Capítulo 4. Se presentan los materiales y métodos de cada objetivo planteado para llevar a cabo el estudio hidrogeoquímico del acuífero Valle de San Juan del Río, Querétaro.

Capítulo 5. Se dan a conocer los resultados obtenidos y la discusión de estos, divididos en cinco epígrafes referidos a los resultados de la configuración piezométrica, la evaluación de peligro a la contaminación, a la caracterización hidrogeoquímica donde se describe algunos orígenes y procesos de elementos químicos presentes en el acuífero, por último, se presenta una evaluación de la calidad del agua destinada a uso público-urbano y agrícola.

Capítulo 6. Se presentan las conclusiones y recomendaciones planteadas a partir de los resultados obtenidos de acuerdo con los objetivos establecidos.

Finalmente, se encuentra un listado de las referencias bibliográficas que sustentan el presente trabajo de investigación. También la sección de anexos donde se muestra la información complementaria referida en el texto general de este documento.

CAPÍTULO 2

Marco teórico

2.1. Hidrogeoquímica

La hidrogeoquímica es la ciencia que estudia los procesos que controlan la composición química de las aguas subterráneas, la distribución cuantitativa de elementos químicos, sus combinaciones, así como su transporte (Apelo y Postma, 2006; Custodio y Llamas, 1996). El campo de estudio de la hidrogeoquímica está basado en la evaluación de las interacciones agua y roca, la distribución espacio-temporal de las propiedades fisicoquímicas y las concentraciones de las especies químicas disueltas en el agua (Kania *et al.*, 2011).

Las propiedades fisicoquímicas que caracterizan las aguas subterráneas son la acidez del agua (pH), temperatura, conductividad eléctrica (CE) y potencial redox (Eh) (Madrigal *et al.*, 2017; Custodio y Llamas, 1996). La composición química de las aguas subterráneas generalmente está conformada por aniones (HCO_3^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , Cl^- y NO_3^-), cationes (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+}) y elementos minoritarios y traza (F^- , Br , I , As , Mn , Fe , Al , Co y otros).

El agua subterránea representa la composición de las rocas con las que interaccionan, lo cual depende de varios factores físicos y químicos. Entre los factores físicos se encuentran la temperatura y el tiempo de residencia; y entre los factores químicos se identifica la facilidad de disolución y precipitación de minerales y la presencia de gases como el CO_2 ; además, los elementos químicos presentan movilidad que se rige por varias propiedades fisicoquímicas del agua como pH, temperatura, condiciones redox y presencia de materia orgánica, entre otros (Madrigal *et al.*, 2017).

2.2. Técnicas de estudio de la hidrogeoquímica

Un análisis químico estándar del agua subterránea comprenderá como mínimo valores de temperatura, CE, pH, los cuatro cationes principales (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+}) y los cuatro aniones principales (HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- y NO_3^-). El manejo y estudio de los análisis químicos puede simplificarse con el empleo de gráficos y diagramas que sirven como herramienta para

la interpretación de la composición iónica del agua subterránea (Custodio y Llamas, 1996; Apelo y Postma, 2006).

En cualquier estudio hidrogeoquímico conviene visualizar los datos químicos, ya que así se ponen rápidamente en relieve posibles relaciones de interés y se aprecia mejor la técnica de estudio a seguir. Las herramientas de visualización que se utilizan varían dependiendo las características propias de cada zona de estudio. Suelen ser de gran utilidad los diagramas triangulares de Piper, los diagramas de escala logarítmica como es el de Schöeller-Berkaloff, y los diagramas de Stiff que representan características químicas (Custodio y Llamas, 1996).

Una representación espacial clásica de los resultados de los análisis químicos es el mapa hidroquímico que muestra la distribución regional (espacial) de la composición del agua. Dicho mapa sirve a autoridades ambientales, administradores de recursos hídricos, operadores de perforación y otros profesionales para identificar acuíferos con agua subterránea de buena calidad; pero también son útiles para una primera evaluación de la relación entre la mineralogía del acuífero y la composición del agua subterránea (Apelo y Postma, 2006).

Otra herramienta está basada en la modelación de datos hidrogeoquímicos. PHREEQC, uno de los programas de modelación más difundidos y utilizados, permite simular reacciones químicas, físicas y termodinámicas. El programa se basa en el equilibrio químico de soluciones acuosas que interactúan con minerales, gases, soluciones sólidas y superficies de sorción (Parkhurst y Appelo, 2013).

PHREEQC es capaz de calcular índices de saturación, la distribución de especies acuosas, y la densidad y conductancia específica de una composición de solución específica. Además, calcula las concentraciones de elementos, tales como molalidades y actividades de especies acuosas, pH, p_e (log negativo de la actividad convencional del electrón), transferencias moleculares de fases y permite la definición de un equilibrio químico en función de reacciones geoquímicas reversibles e irreversibles especificadas (Parkhurst y Appelo, 2013).

2.3. La hidrogeoquímica en formaciones volcánicas

Los solutos disueltos en las aguas subterráneas de terrenos volcánicos pueden provenir de la aportación atmosférica (en la lluvia y la deposición seca), de las reacciones biológicas en el suelo, de la meteorización del medio y de los aportes antropogénicos. No obstante, mientras la composición fisicoquímica del agua cercana a la superficie del terreno es principalmente función del clima y de la lluvia, cuando ésta se infiltra en el terreno, el tipo de litología o el grado de alteración de la roca cada vez cobra mayor influencia (Deutsch, 1997; Marrero, 2010).

La mayoría de los minerales presentes en las rocas volcánicas son, en un alto porcentaje, del grupo de los silicatos, siendo estos poco solubles, pero fácilmente alterables (hidrolizables), especialmente cuando es mayor la proporción de productos de proyección aérea (piroclastos), y cuando existen iones de hidrógeno disueltos en el agua lo que permite mantener un pH relativamente bajo. Esta situación se suele dar por la presencia de CO₂ en cantidad suficiente en el agua que circula a través de las rocas, las cuales reaccionan donando iones (Custodio y Llamas, 1996).

El CO₂ disuelto en el agua puede provenir por un lado de la atmósfera y del suelo, y por otro lado de las emanaciones endógenas en áreas de vulcanismo histórico y reciente. El CO₂ también puede estar presente como gas contenido en los poros de las rocas, el cual se disuelve lentamente por difusión en el agua subterránea durante el proceso de alteración de la roca (Custodio y Llamas, 1996; Marrero, 2010).

En terrenos volcánicos, donde existe un aporte de CO₂ profundo, independientemente del clima, los aniones más abundantes en el agua suelen ser HCO₃⁻ y CO₃²⁻. Por tanto, la fracción aniónica del agua subterránea comúnmente está vinculada con los aportes exógenos (disueltos en el agua de lluvia), y endógenos (gases volcánicos disueltos como CO₂, HCl, H₂S o SO₂). En cuanto al contenido catiónico, la adquisición por parte del agua de las diversas sustancias depende de la composición química y mineralógica de las rocas del medio ya que la constitución de éstas, ácida o básica, repercutirá en el aporte de cationes (Marrero, 2010).

En general, el grado de aporte de iones o elementos al agua no es sólo función de la composición mineralógica de las rocas volcánicas, sino también del tipo de textura y de su

alterabilidad, del grado de fragmentación del material y de la agresividad del agua, así como de la temperatura y la presión (Marrero, 2010).

2.4. Problemáticas en relación con la calidad del agua subterránea

En la actualidad, el agua subterránea está siendo afectada por la presión humana, dañando cada vez más su calidad. Los factores de presión son, fundamentalmente, la extracción intensiva del agua subterránea, el vertido de sustancias contaminantes, los cambios en el uso del suelo, la deforestación, las prácticas agrícolas inadecuadas, y el incremento de la urbanización en zonas de recarga, entre otros factores.

A nivel mundial, los acuíferos experimentan una creciente amenaza de contaminación ocasionada por diversos focos potenciales de contaminación que generan un impacto, debido a que no son controlados adecuadamente y exceden la capacidad natural de atenuación del terreno y de los estratos subyacentes (Foster *et al.*, 2006).

La contaminación del agua subterránea puede ser muy difícil de detectar y puede no ser evidente hasta que el suministro de agua es afectado. Los contaminantes pueden tardar meses o años en migrar de la fuente contaminante a un receptor o hasta un punto donde puedan detectarse. El peligro de contaminación varía de un lugar a otro, ya que dependen de las características intrínsecas del medio acuífero y del tipo de contaminantes. Esto hace que en un acuífero se diferencien áreas más o menos susceptibles a la contaminación (EA, 2013).

Algunas de las principales fuentes de contaminación y tipos de contaminantes que afectan la calidad del agua subterránea se presentan en la Tabla 2.1.

De entre estos contaminantes, cabe destacar el NO_3^- , As y F, los cuales han sido detectados en diferentes acuíferos del país (Armienta y Segovia, 2008; Ortega-Guerrero, 2009; MAV, 2012; López *et al.*, 2013; Salcedo *et al.*, 2015; Morales *et al.*, 2018).

Tabla 2.1. Principales contaminantes que afectan la calidad del agua subterránea y su grado de contaminación (Vrba y Adams, 2008).

Tipo de contaminación	Fuente de Contaminación	Tipo de contaminante
<i>Difusa</i>	Procesos geogénicos	Arsénico, fluoruro, fosfato, cadmio, hierro, plomo, zinc, cobre, cobalto y sulfuro.
	Actividad agrícola	Fertilizantes (orgánicos e inorgánicos): nitrato, amoníaco, cloruro, fosfato, y potasio. Patógenos fecales, salinidad y pesticidas.
<i>Puntual</i>	Saneamiento in situ	Nitratos, microorganismos fecales y trazas de hidrocarburos sintéticos.
	Industria	Metales pesados (Pb, Zn, Cd, Cr), arsénico, fenoles, productos y aditivos de petróleo Alta DQO.
	Minería	Metales pesados, sales (cloruro, sulfato), pH bajo, alto SDT, cianuro, HAP, productos petrolíferos.
<i>Multipuntual</i>	Lodos residuales domésticos	Nitratos, varios hidrocarburos halogenados, plomo y zinc.
	Exploración y extracción de petróleo/gas	Salinidad (cloruro de sodio) e hidrocarburos aromáticos.
<i>Lineal</i>	Oleoductos	Productos petrolíferos
	Ríos y arroyos	Nitrato, amoníaco, hierro, manganeso, fenoles

2.4.1. Nitratos

El nitrógeno (N) es un elemento diatómico, se encuentra en estado gaseoso a temperatura y presión ordinaria, comprende el 78 % de la atmósfera terrestre y en su forma elemental es relativamente inerte (Pacheco et al., 2002). Un compuesto del nitrógeno (N) es el nitrato (NO_3^-), este se encuentra de forma natural en concentraciones bajas ($< 10 \text{ mg/L}$) en muchos entornos geológicos (Sankararamakrishnan *et al.*, 2008).

Sin embargo, en el agua subterránea puede alcanzar niveles altos, resultado de actividades humanas como son el uso de fertilizantes nitrogenados en la agricultura y la disposición de desechos de animales y humanos. Los nitratos pueden servir como indicadores de contaminación proveniente de zonas agrícolas y urbanas sin alcantarillado sanitario (Pauwels *et al.*, 2001). Aunque el nitrato (NO_3^-) es la forma principal en que el nitrógeno está en el agua subterránea, también puede estar presente en la forma de amonio (NH_4^+), amoníaco (NH_3^+), nitrito (NO_2^-), óxido nitroso (N_2O) y nitrógeno (N_2) incorporado a sustancias orgánicas (Pacheco *et al.*, 2002).

El movimiento del nitrato a través del suelo y la zona no saturada es dependiente de la cantidad de agua que se está infiltrando y del contenido de humedad. Durante los períodos lluviosos, incrementa el lixiviado de nitratos ya que los niveles de humedad del suelo son altos y la tasa de evapotranspiración es reducida. Debido a esta alta movilidad en el agua, este ion es un contaminante químico que frecuentemente es detectado en altas concentraciones en el agua subterránea (Montiel *et al.*, 2014; Pacheco *et al.*, 2002).

La contaminación del agua subterránea por nitratos es un problema muy extendido en muchos lugares del mundo y supone una seria amenaza al abastecimiento de agua potable (Kania *et al.*, 2011). El efecto tóxico de agua contaminada con NO_3^- es sobre todo severo en infantes que podrían presentar coloración azulosa en la piel como consecuencia de la anoxia celular producida por la fijación del nitrito en la hemoglobina, haciéndola incapaz de transportar y transferir oxígeno en la sangre, lo que se conoce como síndrome del bebé azul ó metahemoglobinemia. En mujeres embarazadas, el consumo de agua contaminada con nitrato provoca abortos espontáneos y defectos de nacimiento en el sistema nervioso central (Manassaram *et al.*, 2006).

Existen reportes que indican que del 80 al 90 % de los casos de metahemoglobinemia en el mundo se asocian con una concentración mayor de 100 mg/L de NO_3^- , es decir, 22.5 mg/L de N-NO_3^- (Othax *et al.*, 2014). La Organización Mundial de la Salud (OMS, 2004) recomienda un valor de referencia para la concentración de nitratos (NO_3^-) en agua para consumo humano de 50 mg/L. En México la norma mexicana NOM-127-SSA1-1994 establece un límite máximo permisible de nitratos en forma de nitrógeno (N-NO_3^-) de 10 mg/L, equivalente a 44.3 mg/L de nitratos (NO_3^-).

2.4.2. Fluoruro

El flúor (F^-) es el elemento químico más electronegativo y reactivo de todos los elementos químicos y por consiguiente reacciona explosivamente con el hidrógeno. Su contenido en la corteza terrestre es de 0.3 g/Kg, por lo tanto, es uno de los elementos más abundantes. Se encuentra, fundamentalmente, en las rocas de origen marino y en rocas volcánicas, y existe en forma de fluoruros en varios minerales. El estado de oxidación del flúor es -1 (WHO, 2004).

El mineral de fluoruro más común en la corteza terrestre es la fluorita (F_2Ca), así como la criolita (F_6AlNa_3) y la fluorapatita ($(PO_4)_3(F,Cl)Ca_5$) (Galicía *et al.*, 2011). Las altas concentraciones de fluoruros de origen natural, por lo usual, se asocian con agua geotérmica que interactúa con rocas ricas en F^- , sobre todo rocas volcánicas. También la disolución de fluorita, de silicatos contenidos en rocas ígneas y, en algunos casos, de mármoles dolomíticos se han identificado como fuentes de F^- en agua subterránea (Morales *et al.*, 2018).

La contaminación por F^- en agua destinada al consumo humano es un problema relevante a nivel mundial. La ingesta de agua con elevados contenidos de F^- durante periodos largos de tiempo puede producir acumulación de F^- en tejidos calcificados y ligamentos, deformación de huesos, desorden renal y fluorosis dental y esquelética, desarrollando una mayor susceptibilidad a enfermedades renales y cáncer (Morales *et al.*, 2018; WHO, 2004).

En el caso de México, el límite máximo de fluoruro (F^-) en agua es de 1.5 mg/L, de acuerdo con la norma NOM-127-SSA1-1994 y el límite máximo recomendado por la OMS (2004) también es de 1.5 mg/L.

2.4.3. Arsénico

El arsénico (As) es un metaloide que aparece de manera natural y se encuentra en el medio ambiente en forma de diferentes compuestos inorgánicos y orgánicos, tanto en estado sólido como líquido. Aunque en algunas zonas geográficas del mundo su concentración puede ser más alta, su contenido medio en la corteza terrestre es de 5 gramos por tonelada, apareciendo normalmente combinado con más de 150 elementos diferentes. Los minerales de arsénico se pueden encontrar en una gran variedad de entornos geológicos, que incluyen rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas (Hurtado y Gardea, 2006; Aragonés *et al.*, 2001).

La contaminación por arsénico del agua subterránea puede resultar de procesos geogénicos o antropogénicos. La contaminación geogénica generalmente proviene principalmente de minerales que contienen arsénico y de fluidos geotérmicos. Las principales fuentes de contaminación antropogénica se asocian con aplicaciones industriales tales como conservación de madera, refinación de petróleo, fabricación de semiconductores, producción de aleaciones no ferrosas, quema de combustibles fósiles, producción de metales,

aplicaciones agrícolas (pesticidas y aditivos) y riego con aguas contaminadas (Hurtado y Gardea, 2006).

El aumento de las concentraciones de arsénico en el medio ambiente representa una amenaza importante para la salud humana, ya que la exposición a través de la inhalación, la ingestión y el contacto con la piel pueden provocar muchas enfermedades, incluido el cáncer (Minatel *et al.*, 2018). La contaminación por arsénico del agua subterránea amenaza la salud de millones de personas en todo el mundo que ingieren cantidades excesivas de arsénico a través del agua contaminada por fuentes geogénicas (Winkel *et al.*, 2008).

La concentración máxima permisible de arsénico (As) para consumo humano en México es de 0.025 mg/L, de acuerdo con lo establecido por la norma mexicana, NOM-127-SSA1-1994 (SSA-2005). Para la OMS es de 0.010 mg/L (OMS, 2004).

2.5. La evaluación del peligro de contaminación como estrategia de protección

Las aguas subterráneas son un recurso importante que amerita cuidado, esto principalmente por el incremento de actividades antrópicas sobre sus áreas de recarga, especialmente por prácticas agrícolas y zonas industriales (Vergara *et al.*, 2010). Las técnicas para la detección, el monitoreo y la remediación de la contaminación son complejas, costosas y sólo parcialmente efectivas; por lo que se ha dado énfasis a la prevención de la contaminación (Albornoz & González, 2017).

Ante el progresivo deterioro de la calidad del agua subterránea en muchos acuíferos o la probabilidad de que ésta ocurra, la evaluación del peligro de contaminación surge como una estrategia básica a la hora de proteger el recurso contra agentes contaminantes. Esta evaluación permite identificar, de forma práctica y objetiva, áreas de un acuífero susceptibles a ser contaminadas, y, por lo tanto, revela los sitios en los que se necesitan implementar medidas urgentes para su control o mitigación (Expósito, 2012).

En general, el peligro de contaminación es definido dentro del contexto del agua subterránea, como la probabilidad de que un acuífero experimente impactos negativos a partir de las

actividades antrópicas realizadas en la superficie, a un nivel tal, que la calidad del agua se torne inaceptable para el consumo humano (Foster *et al.*, 2007).

Además, la evaluación del peligro a la contaminación es un prerequisite esencial para la protección de los recursos hídricos subterráneos, ya que identifica aquellas actividades humanas que tienen la mayor probabilidad de tener impactos negativos sobre el acuífero e indica la priorización de las medidas de control y mitigación necesarias (Foster *et al.*, 2007).

En términos prácticos, la evaluación del peligro considera la interacción entre el índice de vulnerabilidad a la contaminación del acuífero en estudio y el inventario de focos contaminantes al subsuelo.

Aunado a lo anterior, se define la vulnerabilidad como las características propias de un acuífero que determinan la facilidad con que un contaminante derivado de actividades antrópicas o fenómenos naturales pueda llegar a afectarlo (Vélez *et al.*, 2014). La vulnerabilidad del agua subterránea está ligada con la capacidad que tiene los contaminantes de moverse verticalmente a través de la zona no saturada y lleguen al nivel freático después de su introducción a través la superficie del suelo en función de las características del medio geológico-hidrogeológico (Cap-Net, 2010; Dochartaigh *et al.*, 2015).

Los métodos utilizados en la evaluación de la vulnerabilidad natural e intrínseca de las aguas subterráneas a la contaminación tienen en cuenta datos relacionados con la naturaleza litológica presente en las zonas evaluadas, la profundidad del agua subterránea, la recarga de los acuíferos, la topografía, la composición de los suelos, las características propias de la dinámica hidráulica y los parámetros físicos relacionados con la naturaleza geológica de la zona (Peña *et al.*, 2014).

2.5.1. Métodos para determinar la vulnerabilidad a la contaminación

Existen diversos métodos de evaluación de vulnerabilidad de las aguas subterráneas que incluyen el método de superposición de índices, el método de simulación de procesos, el método estadístico, el método matemático difuso y la síntesis de varios métodos. Algunos de los métodos más empleados basados en índices son AVI, GOD, DRASTIC, y SINTACS

(Huan *et al.*, 2018). A continuación, se describen las principales características de estos métodos.

I) Método AVI

El método AVI (*Aquifer Vulnerability Index*) fue desarrollado por Van Stempvoort et al. (1992) para el mapeo de la vulnerabilidad del agua subterránea de la provincia de Prairie en Canadá (Auge, 2008). El AVI es uno de los métodos más sencillos, fáciles y rápidos de cuantificar la vulnerabilidad, ya que tan solo utiliza la conductividad hidráulica y el espesor de las capas de diferentes materiales que se encuentran sobre el nivel del agua subterránea. Es un índice para cuantificar la vulnerabilidad de un acuífero por medio de la resistencia hidráulica “c” al flujo vertical del agua al pasar por los diferentes materiales que sobreyacen al acuífero (Báez, 2001).

II) Método GOD

El método GOD fue desarrollado por Foster e Hirata (1988) y trata de ser simple y sistemático. El método contempla el uso de las variables estratégicas **G**, definida como la ocurrencia del agua subterránea, **O**, referente a la naturaleza litológica de las formaciones geológicas y **D**, la distancia al agua subterránea. Este método permite establecer mediante rangos de valores que varían de cero (0) a uno (1), la vulnerabilidad a la contaminación de cada formación geológica. Al final se multiplican los tres valores para definir el índice de vulnerabilidad (Peña *et al.*, 2014).

III) Método DRASTIC

El método DRASTIC fue desarrollado por Aller *et al.* (1987), para la *Environmental Protection Agency* (EPA) con el fin de evaluar la vulnerabilidad regional de acuíferos. (Paredes, 2010). Se basa en la asignación de valores que varían de 1 (vulnerabilidad mínima) a 10 (vulnerabilidad máxima), de acuerdo con las características y el comportamiento de las variables consideradas en el acrónimo de las siglas en inglés:

- D:** (*Depth water table*) Profundidad al nivel estático del agua subterránea
- R:** (*Net recharge*) Recarga neta
- A:** (*Aquifer*) Litología del acuífero
- S:** (*Soil*) Tipo de suelo
- T:** (*Topography*) Topografía
- I:** (*Impact*) Litología de la zona no saturada o vadosa
- C:** (*Hydraulic conductivity*) Conductividad hidráulica

IV) Método SINTACS

El método SINTACS es en realidad una derivación del DRASTIC, desarrollado por Civita *et al.* (1990) para adecuarlo a las diversificadas características hidrogeológicas de Italia y al requerimiento de un mapeo de mayor detalle (Auge, 2008).

El acrónimo SINTACS está compuesto por los siguientes elementos (Marsico *et al.*, 2004; citado por Paredes, 2010):

- S:** (*Soggioacenza*) Profundidad del nivel estático del agua subterránea. Equivale a **D** en DRASCTIC
- I:** (*Infiltrazione*) Infiltración eficaz. Equivale a **R** en DRASTIC
- N:** (*Effecto depurante del non saturo*) Efecto de autodepuración de la zona no saturada. Equivale **I** en DRASTIC
- T:** (*Tipologia della cobertura*). Tipo de suelo. Equivale **S** en DRASTIC
- A:** (*Acquifero*). Litología del acuífero. Equivale a **A** en DRASCTIC
- C:** (*Conduttività idraulica*). Conductividad hidráulica. Equivalente a **C** en DRASTIC
- S:** (*Acclività della superficie topografica*). Pendientes de la superficie topográfica. Equivale a **T** en DRASTIC

2.5.2. Evaluación de fuentes potenciales de contaminación

Las fuentes potenciales de contaminación procedentes de las actividades antrópicas juegan un papel crucial dentro de la evaluación de peligro de contaminación de las aguas subterráneas.

Las diferentes clases de actividades antrópicas, que tienden a estar asociadas a ciertos tipos de contaminantes, presentan peligro de contaminación en distintos grados para los acuíferos, por lo que el inventario y la clasificación de las fuentes de contaminación potencial constituyen un paso fundamental en los programas de evaluación de peligro de contaminación y protección de la calidad de las aguas (Foster *et al.*, 2007).

a) Inventario de fuentes de contaminación

El primer paso para llevar a cabo una evaluación de los impactos potenciales de las actividades humanas en el agua subterránea es la identificación espacial de las principales fuentes de contaminación y la adquisición de información sobre cada una de las características de todas estas fuentes potencialmente contaminantes (Foster *et al.*, 2007; Expósito, 2012.)

Existen diversos métodos disponibles para realizar inventarios: desde una evaluación exclusivamente de gabinete a partir de fuentes de información secundaria, hasta los reconocimientos de campo básicos, en los cuales los equipos de campo inspeccionan áreas seleccionadas para verificar la existencia de fuentes potenciales de contaminación (Foster *et al.*, 2007).

b) Clasificación de fuentes de contaminación

La clasificación de las fuentes de contaminación se basa en una serie de pasos a seguir para asignar una medida cuantitativa o cualitativa del peligro potencial que plantean al agua subterránea. En cuanto a valor cuantitativo podría ser una cantidad o una concentración; mientras que el valor cualitativo podría ser expresado en términos de elevada, moderada o reducida carga potencial nociva. Esta serie de pasos es útil para dar un indicio del tamaño del problema (Expósito, 2012).

Uno de los métodos enfocados en determinar la carga contaminante de las fuentes de contaminación es el método POSH (Tablas 2.2 y 2.3), acrónimo de “*Pollutant origin; Hydraulic Surchage*” propuesto por Foster *et al.* (2007), el cual considera el tipo, tamaño y localización del foco. El método permite dimensionar la probabilidad de generación de una carga contaminante, identificando las sustancias tóxicas manipuladas y la existencia de cargas hidráulicas asociadas a estos compuestos.

Tabla 2.2. Clasificación de fuentes puntuales de contaminación por el método POSH (Foster *et al.*, 2007)

Potencial por generación de carga contaminante al subsuelo	Fuente de contaminación				
	Disposición de residuos sólidos	Sitios industriales	Lagunas de efluentes	Urbanas varias	Exploración minera y petrolera
Elevado	Residuos de industrias tipo 3, residuos de origen desconocido	Industrias tipo 3, cualquier actividad que maneje >100 kg/d de sustancias químicas	Todas las industrias tipo 3, cualquier efluente (excepto aguas residuales residenciales) si el área >5 ha		Operación de campos de petróleo, minas metalíferas
Moderado	Precipitación >500 mm/a con residuos residenciales/ industriales tipo 1/agroindustriales, todos los otros casos	Industrias tipo 2	Agua residual residencial si el área >5 ha, otros casos que no figura arriba o abajo	Gasolineras, rutas con tráfico regular de sustancias químicas peligrosas	Algunas minas/ canteras de materiales inertes
Reducido	Precipitación <500 mm/a con residuos residenciales/ industriales tipo 1/agroindustriales	Industrias tipo 1	Efluente residencial, urbano mezclado, agroindustrial y Minero no metalífero si el área <1 ha	cementerio	

Los terrenos contaminados por industrias abandonadas deberían tener la misma categoría que las propias industrias
 Industria tipo 1: carpinterías, fábricas de alimentos y bebidas, destilerías de alcohol y azúcar, procesamiento de materiales no metálicos
 Industrias tipo 2: fábricas de caucho, pulpa y papel, textiles, artículos eléctricos, fertilizantes, detergentes y jabones
 Industrias tipo 3: talleres mecánicos, refinería de gas y petróleo, manufacturas de pesticidas, plásticos, productos farmacéuticos y químicos, curtidurías, fábricas de artículos electrónicos, procesamiento de metal.

Tabla 2.3. Clasificación de fuentes difusa de contaminación por el método POSH (Foster *et al.*, 2007)

Potencial de carga contaminante al subsuelo	FOCOS DE CONTAMINACIÓN	
	Saneamiento in situ	Prácticas agrícolas
ELEVADO	Cobertura del servicio de cloacas menor que 25% y densidad poblacional superior a 100 personas /ha	Cultivos comerciales intensivos y la mayoría de los monocultivos en suelos bien drenados en climas húmedos o con baja eficiencia de riego, pastoreo - intensivo sobre praderas altamente fertilizadas
MODERADO	Intermedio entre elevado y reducido	No se clasifica en este rango
REDUCIDO	Cobertura del servicio de cloacas mayor del 75% y densidad poblacional inferior a 50 personas /ha.	Rotación de cultivos tradicionales, pastoreo extensivo, sistemas de granjas ecológicas, cultivos bajo riego de alta eficiencia en áreas áridas

2.6. Estudios hidrogeoquímicos sobre As, F⁻ y NO₃⁻ en acuíferos de la Faja Volcánica Transmexicana

En varios acuíferos ubicados en la provincia hidrogeológica número ocho “Faja Volcánica Transmexicana”, dentro de la cual se ubica el acuífero en estudio, es frecuente detectar la presencia de algunos elementos traza como As y F⁻ en altas concentraciones ligados a procesos geogénicos, así como de NO₃⁻, vinculados con las actividades agrícolas.

Armienta y Segovia (2008) realizaron una recopilación de estudios sobre la presencia de As y F⁻ en acuíferos de varias áreas de México. En este estudio, los autores refieren que la explotación de los acuíferos naturalmente enriquecidos en estos elementos tóxicos puede producir efectos adversos para la salud de la población expuesta.

Ortega-Guerrero (2009) utilizó técnicas hidrogeológicas, hidrogeoquímicas e isotópicas para estudiar la presencia, distribución y origen del As⁺ inorgánico, F⁻ y otros elementos traza disueltos en el agua subterránea en la cuenca Independencia, tributaria de la cuenca Lerma-Chapala. Estudió la distribución de especies acuosas y su estado de saturación en la fase acuosa con respecto a fases minerales de As⁺ y F⁻ basado en el modelo hidrogeoquímico PHREEQC. Los resultados químicos e isotópicos indicaron que la presencia de As y F⁻ será cada vez mayor en el acuífero somero ya que se produce un ascenso de agua desde el acuífero fracturado, el cual se caracteriza por la presencia de agua termal.

López *et al.* (2013) realizaron una evaluación del impacto que han generado las actividades antropogénicas sobre el acuífero del Valle de San Luis Potosí. Durante el estudio se llevó a cabo una campaña de muestreo en norias y manantiales dentro del valle y se evaluaron parámetros fisicoquímicos, cationes, aniones y elementos traza. La evaluación hidrogeoquímica permitió determinar la presencia de nitratos, sulfatos, cloruros, coliformes totales y fecales en la zona urbana, y la de metales pesados, principalmente, mercurio, bario, estroncio, cadmio, plomo y plata, relacionada con las antiguas actividades mineras y la industria activa en la zona.

Salcedo *et al.* (2015) utilizaron el índice CCME-WQI, para evaluar la calidad del agua subterránea en el acuífero del Valle de Puebla. El cálculo del índice se realizó tomando en

cuenta que el principal uso del agua extraída de los pozos en la zona urbana del acuífero es el de abastecimiento público. Se consideraron los criterios para uso y consumo humano, establecidos por la normatividad mexicana NOM-127-SSA1-1994. La evaluación del índice demostró que ha existido un cambio paulatino en la calidad del agua de la zona urbana, debido al aumento de las concentraciones de sólidos disueltos totales, sulfatos, calcio y magnesio.

Morales *et al.* (2018) realizaron un estudio para estimar los niveles de riesgo por exposición a fluorosis dental y esquelética en distintas comunidades en Santa Cruz de Juventino Rosas, estado de Guanajuato. Se realizó el cálculo para estimar la exposición a fluoruros (EEF) y una encuesta epidemiológica (EEp) usando el índice de Dean (ID). Las altas concentraciones de F⁻ se asociaron al ascenso de flujos geotérmicos por fallas y fracturas en la zona. De acuerdo con los resultados obtenidos, los habitantes se encuentran expuestos a elevados contenidos de dicho elemento.

CAPÍTULO 3

Descripción de la zona de estudio

3.1. Ubicación y características generales

El acuífero Valle de San Juan del Río se localiza en la región central de la República Mexicana, ubicado en la parte sureste del estado de Querétaro, limita al norte con el acuífero Valle de Amazcala, al noreste con el acuífero Valle de Tequisquiapan, al noroeste con el acuífero Valle de Querétaro, al oeste con el acuífero Valle de Huimilpan, mientras que al sur colinda con los acuíferos Valle de Amealco y Polotitlán (Figura 3.1). Este acuífero está ubicado en la provincia hidrogeológica número ocho “Faja Volcánica Transmexicana”.

De acuerdo con el límite físico, el acuífero cubre un área total aproximada de 2,735.09 km², presentando una variación importante en la zona sur, con respecto al límite administrativo establecido por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2018a; Medina, 2017).

Este acuífero es el de mayor extensión en el estado de Querétaro, y abarca parte de los municipios de San Juan del Río, Tequisquiapan, Colón, Pedro Escobedo, Huimilpan, Amealco y El Marqués. Como principales poblaciones se encuentra la ciudad de San Juan del Río, Pedro Escobedo, El Colorado, El Sauz, Galindo, San Fandila y La Piedad, con alrededor de 426,600 habitantes, que representa el 23.3 % de la población en el estado de Querétaro. (CONAGUA, 2018a; INEGI, 2010).

3.2. Clima

El clima predominante se ha clasificado según los criterios de Köppen, modificada por Enriqueta García (1981), en semiárido templado (BS1hw) y semiárido semicálido (BS1kw) en la porción central y noreste del valle, templado subhúmedo (Cwo, Cw1, Cw2) en la parte sur, mientras que en la porción suroeste es semifrío subhúmedo (Figura 3.2). El régimen de lluvias es de verano y con un bajo porcentaje de lluvia invernal (CONABIO, 1998). La precipitación media anual en el valle varía entre 450 y 680 mm, siendo la porción sur donde se presentan las mayores precipitaciones. La temperatura media anual oscila en un rango de

12 y 19 °C, presentándose en la porción noroeste del acuífero las máximas temperaturas (CONAGUA, 2018a).

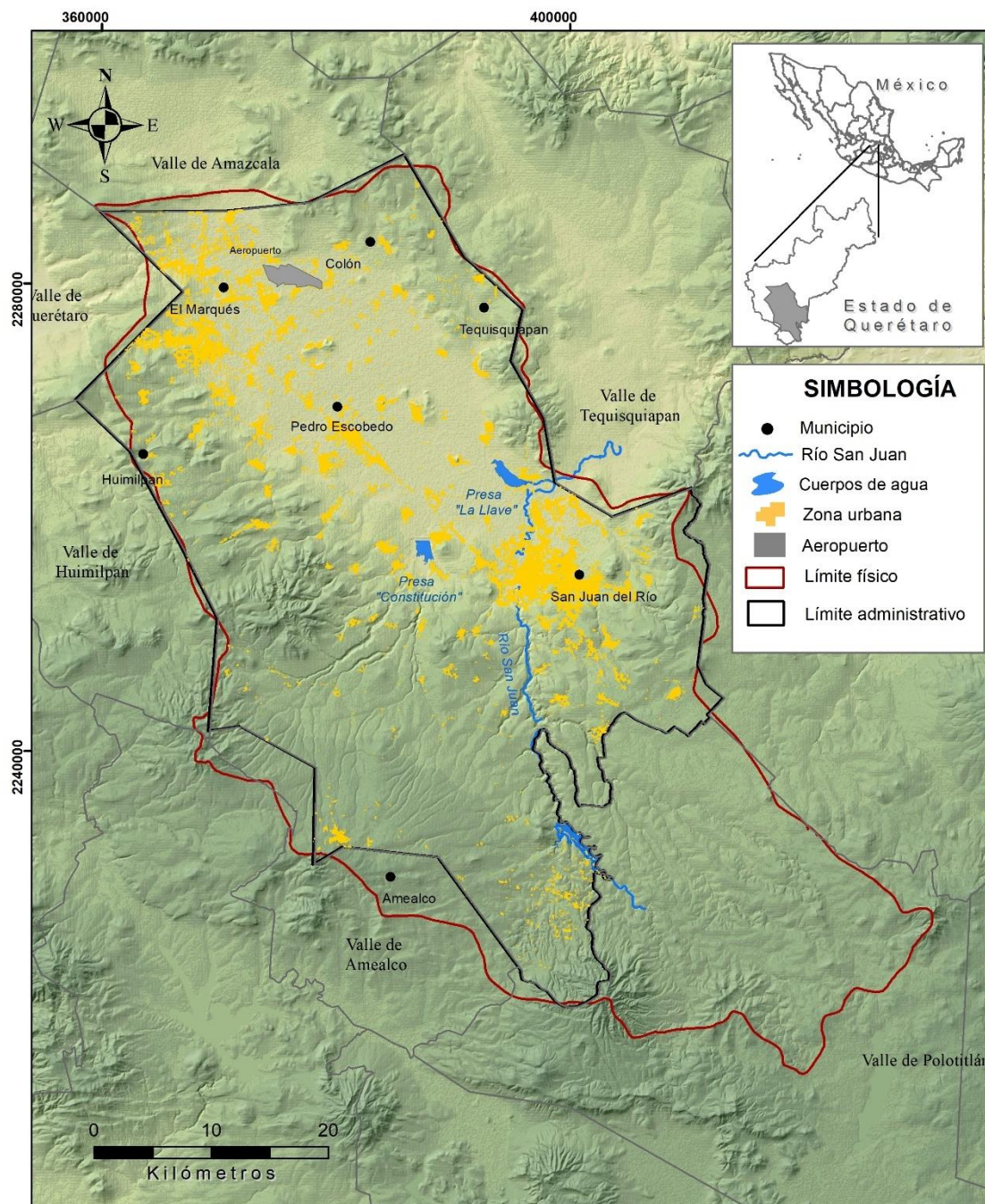


Figura 3.1. Mapa de localización de la zona de estudio. Acuífero Valle de San Juan del Río, Querétaro.

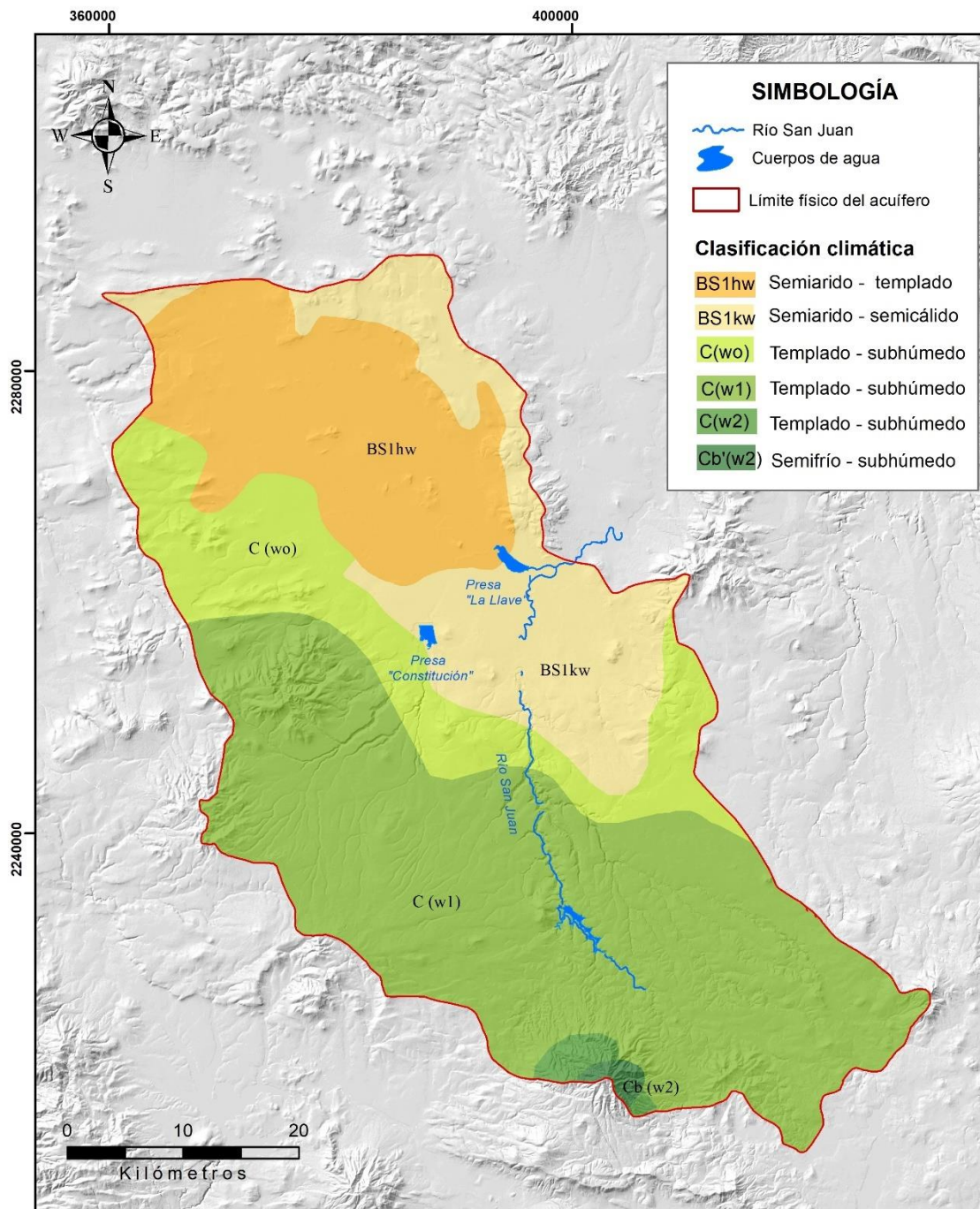


Figura 3.2. Mapa climatológico de la zona de estudio. Acuífero Valle de San Juan del Río (CONABIO, 1998).

3.3. Edafología

La zona de estudio se caracteriza por una gran variedad de suelos, presentándose suelos de tipo feozem, leptosol, luvisol, planosol, y vertisol (Figura 3.3). Las características principales de estos suelos son descritas a continuación de acuerdo con el Sistema Internacional de Clasificación de Suelos de la FAO (2015).

- a) **Feozem.** Este tipo de suelo cubre la mayor área de la zona de estudio. Son suelos superficiales oscuros debido al alto contenido de materia orgánica por lo que son aptos para la agricultura, alcanzando un alto grado de productividad agrícola. Sus principales limitaciones son las afectaciones por las inundaciones y la erosión.
- b) **Vertisol.** Es el segundo más abundante después del feozem y se encuentra en el centro y norte del valle. Este tipo de suelo se caracteriza por un alto contenido de arcillas expandibles producidas por la meteorización de las rocas. Cuenta con una textura uniforme fina o muy fina y un bajo contenido de materia orgánica.
- c) **Leptosol.** Los leptosoles son suelos muy delgados sobre roca con un espesor no mayor a 10 cm. Son particularmente comunes en regiones montañosas. Este tipo de suelo se encuentra ubicado al noreste y en pequeñas porciones en la parte sur del de la zona de estudio.
- d) **Luvisol.** Se localiza en el suroeste del acuífero. Se desarrolla sobre una gran variedad de materiales no consolidados. Es un suelo que predomina en zonas llanas o de poca pendiente, en regiones templadas frías y es adecuado para la actividad agrícola.
- e) **Planosol.** Se encuentra principalmente en zonas llanas, periódicamente inundadas y no es apto para la agricultura. El impedimento de la circulación del agua produce un horizonte de color blanco. Es un suelo moderadamente apto para agricultura y fácil de erosionar. Este tipo de suelo se localiza en la porción sur del acuífero.

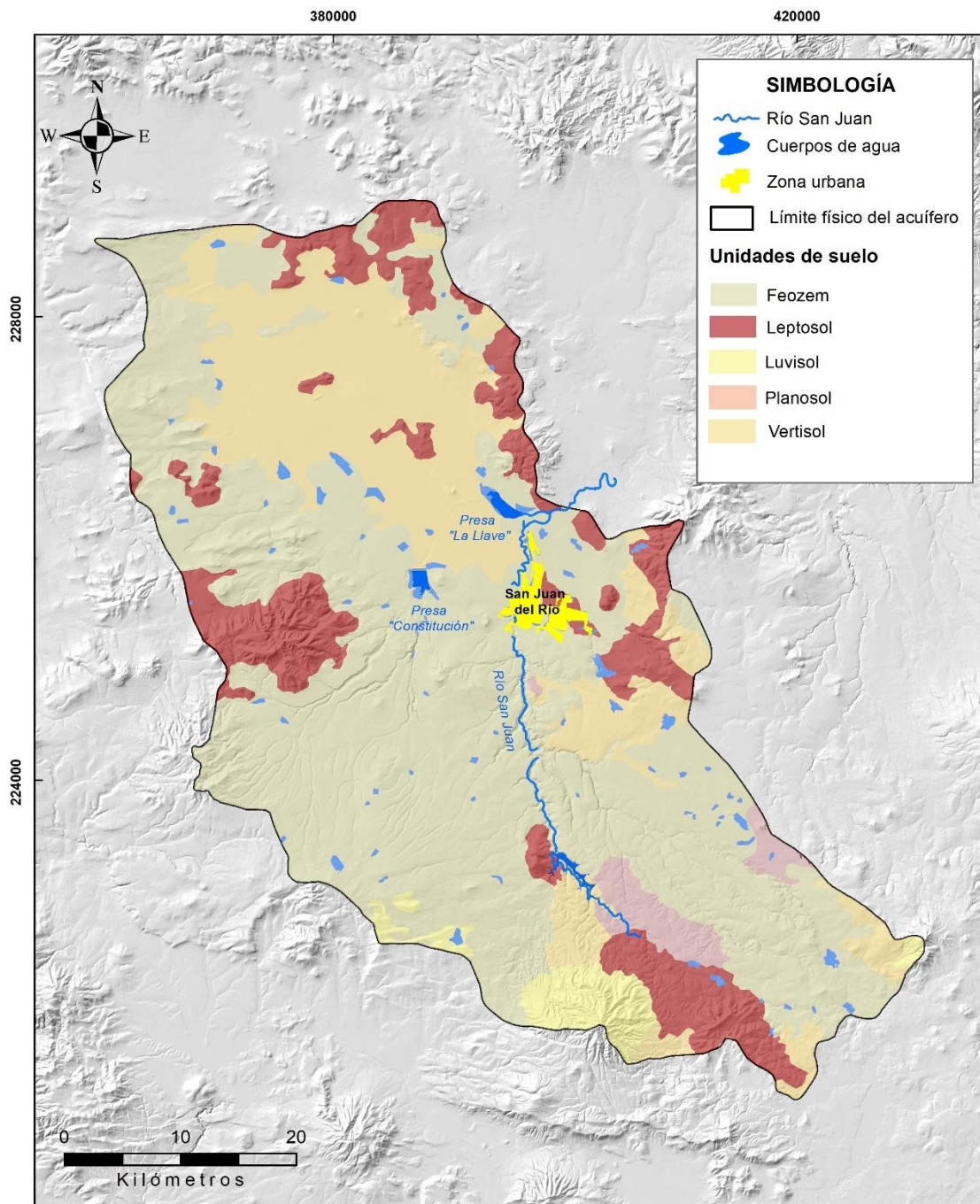


Figura 3.3. Mapa de tipos de suelos de la zona de estudio. Acuífero Valle de San Juan del Río (INEGI, 2006).

3.4. Uso de suelo

De acuerdo con la información de INEGI (2017) en la zona de estudio se identifican 12 usos de suelo: agricultura de temporal, agricultura de riego, zona urbana, pastizal inducido, matorral crasicuale, vegetación secundaria, cuerpos de agua, bosque de encino, bosque encino-pino, bosque de pino, selva baja caducifolia y área sin vegetación (Figura 3.4).

En este contexto, la agricultura de temporal es la más predominante en el área de estudio, abarcando el 41.28 % del total de la superficie, seguida de la agricultura de riego que se practica desde la zona este hasta la norte del valle, con un 23.03 % y, en tercer lugar, la vegetación secundaria con 13.13 %, que se encuentra en la periferia del valle. Las zonas de bosque, pastizal inducido, selva y área sin vegetación ocupan en total el 22.57 % y se localizan al noroeste y suroeste, en menor proporción (Tabla 3.1).

Por último, la zona urbana ocupa un área de 87.54 km², lo que representa el 3.20 % del área total de la zona de estudio, y esta se concentra en la zona centro y hacia la porción norte del valle.

Tabla 3.1. Porcentaje de ocupación de los diferentes tipos de suelo en la zona de estudio. Acuífero Valle de San Juan del Río (INEGI, 2017).

Uso de suelo	Área	
	Km ²	%
Agricultura de temporal	1129.03	41.28
Agricultura de riego	629.78	23.03
Vegetación secundaria	359.00	13.13
Pastizal inducido	316.77	11.58
Bosque de encino	105.96	3.87
Zona urbana	87.54	3.20
Matorral crasicuale	46.13	1.69
Cuerpos de agua	22.67	0.83
Selva baja caducifolia	20.46	0.75
Bosque de encino-pino	13.91	0.51
Bosque de pino	2.32	0.08
Área sin vegetación	1.52	0.06
Superficie total	2735.09	100

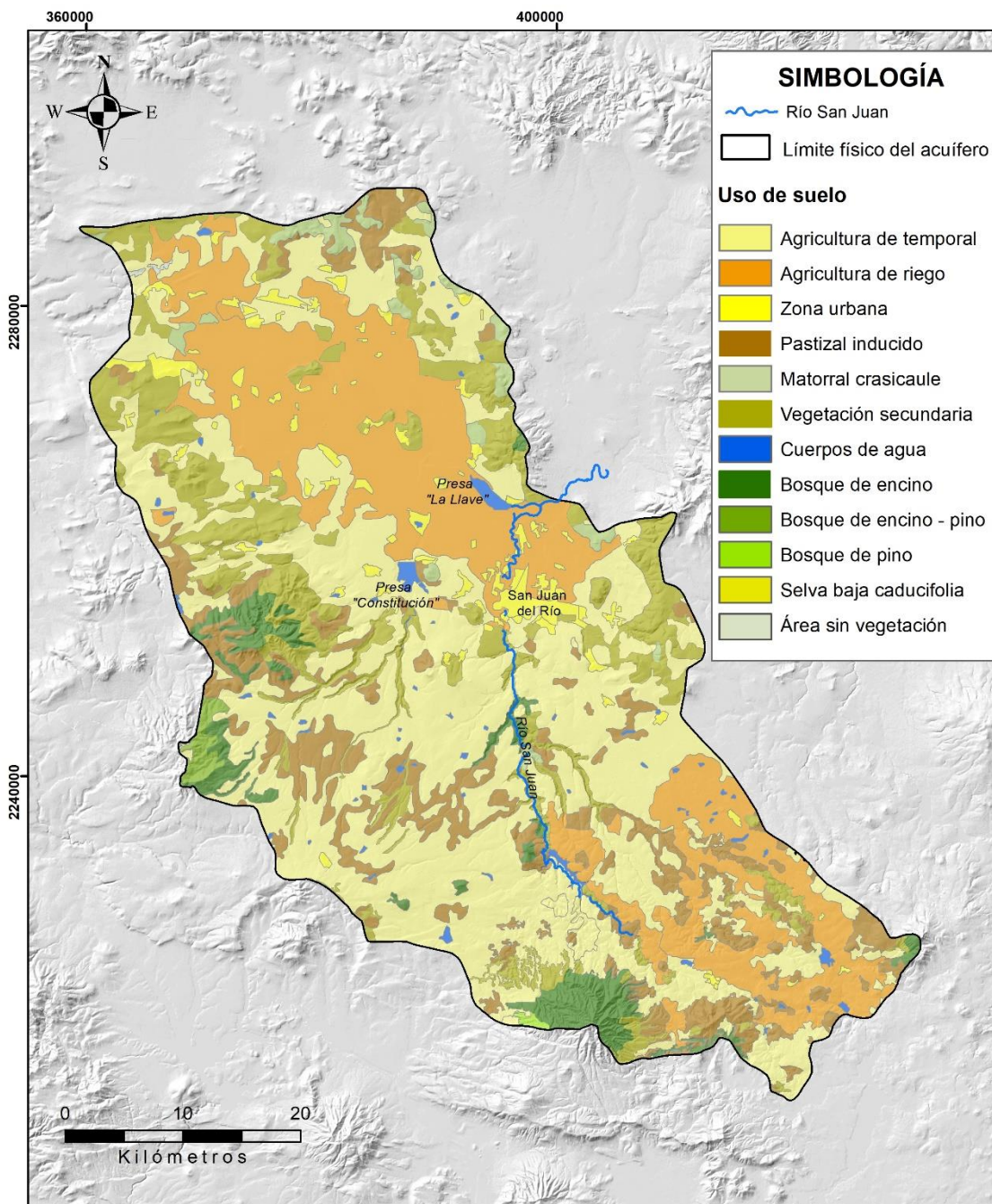


Figura 3.4. Mapa de uso de suelo de la zona de estudio. Acuífero Valle de San Juan del Río (INEGI, 2017).

3.5. Geología

Debido a su ubicación geográfica, el acuífero Valle de San Juan del Río se localiza dentro de la provincia geológica “Faja Volcánica Transmexicana”, y en concreto en la Subprovincia Llanuras y Sierras de Querétaro e Hidalgo. La zona de estudio se caracteriza por ser un valle de pendiente suave y lomeríos bajos, con elevaciones que exceden los 2,600 msnm (MAV, 2012; Ayala & Aguirre, 1993).

La geología esta predeterminada por procesos de origen volcánico y sedimentario, con edades comprendidas desde el Terciario Medio (Oligoceno) hasta el Cuaternario. El Servicio Geológico Mexicano (SGM, 2010) describe las características litológicas de las unidades como (Figura 3.5):

a) Riolitas y Tobas Riolíticas del Oligoceno (ToR-TR)

Es la unidad de mayor edad (Oligoceno) que aflora en la zona de estudio. Es una unidad de composición ácida, localizada principalmente al noreste del acuífero. Un rasgo característico de esta unidad es la formación de domos riolíticos. En los sitios donde se encuentra dichos domos, se observa fracturamiento en diaclasas de manera vertical, así como fracturamiento secundario, el cual, en la mayoría de los casos, se encuentra abierto y sin relleno, siendo un factor favorable para la infiltración de agua.

b) Andesitas del Mioceno (Tm A)

Esta unidad sobreyace a las riolitas descritas anteriormente. Sus principales afloramientos se localizan en el extremo sureste del acuífero. Presenta una composición andesítica y en partes asemejan a basaltos vesiculares.

c) Andesitas y Basaltos del Mioceno (TmA-B)

Son rocas de composición andesítica y basáltica, de color gris oscuro, presentando vesículas en su cima. La unidad se localiza al norte de la zona de estudio, presentando fracturamiento intenso.

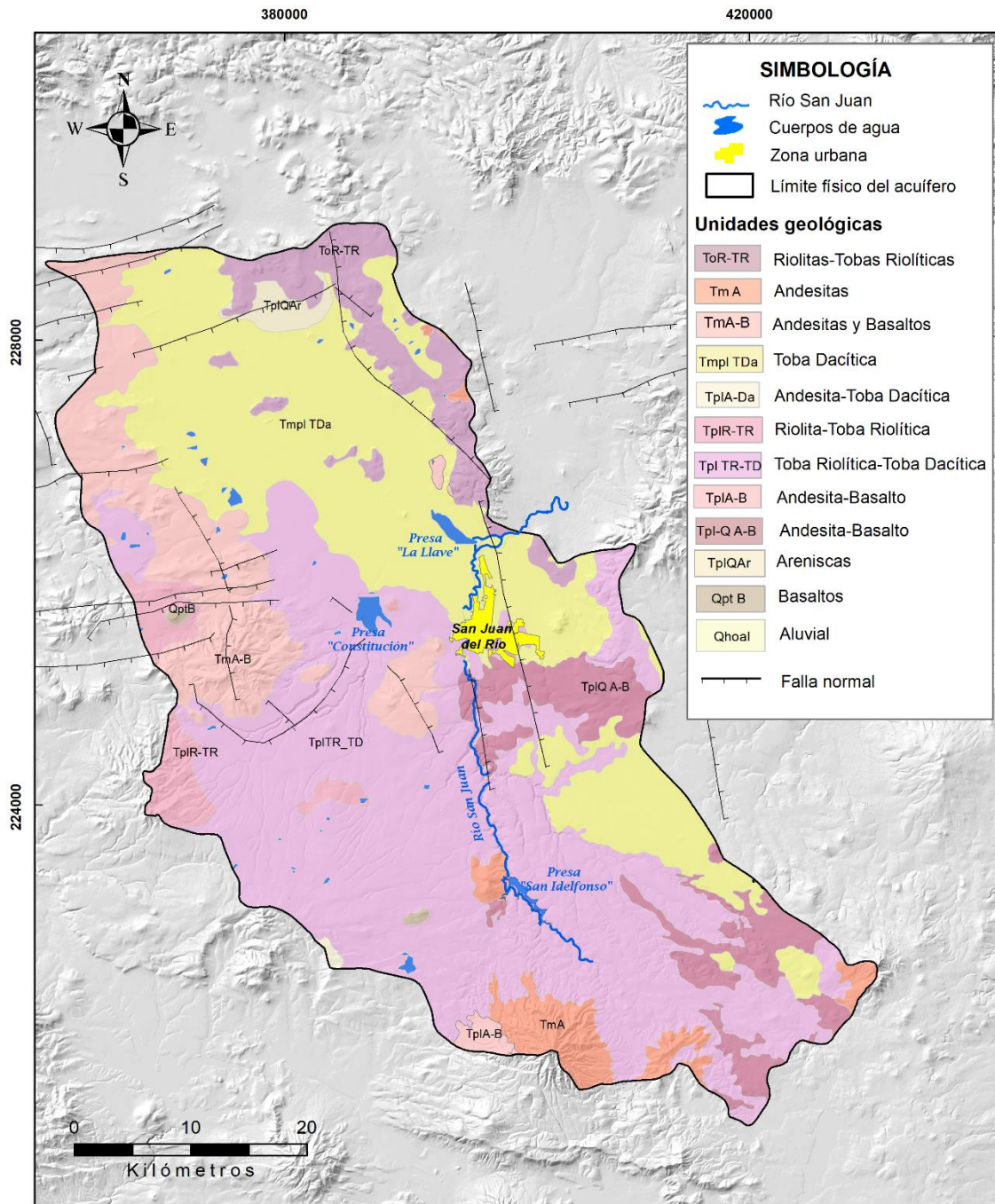


Figura 3.5. Mapa geológico de la zona de estudio. Acuífero Valle de San Juan del Río (SGM, 2010).

d) Toba Dacítica (Tmpl –TDa)

Es una de las principales unidades producto de la Caldera de Amazcala, denominada Pómez Ezequiel Montes. Está compuesta por depósitos de caída libre y flujos piroclásticos, de composición dacítica-riolítica. La parte superior de esta unidad está compuesta por capas de lapilli, que varían de fino a grueso, intercalados con capas horizontales y lentes de pómez.

Debajo de este depósito, se encuentra un segundo depósito de lapilli, de granulometría media en la base y fina en la cima, intercalado con horizontes con material reabajado, mientras que, en la parte inferior, se observa un depósito de pómez color gris claro, de granulometría más gruesa y con gradación simétrica. Esta unidad se encuentra distribuida principalmente en la zona de valle.

e) Andesita-Dacita del Plioceno (Tpl A-Da)

Se localiza al sur de la zona de estudio, en su mayoría fuera de la poligonal que enmarca al acuífero Valle de San Juan del Río, y está constituida por material piroclástico de composición andesítica-basáltica, producto de la Caldera de Amealco.

f) Riolita-Toba Riolítica del Plioceno (Tpl R-TR)

La unidad Riolita-Toba Riolítica consiste en un depósito de riolitas e ignimbritas de color rosa claro al fresco y de color amarillento al intemperismo, con textura fluidal que en algunas partes se observa ondulada, y con fracturamiento, pero este se encuentra relleno por lo cual su permeabilidad es baja. Su distribución espacial se concentra principalmente en la zona suroeste del acuífero.

g) Toba Riolítica y Toba Dacítica del Plioceno (Tpl TR-TD)

Dentro de esta nomenclatura se engloban distintas unidades, la principal, por su amplia distribución, es la Toba Amealco, tratándose de una secuencia piroclástica que incluye tres unidades de ignimbritas consolidadas intercaladas con depósitos de lapilli de caída libre, que están compuestas principalmente por ceniza o de lapilli pumicítico de color café claro con textura areno-arcillosa, flujos de lodo y depósitos lacustres.

Es una de las unidades de mayor extensión en la zona de estudio. Su espesor es variable, desde tres metros hacia la parte más distal de la caldera de Amealco, hasta 50 m en las zonas cercanas.

h) Andesita-Basalto (TplQ A-B)

Se trata de una unidad de andesita-basalto que se localiza al oriente y sur de la zona de estudio, y que presenta textura vesicular rellena de calcedonia. Esta unidad se encuentra fracturada, lo que permite la infiltración de agua.

i) Areniscas del Plioceno-Cuaternario (TplQar)

Es una unidad compuesta principalmente por depósitos vulcano-sedimentarios conformados por clastos angulosos de toba riolítica con diversos tamaños, además de vidrio volcánico soportados por una matriz de arena y, en menor proporción, limos.

j) Basaltos cuaternarios (Qpt B)

Es una unidad compuesta por basaltos de color negro. En algunas zonas predomina la presencia de brechas, y su textura es vesicular. Se presenta en la zona de estudio en pequeños afloramientos. Esta unidad está fuertemente fracturada, por lo que se facilita la infiltración de agua al subsuelo.

k) Aluvión (Qhoal)

Es un material reciente que se encuentra, principalmente, en los cauces de los arroyos y ríos, así como en algunas presas como material de azolve. Está constituido por cantos rodados, arenas, limos y arcillas, productos de la denudación de las rocas preexistentes.

l) Depósitos lacustres

La secuencia sedimentaria con la que están rellenos los valles es heterogénea. A partir de cortes litológicos de pozos se ha identificado una secuencia no continua de depósitos lacustres.

3.6. Hidrología superficial

El acuífero Valle de San Juan del Río pertenece hidrológicamente a dos zonas (Figura 3.6); la primera se ubica en la porción noroeste del acuífero y corresponde a la Región Hidrológica número 12 Lerma-Santiago y forma parte de la cuenca del Río Querétaro, y la segunda, a la cual pertenece la mayor parte del acuífero, es la Región Hidrológica número 26 Pánuco; y forma parte de la cuenca hidrológica Río San Juan (CONAGUA, 2018a).

En el caso de las aguas precipitadas en la Región Hidrológica Lerma-Santiago, drenan hacia el Río Querétaro, el cual, aguas abajo, toma el nombre de Río Laja, cuyas aguas desembocan en el Lago de Chapala, para posteriormente alcanzar el Océano Pacífico. En el caso de la lluvia precipitada en la Región Hidrológica Alto Pánuco, escurre a través de una serie de arroyos: Sauz, Ignacio Pérez, y San Clemente, entre otros, con dirección al Río San Juan, el cual, aguas abajo, toma el nombre del Río Moctezuma, para finalmente desembocar en el Golfo de México (MAV, 2012).

La corriente superficial más importante es el Río San Juan, el cual nace a 2.5 km al poniente de la localidad de San Andrés Timilpan en el estado de México, con el nombre de Arroyo Zarco. Su cuenca es de 2,840 km² en la entidad queretana y su caudal promedio es de 184 hm³/año. Sus afluentes principales lo constituyen los arroyos Galindo, La D, Paso de Mata, Cano, La H y los drenes Caracol, La Culebra y Banthi (DOF, 2015).

Las obras más notables de la infraestructura hidráulica superficial son tres presas de almacenamiento que abastecen al Distrito de Riego 023 San Juan del Río mediante canales: San Idelfonso con capacidad de almacenamiento 52.3 hm³ ubicada al sureste del acuífero, al noreste se encuentra la presa La Llave, con una capacidad de 9.3 hm³; mientras que en la zona central del área se ubica la presa Constitución con capacidad de 65 hm³ (MAV, 2012; DOF, 2015).

Cabe señalar que los datos cartográficos para la elaboración del mapa hidrográfico de la zona de estudio (Figura 3.6) se obtuvieron a través del sitio web “Datos Abiertos de México” siendo esto parte de la información topográfica básica de SEDENA (2015).

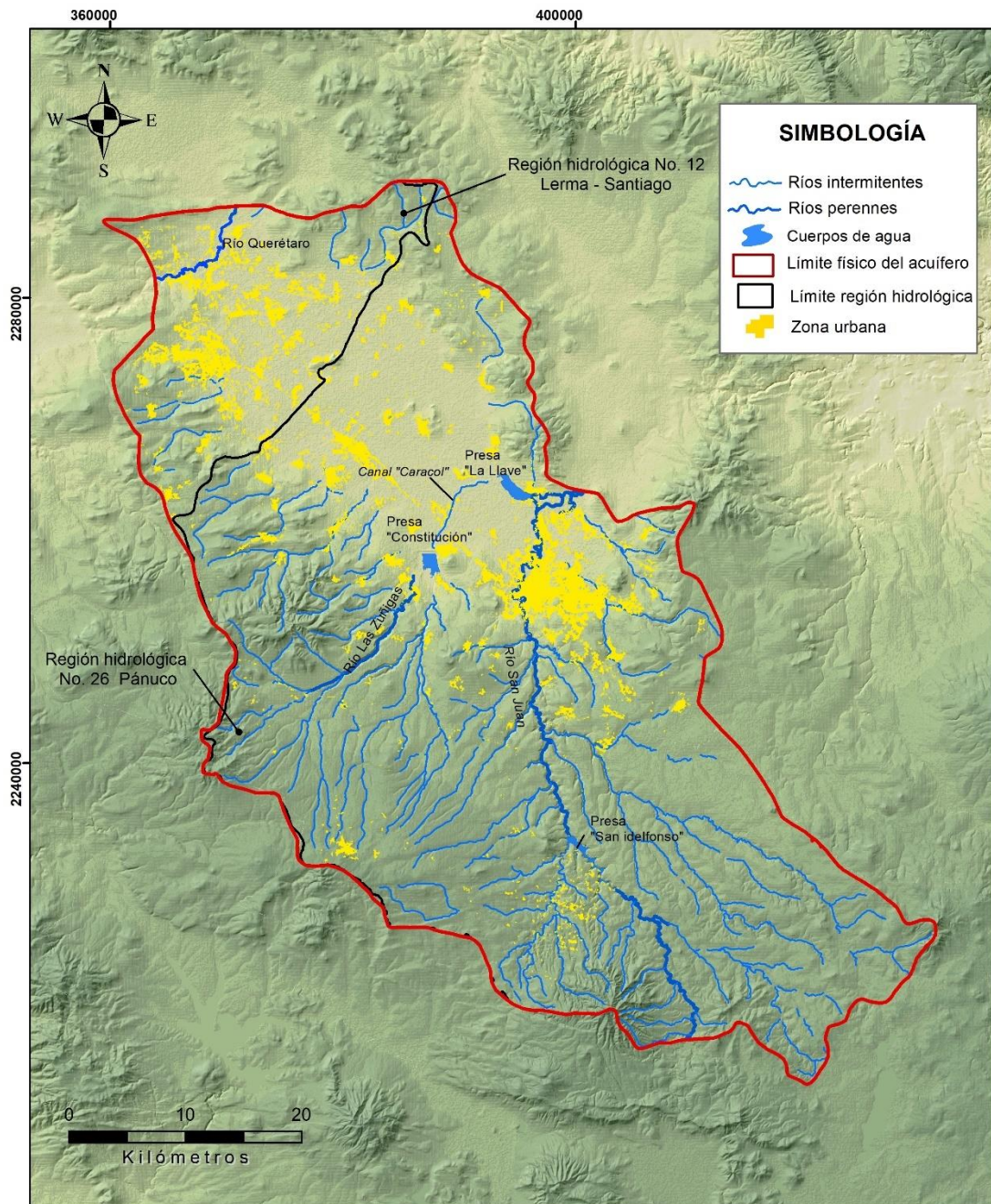


Figura 3.6. Mapa hidrográfico de la zona de estudio. Acuífero Valle de San Juan del Río (Elaborado con datos de SEDENA, 2015).

3.7. Hidrogeología

El acuífero Valle de San Juan del Río es de tipo libre, con fenómenos locales de semiconfinamiento, del que se extrae agua subterránea a diferentes profundidades y de formaciones rocosas con diversas condiciones hidrodinámicas. Está formado, en su nivel más superficial, por una serie de depósitos volcánicos de caída libre, con intercalaciones de depósitos granulares de espesores reducidos; bajo este material se encuentran rocas básicas, principalmente andesitas y basaltos, con permeabilidades de media a alta, los cuales aportan la mayor cantidad de agua subterránea que se extrae del acuífero (MAV, 2012).

Unidades hidrogeológicas

De acuerdo con el estudio realizado por el SGM en el año 2010, en el acuífero Valle de San Juan del Río, se pueden diferenciar cuatro unidades hidrogeológicas (Figura 3.7).

a) Unidad Fracturada con Permeabilidad Alta (de 10^{-1} a 10^{-2} cm/s)

Esta unidad está conformada por las andesitas y basaltos del Plioceno-Cuaternario (Tpl QA-B) y los basaltos del Pleistoceno (Qpt B). Su permeabilidad es alta por el intenso fracturamiento, operando como unidades de recarga al sistema acuífero y, a profundidad, como una unidad hidrogeológica atractiva para la extracción de agua subterránea.

La distribución geográfica de la unidad se concentra, principalmente, al extremo sureste del acuífero, específicamente al sur y suroeste de la ciudad de San Juan del Río; de igual forma, se presentan afloramientos aislados, al sur y oriente de la zona de estudio, subyaciendo a depósitos volcánicos de caída libre producto de las calderas Amealco y Amazcala.

b) Unidad Fracturada con Permeabilidad Media (de 10^{-3} a 10^{-4} cm/s)

Se trata de una unidad que, en promedio, posee características de permeabilidad media; sin embargo, de manera local se observan afloramientos con variaciones de permeabilidad de media-alta a media-baja. La unidad está formada por tres conjuntos litológicos:

i) Material ácido del Oligoceno (To R-TR), tratándose de tobas riolíticas y riolitas con intensidad de fracturamiento, permitiendo la infiltración y tránsito de agua subterránea.

ii) Andesitas (TmA), con fracturamiento secundario caracterizado por una intensidad que varía de media a intensa.

iii) Andesitas basálticas del Mioceno (TmA-B), también con fracturamiento secundario.

La mayor parte de esta unidad se encuentra en el subsuelo, de donde se extrae el mayor volumen de agua subterránea; sin embargo, cuando la unidad se encuentra en superficie opera como zona de recarga.

Esta unidad aflora en los flancos del Valle de San Juan del Río, en la zona norte y noreste predomina el material ácido (riolitas y tobas riolíticas), cuya permeabilidad varía de media a baja, mientras que al oriente y surorientado predomina el material básico (andesitas y basaltos), con permeabilidad que varía de media a alta en zonas puntuales.

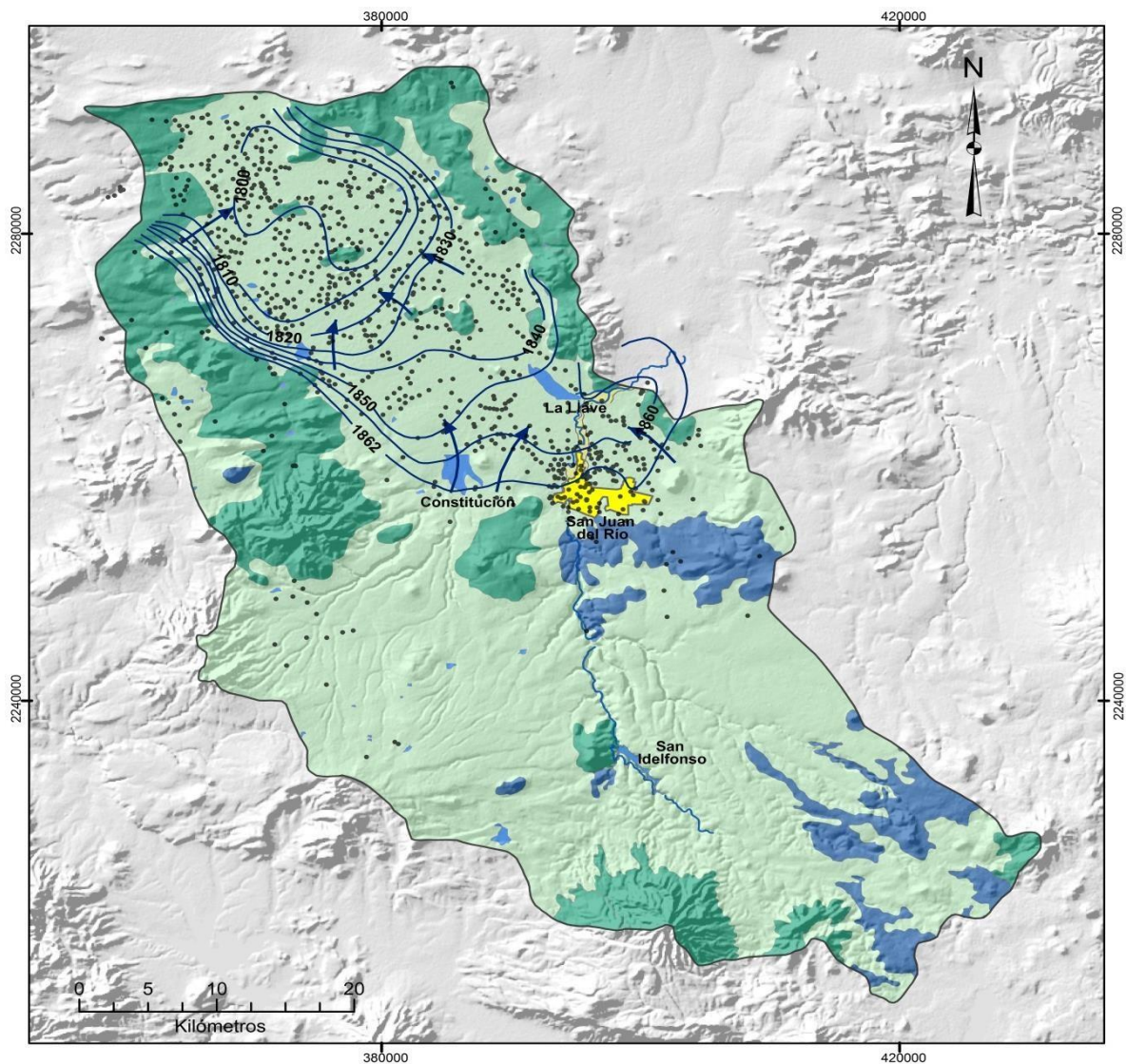
c) Unidad Fracturada con Permeabilidad Baja (de 10^{-5} a 10^{-6} cm/s)

Comprende las riolitas del Mioceno (Tm R), las tobas dacíticas del Mioceno-Plioceno (Tmpl TDa), y las andesitas y dacitas del Plioceno (Tpl A-Da), así como las tobas riolíticas y dacíticas también del Plioceno (Tpl Tr-TD). El material arcilloso forma parte de la matriz, por lo cual su permeabilidad es baja, aunque en zonas puntuales su matriz es arenosa, incrementando su permeabilidad.

Se distribuye prácticamente en todo el valle, con excepción de la zona norte y sur de la ciudad de San Juan del Río.

d) Unidad Granular con Permeabilidad Alta (mayor de 10^{-1} cm/s).

Se trata de un material sedimentario constituido por depósitos recientes con espesores poco profundos, observándose únicamente al norte de la ciudad San Juan del Río.



SIMBOLOGÍA

Unidades Hidrogeológicas

Material Fracturado

- Permeabilidad Alta
- Permeabilidad Moderada
- Permeabilidad Baja

Material Sedimentario

- Permeabilidad Alta

- Pozos con datos piezométricos

- Isoclinas de nivel de agua subterránea, noviembre 2011.

- Dirección aproximada del flujo del agua subterránea

- Río San Juan

- Límite del Acuífero

- Área urbana

- Cuerpos de agua

Figura 3.7. Mapa hidrogeológico del acuífero Valle de San Juan del Río (Modificado de SGM, 2010; Medina 2017).

Es importante resaltar que el comportamiento de las diferentes unidades hidrogeológicas no es homogéneo. Los parámetros hidráulicos que las caracterizan abarcan un amplio rango de valores producto de la variabilidad litológica y de la geometría del subsuelo; sin embargo, y a pesar de la complejidad del sistema, se han establecido valores generales asignados con base en la permeabilidad de mayor presencia, existiendo, hasta la fecha, incertidumbres importantes con respecto al rango de valores y distribución en cada unidad (Medina, 2017).

Con base en datos del año 2011, las profundidades del nivel del agua subterránea en el área de estudio oscilaron entre los 30 y 170 m., presentándose los valores de mayor profundidad en las zonas centro-norte y noroeste del valle; mientras que los valores más someros, se localizan en las laderas de las zonas montañosas (MAV, 2012). De acuerdo con la configuración piezométrica (Figura 3.7), el flujo de agua subterránea presenta una dirección principal hacia el noreste, porción centro y noroeste del acuífero (Medina, 2017).

Según autores como Antares (2008) y SGM (2010), la recarga principal del acuífero proviene de la infiltración de una parte del agua que precipita en la región y por entradas subterráneas horizontales provenientes de las sierras que circundan al valle. Además, en la zona de estudio se presenta una importante recarga inducida, generada por el retorno de riego producto de la actividad agrícola y las infiltraciones derivadas de las presas Constitución de 1917 y la Llave.

La explotación del acuífero se lleva a cabo mediante pozos de extracción ubicados en su mayoría en el valle donde su uso es destinado principalmente a la actividad agrícola, público urbano e industrial, extrayéndose un volumen total aproximado 324.84 hm³/año (CONAGUA 2018a).

3.8. Hidrogeoquímica

Con base en la información disponible en el acuífero Valle de San Juan del Río se han podido recopilar 6 estudios sobre hidroquímica (Tabla 3.4).

Los estudios realizados anteriormente varían con respecto al total de pozos muestreados y a la ubicación de estos. En el año de 1994 (Evaluación Geohidrológica del Valle de Amealco, estado de Querétaro. Guysa, SA. C.V), se muestrearon un total de 10 pozos, sin embargo,

sólo 2 de ellos se ubican en la poligonal del acuífero del Valle de San Juan del Río, específicamente en la parte sur (MAV, 2012).

En el trabajo realizado en el año 2003 (Estudio Geohidrológico Isotópico en el Valle de Amealco, Querétaro. Lesser y Asociados) se obtuvieron muestras de 44 pozos y 7 estaciones de lluvia, 32 de ellas se ubica dentro del límite del acuífero y la mayoría en la parte este.

En el monitoreo que llevó a cabo la Comisión Estatal del Agua (CEA), durante los años 2001-2009, de los 11 puntos muestreados, 6 se encontraban dentro de los límites del acuífero; mientras que en el año 2010 se efectuó un monitoreo de 37 pozos, y 32 de los cuales se ubicaron dentro de los límites del acuífero, cubriendo las zonas norte y oeste.

Tabla 3.2. Estudios hidroquímicos realizados en la zona de estudio. Acuífero Valle de San Juan del Río (Modificada de MAV, 2012; Lesser, 2016).

Año de estudio	Título	Autor	No. Puntos	Puntos en SJRQ	Elementos analizados
1994	Evaluación Geohidrológica del Valle de Amealco, Querétaro	Guysa, SA. C.V.	10	2	pH, CE, SDT, Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Na ⁺ , K ⁺ , SO ₄ ²⁻ , NO ₃ ⁻ , HCO ₃ ⁻ , CO ₃ ⁻ , Cl ⁻
2003	Estudio Geohidrológico Isotópico en el Valle de Amealco, Querétaro	Lesser y asociados	44 pozos y 7 estaciones de lluvia	32	pH, CE, T° agua, Salinidad, Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Na ⁺ , K ⁺ , SO ₄ ²⁻ , HCO ₃ ⁻ , CO ₃ ⁻ , Cl ⁻ , ² H, ³ H, ¹⁸ O
2001-2009	Tablas-monitoreo	Comisión Estatal de Agua (CEA)	11	6	pH, Sólidos sedimentables, SDF, SDT, SDV, SST, SSV, STF, STV, ST, SO ₄ ⁻ , T° agua, Turbiedad, Color verdadero, CE, DBO, DQO, Dureza Ca ²⁺ , Dureza Mg ²⁺ , Dureza Total, Fenoles, PO ₄ , G y A, HCO ₃ ⁻ , CO ₃ ⁻ , Cl ⁻ , N-NO ₃ ⁻ , N, Orto fosfatos, Oxígeno disuelto, Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Coliformes fecales
2010	Tabla Química CEA	Comisión Estatal de Agua (CEA)	37	32	T° agua, pH, CE, SDT, Turbiedad, Olor, Color (aparente), Dureza total, Fenoles, Cl ⁻ , F ⁻ , NO ₃ ⁻ , NO ₂ ⁻ , NH ₄ ⁺ , SO ₄ ²⁻ , Al ³⁺ , As ⁺ , Ba ²⁺ , Cd ²⁺ , Cu ⁺ , Cr ⁺ , Fe ²⁺ , Mn ²⁺ , Hg ²⁺ , Pb ²⁺ , Na ⁺ , Zn ²⁺ , Coliformes totales y Coliformes fecales.
2012	Caracterización del Acuífero del Valle de San Juan del Río. Segunda Etapa: Hidrogeoquímica y Red De Monitoreo	MAV SJR	20	20	Color, Olor, pH, T° agua, CE, SDT, Turbiedad, NH ₄ ⁺ , CF, CT, G y A, Pb ²⁺ , Ca ²⁺ , K ⁺ , Mg ²⁺ , Na ⁺ , SO ₄ ⁻ , Cl ⁻ , HCO ₃ ⁻ , F ⁻ , Si ⁴⁺ , Dureza como CaCO ₃
2016	Aplicación de Técnicas Isotópicas Valle de San Juan del Río, Querétaro	Lesser	30	30	pH, °T, CE, Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Na ⁺ , K ⁺ , HCO ₃ ⁻ , Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻ , Deuterio, ¹⁸ O, SDT.

En el año 2012, MAV realizó una caracterización del acuífero del Valle de San Juan del Río. (Hidrogeoquímica y Red de Monitoreo) que incluyó la obtención de 20 muestras de aguas en pozos, las cuales se encontraban en su totalidad dentro de la zona de estudio.

Por último, en el año 2016, Lesser aplicó técnicas isotópicas en 30 muestras de agua recolectadas en el valle, para conocer el destino de las fugas de las presas Constitución, La Llave y San Idelfonso, y se concluyó que existen filtraciones desde las presas que recargan al acuífero del valle.

En dichos estudios se resaltan algunas características fisicoquímicas en los pozos muestreados, como es la temperatura del agua, la cual es superior a los 30 °C, y las concentraciones de flúor y arsénico superiores al límite establecido por la normatividad mexicana para agua de uso y consumo humano (NOM-127-SSA1-1994).

CAPÍTULO 4

Materiales y métodos

Con la finalidad de alcanzar los objetivos de la presente propuesta de investigación, se realizaron una serie de actividades que conforman 6 etapas (Figura 4.1), que se describen a continuación:

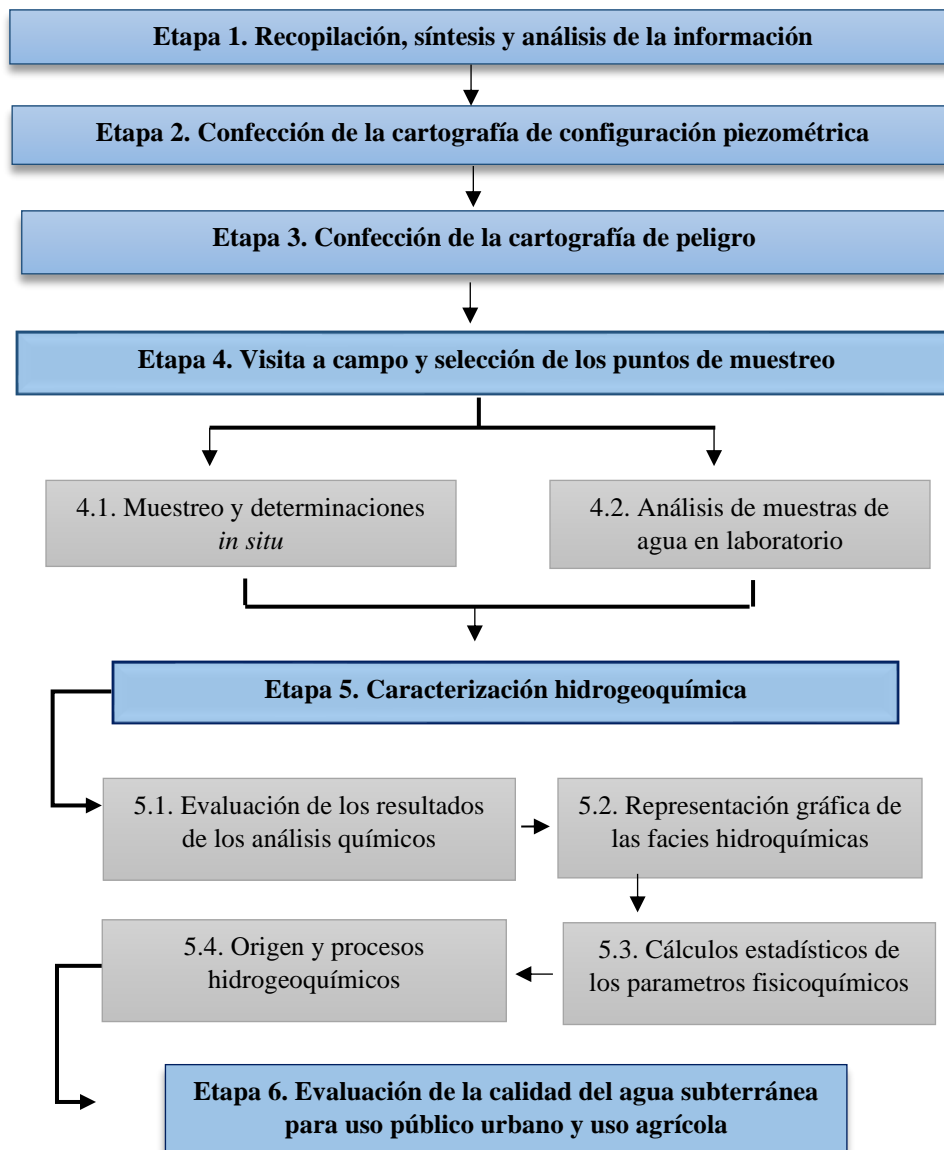


Figura 4.1 Diseño metodológico de la investigación

4.1. Recopilación, síntesis y análisis de la información

Se realizó la recopilación bibliográfica y cartográfica de la información disponible sobre climatología, edafología, geología e hidrogeología, así como de las características hidroquímicas del acuífero Valle de San Juan del Río. Adicionalmente, se obtuvieron los datos cartográficos correspondientes a las características de la zona de estudio, los cuales se describieron en el Capítulo 3. Se utilizó una escala 1:250000 y una proyección de WGS84_UTM 14N. Como herramientas se utilizaron los Sistemas de Información Geográfica ArcGIS (ESRI, 2016) y TerrSet (Eastman, 2015).

Para esta etapa fue necesario recurrir a diversas fuentes de información, entre las cuales destacan las siguientes instituciones: Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMéx), Comité Técnico de Aguas Subterráneas de Valle de San Juan del Río (COTAS SJR), Comisión Estatal de Aguas de Querétaro (CEAQ), Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) e Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). En estas instituciones se realizó la consulta de reportes técnicos, artículos científicos, artículos generales, bibliografía especializada y tesis, entre otros.

Además, previo a los trabajos de campo, se llevó a cabo reunión con el personal del COTAS SJR para dar a conocer los objetivos y los alcances de este trabajo de investigación, y también solicitar su apoyo para el recorrido, establecer puntos de muestreo, definir el cronograma de actividades y la logística de los trabajos de campo. Además, se efectuó una consulta de los datos históricos de las características fisicoquímicas del agua subterránea, siendo esta información de gran relevancia para el presente trabajo de investigación, lo cual facilitó la identificación de elementos químicos presentes en el agua subterránea.

4.2. Confección de la cartografía de la configuración piezométrica

Para dar cumplimiento al objetivo 2 se recopilaron los datos piezométricos correspondientes con el registro del COTAS SJR. Cabe mencionar que la red cuenta con datos desde el año 1942 hasta la fecha, pero algunos pozos de extracción han dejado de funcionar a lo largo del tiempo, por ende, existen años en los que no se cuenta con información completa.

De los 64 pozos de monitoreo, solo 49 pozos tienen registros para el año 2019, con niveles piezométricos que varían entre 2241.44 y 1800 msnm (Tabla 4.1). Para analizar e interpretar la configuración piezométrica, los datos piezométricos fueron interpolados de forma manual mediante el método de triangulación, y posteriormente se digitalizaron con las herramientas de ArcGIS.

Tabla 4.1. Niveles piezométricos del agua subterránea ASJR, año 2019 (NP: nivel piezométrico).

ID	CLAVE COTAS	Altitud (msnm)	Profundidad del agua (m)	NP (msnm)	ID	CLAVE COTAS	Altitud (msnm)	Profundidad del agua (m)	NP (msnm)
1	P0765SJ	2322	80.56	2241.44	33	P0427SJ	1905	87.58	1817.48
2	P0773SJ	2344	S/D	S/D	34	P0448SJ	1906	103	1802.83
3	P0949SJ	2296	S/D	S/D	35	P0461SJ	1945	2.10	1943.33
4	P0770SJ	2368	183.02	2184.98	36	P0473SJ	2084	19.49	2064.51
5	P0128SJ	1905	S/D	S/D	37	P0485SJ	1903	81.40	1822.03
6	P0315SJ	1912	S/D	S/D	38	P0486SJ	1905	89.98	1814.59
7	P0695SJ	1933	116	1817.2	39	P0951SJ	1902	77.68	1823.93
8	P0145SJ	1950	114.27	1835.73	40	P0002SJ	1905	50.63	1854.28
9	P0507SJ	1909	107.78	1801.22	41	P0004SJ	1903	61.79	1840.85
10	P0191SJ	1922	S/D	S/D	42	P0005SJ	1901	62.44	1838.62
11	P0283SJ	1916	104.88	1811.12	43	P0007SJ	1895	38.90	1856.18
12	P0286SJ	1920	119.90	1799.96	44	P0008SJ	1910	S/D	S/D
13	P0322SJ	1895	93.67	1801.33	45	P0018SJ	1923	S/D	S/D
14	P0574SJ	1893	S/D	S/D	46	P0032SJ	1892	S/D	S/D
15	P0545SJ	1919	116.24	1802.76	47	P0036SJ	1901	70.18	1831.27
16	P0625SJ	1898	104.10	1793.9	48	P0037SJ	1917	73.93	1842.93
17	P0656SJ	1917	121.97	1795.26	49	P0038SJ	1916	73.06	1843.4
18	P0866SJ	1857	71.73	1785.27	50	P0039SJ	1918	76.10	1841.86
19	P0794SJ	1976	41.90	1933.85	51	P0083SJ	1987	S/D	S/D
20	P0948SJ	2179	130.16	2048.51	52	P0159SJ	1936	75.70	1860.45
21	P0040SJ	1918	73.98	1843.6	53	P0235SJ	1902	66.86	1835.47
22	P0041SJ	1907	66.23	1840.85	54	P0491SJ	1905	43.77	1861.35
23	P0046SJ	1898	72.91	1825.09	55	P0750SJ	1903	53.70	1849.3
24	P0051SJ	1916	82.97	1833.18	56	P0752SJ	1913	49.79	1863.21
25	P0118SJ	1918	83.37	1834.63	57	P0763SJ	1952	112.63	1839.53
26	P0224SJ	1922	120.02	1801.98	58	P0862SJ	1958	S/D	S/D
27	P0260SJ	1904	73.11	1831.38	59	P0950SJ	1901	45.84	1854.87
28	P0276SJ	1900	S/D	S/D	60	P1005SJ	1926	51.72	1874.28
29	P0326SJ	1902	89.61	1812.61	61	P0188SJ	1934	118.07	1815.93
30	P0327SJ	1905	S/D	S/D	62	P0889SJ	1911	S/D	S/D
31	P0368SJ	1910	108.23	1802.09	63	P0893SJ	1892	39.57	1852.69
32	P0405SJ	1909	111.90	1797.42	64	P0901SJ	1890	34.35	1855.89

Nota: NP. - nivel piezométrico; S/D.- sin dato

4.3. Confección de la cartografía de peligro de contaminación

Con la finalidad de dar cumplimiento al objetivo 3 se llevó a cabo la revisión de la información previa sobre la cartografía de peligro de contaminación de las aguas subterráneas (MAV, 2012). Sin embargo, con fines en el presente trabajo de investigación, se consideró evaluar el peligro de contaminación con información más reciente con base en la actualización del inventario de las fuentes potenciales de contaminación seleccionadas previamente en MAV (2012). El mapa de vulnerabilidad a la contaminación que se utilizó fue el elaborado en el estudio de MAV (2012).

4.3.1. Revisión de la cartografía de vulnerabilidad

Se realizó la revisión de la cartografía de vulnerabilidad del acuífero obtenida a partir del método DRASTIC (Aller et al., 1987) en el estudio de MAV (2012). Dicho método se basa en la asignación de índices que varían de 1 (vulnerabilidad mínima) a 10 (vulnerabilidad máxima), de acuerdo con las características y el comportamiento de siete parámetros: profundidad del nivel freático (D); recarga neta (R); litología del acuífero (A); tipo de suelo (S); topografía (T); litología de la zona no saturada (I) y conductividad hidráulica (C).

En el estudio de MAV (2012) cada parámetro fue clasificado dentro de los pesos, rangos y puntajes establecidos por el método DRASTIC (Aller et al., 1987), y se calculó el índice de vulnerabilidad con álgebra de mapas, utilizando el software de ArcGIS, con base en la siguiente ecuación (Ec.4.1).

$$\text{DRASTIC} = (D_r * D_w) + (R_r * R_w) + (A_r * A_w) + (S_r * S_w) + (T_r * T_w) + (L_r * L_w) + (C_r * C_w)$$

r = puntaje

w = peso

(Ecuación 4.1)

Los resultados obtenidos permitieron conocer el grado de vulnerabilidad e identificar las áreas de mayor o menor susceptibilidad a la contaminación del agua subterránea basándose en los rangos obtenidos.

4.3.2. Actualización del inventario de fuentes potenciales de contaminación y su clasificación mediante el método POSH

La actualización del inventario de fuentes potenciales de contaminación se llevó a cabo mediante una serie de actividades que permitieron identificar y estimar el efecto potencial nocivo de los focos de contaminación existentes en el acuífero Valle de San Juan del Río.

A) Identificación y localización de los focos potenciales de contaminación

La primera fase consistió en la identificación de las fuentes de contaminación consideradas en el inventario establecido en el estudio MAV (2012), las cuales están descritas por autores como Vrba y Adams (2008), Foster *et al.* (2006, 2007) e Hirata (2002). Con base en lo establecido, se identificaron 10 tipos de focos potenciales de contaminación:

1. Establos
2. Gasolineras
3. Cementerios
4. Zona urbana
5. Zona industrial
6. Prácticas agrícolas
7. Bancos de materiales
8. Cauce contaminado (Río San Juan)
9. Plantas de tratamiento de aguas residuales y
10. Sitios de disposición de residuos sólidos.

Se realizó un recorrido en la zona de estudio con el apoyo y supervisión del personal del COTAS SJR para verificar la existencia de cambios en las fuentes de contaminación. Posteriormente, se corroboró la localización de las fuentes de contaminación como son establos, gasolineras, cementerios, bancos de materiales, plantas de tratamientos de aguas residuales, sitios de disposición de residuos sólidos y zonas industriales a través de Google Earth. Las zonas urbanas y agrícolas se identificaron a partir de la imagen LANSAT-8 correspondiente al año 2020 (USGS, 2020) procesada con el software TerrSet.

B) Clasificación de focos potenciales de contaminación

La clasificación de focos potenciales de contaminación identificados se llevó a cabo mediante la asignación cualitativa en la que se establece su efecto potencial nocivo. Este efecto puede ser expresado en términos de alta, moderada o baja carga potencial nociva. La clasificación se efectuó mediante la aplicación del método POSH (Foster *et al.*, 2007), que permite clasificar la carga potencial de los focos con base en dos tipos de distribución: puntual y difusa.

1. Clasificación de focos de contaminación de carácter puntual

Para este tipo de focos de contaminación se han establecido criterios en el método POSH para su clasificación, los cuales se muestran en la Tabla 4.2. Con base en dichos criterios y en las características de propias del área de estudio, se clasificaron los focos potenciales de contaminación de carácter puntual presentes en el acuífero.

Tabla 4.2. Clasificación de fuentes puntuales de contaminación por el método POSH (Foster *et al.*, 2007).

Potencial por carga contaminante al subsuelo	Disposición de residuos sólidos	Sitios industriales	Lagunas de efluentes	Urbanas varias	Exploración minera y petrolera
ELEVADO	Residuos de industrias tipo 3, residuos de origen desconocido	Industrias tipo 3, cualquier actividad que maneje >100kg/d de sustancias químicas	Todas las industrias tipo 3, cualquier efluente (excepto aguas residuales residuales) si el área >5 ha		Operación de campos de petróleo, minas metalíferas
MODERADO	Precipitación >500 mm/año con residuos residenciales/ industriales tipo 1/ agroindustriales, todos los otros casos	Industrias tipo 2	Agua residual residencial si el área >5 ha, otros casos que no figura arriba o abajo	Gasolineras, rutas con tráfico regular de sustancias químicas peligrosas	Algunas minas/ canteras de materiales inertes
REDUCIDO	Precipitación <500 mm/año con residuos residenciales/ industriales tipo 1/agroindustriales	Industrias tipo 1	Efluente residencial, urbano mezclado, agroindustrial y Minero no metalífero si el área <1 ha	Cementerio	

Nota:

Industrias tipo 1.- carpinterías, fábricas de alimentos y bebidas, destilerías de alcohol y azúcar, procesamiento de materiales no metálicos

Industrias tipo 2.- fábricas de caucho, pulpa y papel, textiles, artículos eléctricos, fertilizantes, detergentes y jabones

Industrias tipo 3.- talleres mecánicos, refinería de gas y petróleo, manufacturas de pesticidas, plásticos, productos farmacéuticos y químicos, curtidurías, fábricas de artículos electrónicos, procesamiento de metal.

2. Clasificación de focos de contaminación de carácter difuso

Para clasificar los focos de contaminación de carácter difuso se utilizaron los criterios establecidos por el método POSH, los cuales se detallan en la Tabla 4.3. Se determinó la carga potencial contaminante de las actividades agrícolas y el saneamiento in situ con base en sus características particulares.

Tabla 4.3. Clasificación de fuentes difusas de contaminación por el método POSH (Foster *et al.*, 2007).

Potencial por carga contaminante al subsuelo	FOCOS DE CONTAMINACIÓN	
	Saneamiento	Prácticas agrícolas
ELEVADO	Cobertura del servicio de cloacas menor que 25% y densidad poblacional superior a 100 personas /ha	Cultivos comerciales intensivos y la mayoría de los monocultivos en suelos bien drenados en climas húmedos o con baja eficiencia de riego, pastoreo - intensivo sobre praderas altamente fertilizadas
MODERADO	Intermedio entre elevado y reducido	No se clasifica en este rango
REDUCIDO	Cobertura del servicio de cloacas mayor del 75% y densidad poblacional inferior a 50 personas /ha.	Rotación de cultivos tradicionales, pastoreo extensivo, sistemas de granjas ecológicas, cultivos bajo riego de alta eficiencia en áreas áridas

4.3.3. Evaluación del peligro de contaminación

La cartografía de peligro de contaminación se llevó a cabo mediante la interacción de los índices obtenidos de la cartografía de vulnerabilidad y de la clasificación de los focos potenciales de contaminación. La interacción se realizó mediante la siguiente expresión (Ec. 4. 2):

$$P = (IVI) \times (IF) \quad (\text{Ecuación 4.2})$$

Donde:

P = Peligro de contaminación

IVI = Índice de vulnerabilidad intrínseca del sistema con el método DRASTIC

IF = Índice de fuentes de contaminación clasificadas con el método POSH

La asignación de cada índice está basada en los rangos y puntajes de la Tabla 4.4. Esta interacción da como resultado el índice de peligro con valores que oscilan entre 9 (Valor más alto) y 1 (valor más bajo). De este modo, las zonas con valores entre 6 y 9, se caracterizan

por un peligro de contaminación alto; zonas con puntaje entre 3 y 4 por un peligro de contaminación medio; mientras que zonas con puntaje entre 1 y 2 con bajo peligro de contaminación.

Tabla 4.4. Matriz metodológica para confeccionar la cartografía de peligro de contaminación.

IVI \ IF	1 Nocividad reducida	2 Nocividad moderada	3 Nocividad elevada
1 Baja	1	2	3
2 Media	2	4	6
3 Baja	3	6	9

Nota: IVI: índice de vulnerabilidad intrínseca IF: Índice de fuentes de contaminación

4.4. Trabajo de campo, muestreo y análisis de laboratorio

4.4.1. Visita a campo y selección de los puntos de muestreo

En esta etapa se identificaron los pozos que conforman la red de monitoreo de calidad del agua subterránea del COTAS SJR (Figura 4.2, Tabla 4.5). Con la finalidad de optimizar el tiempo y aumentar la efectividad de los trabajos de campo, se consideró el mapa de peligro a la contaminación elaborado, así como los criterios preestablecidos para las campañas de muestro llevadas a cabo en el año 2011 (MAV, 2012), los cuales se mencionan a continuación:

1. Muestreos anteriores y el análisis de sus resultados.
2. Existencia de algún elemento o compuesto químico de interés en el agua (en este caso NO_3^- , As y F^-).
3. Distribución espacial homogénea de los pozos.

Tabla 4.5. Red primaria de muestreo definida por el COTAS SJR para el año 2011 (MAV, 2012)

ID	No. COTAS	Nombre	X Longitud	Y Latitud	Z Altitud (msnm)	Uso del agua	Prof. (m)
1	CSJR0082	Pozo 33 Granjas Banthi (JAPAM)	401242	2254197	2001	Público - urbano	400
2	CSJR0151	Pozo 03 Pedro Escobedo (CEA)	381683	2266302	1920	Público - urbano	252
3	CSJR0152	Pozo CEA El Sauz*	383888	2264957	1906	Público - urbano	196
4	CSJR0155	Pozo JAPAM 04 Jazmín	391466	2253906	2010	Público - urbano	244
5	CSJR0163	Pozo A.P. La Rueda	396461	2259110	1916	Público - urbano	110
6	CSJR0169	Pozo A.P. Paso de Mata (Viejo)	402915	2248977	2092	Público - urbano	246
7	CSJR0221	Pozo 01 Rancho El Roció	392001	2271693	1913	Agrícola	152
8	CSJR0256	Pozo Hotel Fiesta Americana Galindo	385610	2255787	1955	Servicios	338
9	CSJR0325	Pozo 04 Ejido Guadalupe Septién	384745	2271868	1906	Agrícola	125
10	CSJR0355	Pozo Poliducto S.A.	377595	2271364	1917	Agrícola e Industrial	200
11	CSJR0379	Pozo Granjas El Huesito Grupo Abrego*	391098	2278339	1988	Pecuario	260
12	CSJR0438	Pozo Rancho El Profeta	377220	2264327	1924	Agrícola y pecuario	150
13	CSJR0617	Pozo A.P. El Blanco 2 (CEA)	384682	2278866	1904	Público - urbano	200
14	CSJR0620	Pozo A.P. Viborillas (CEA)	377288	2277890	1898	Público - urbano	185
15	CSJR0701	Pozo A.P. Cimatario IV (CEA)	360725	2267655	1998	Público - urbano	256
16	CSJR0726	Pozo A.P. Saldarriaga 03 (CEA)	365805	2281669	1887	Público - urbano	250
17	CSJR0734	Pozo A.P. Navajas (CEA)	374079	2281909	1900	Público - urbano	130
18	CSJR0737	Pozo A.P. El Colorado (CEA)	370196	2274429	1913	Público - urbano	250
19	CSJR0750	Pozo Rancho Ex Hacienda San Germán	389962	2262925	1901	Agrícola	190
20	CSJR0774	Pozo Alameda del Rincón (CEA)	373618	2242333	2432	Público - urbano	250
21	P0963SJ	Pozo 3-bis Quintanares	365915	2281946	1889	Público - urbano	175
22	PO728SJ	Pozo A.P. Cerro Prieto	381170	2270037	1902	Público - urbano	350

Nota: COTAS. - Comité Técnico de Aguas subterráneas; (*). - pozos no muestreados en 2019; Prof.- profundidad del pozo

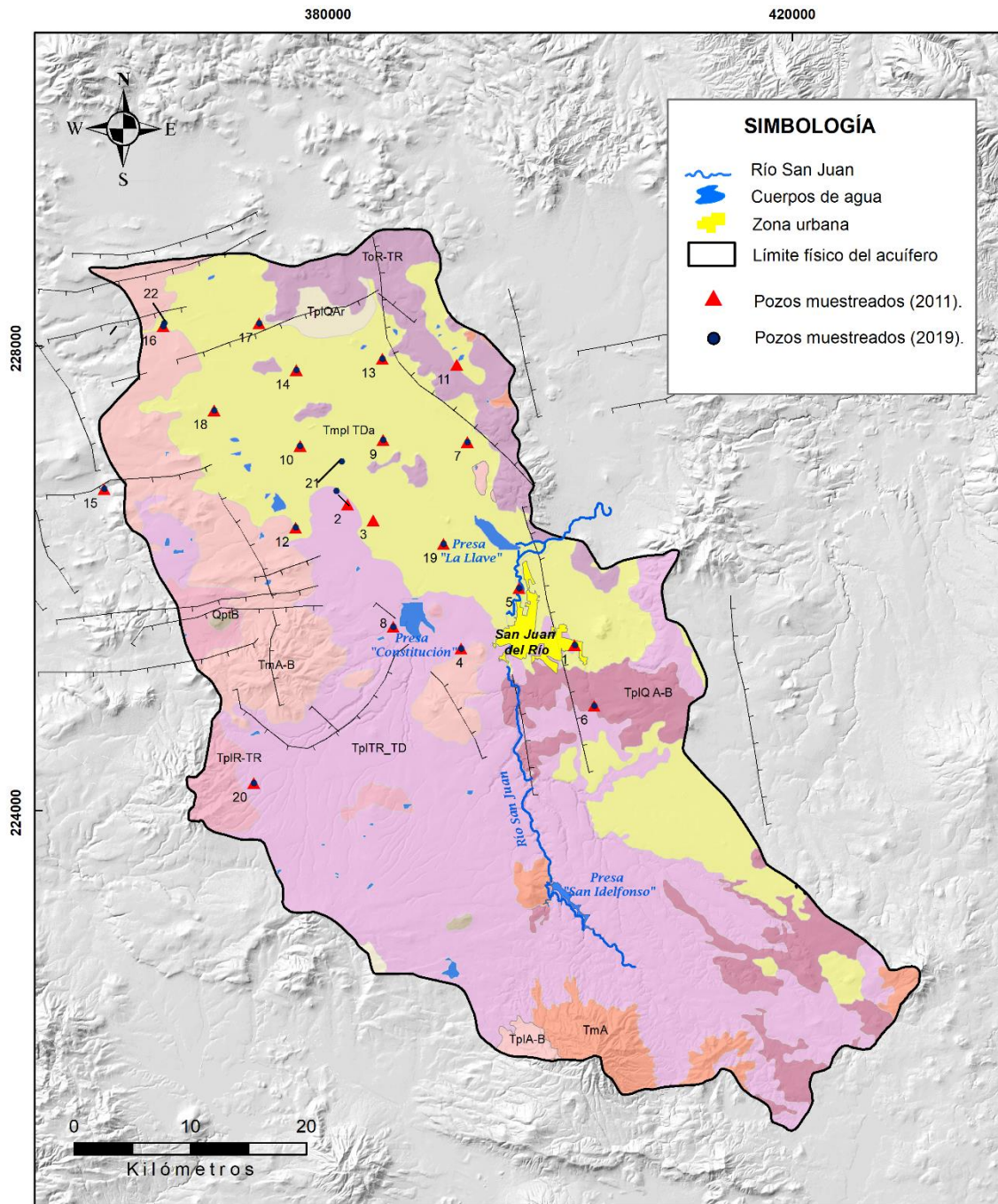


Figura 4.2. Localización de pozos muestreados en 2011 y 2019. Acuífero Valle de San Juan del Río

En este trabajo de investigación se establecieron dos campañas de muestreo, la primera se llevó a cabo del 24 al 27 de junio y la segunda del 02 al 05 de diciembre de 2019, donde se consideraron 20 pozos (Tabla 4.5) a fin de dar seguimiento al monitoreo de la calidad del agua subterránea llevada en años anteriores. Adicionalmente, dos de los pozos tuvieron que ser reemplazados debido a la inactividad de estos cuando se llevó a cabo el muestreo.

Los pozos reemplazados fueron el Pozo CEA El Sauz que fue reemplazado por el Pozo 3-bis Quintanares y el Pozo Granjas El Huesito Grupo Abrego reemplazado por Pozo A.P. Cerro Prieto (Figura 4.2). Cabe mencionar que para la selección de estos 2 pozos se consideraron los criterios antes mencionados.

Los usos del agua en los pozos muestreados corresponden a 75% público-urbano, 20% agrícola y 5% uso industrial, con profundidades que varían entre 100 m y 400 m.

4.4.2. Muestreo y determinación *in situ*

Para cada punto muestreado se contó con las coordenadas geográficas y cota topográfica del suelo, usos del agua, régimen de bombeo (Anexo A1), datos fisicoquímicos de campo y observaciones generales. Además, se diseñaron etiquetas para las muestras de agua, y se preparó el material necesario para llevar a cabo el muestreo *in situ*, así como, el equipo de posicionamiento GPS, equipos multiparamétricos y sondas de nivel.

En la Tabla 4.6 se muestra la relación final de los pozos establecidos para las dos campañas de muestreo en el año 2019.

En la primera campaña de muestreo se determinaron *in situ* los parámetros inestables, tales como pH, temperatura del agua, conductividad eléctrica (CE), potencial redox (Eh), y sólidos disueltos totales (SDT) con la ayuda de un equipo multiparamétrico de lectura directa de marca Thermo Scientific Orion Star A329 Portable. La temperatura ambiente se midió utilizando un termómetro de mercurio. Los equipos de lectura directa se calibraron en campo cada tres puntos muestreados. La alcalinidad total se cuantificó por método volumétrico con un equipo de determinación *in situ* marca La Motte, modelo DR-A, código 3467.

Tabla 4.6. Relación final de los pozos de muestreo del acuífero del Valle de San Juan del Río. Campaña 2019.

Id muestra	Nombre del pozo	X Longitud	Y Latitud	Z Altitud (msnm)	Uso	Prof. (m)
SJR-01	Pozo 33 Granjas Banthi (JAPAM)	401261	2254195	2001	Público - urbano	400
SJR-02	Pozo 03 Pedro Escobedo (CEA)	380732	2267482	1920	Público - urbano	250
SJR-03	Pozo 3-bis Quintanares	381170	2270037	1902	Público - urbano	175
SJR-04	Pozo JAPAM 04 Jazmín	401254	2254190	2010	Público - urbano	240
SJR-05	Pozo A.P. La Rueda	401254	2254190	1916	Público - urbano	110
SJR-06	Pozo A.P. Paso de Mata (Viejo)	373620	2242336	2092	Público - urbano	240
SJR-07	Pozo 01 Rancho El Rocío	392014	2271699	1913	Agrícola	152
SJR-08	Pozo Hotel Fiesta Americana Galindo	385616	2255790	1955	Público - urbano	338
SJR-09	Pozo 04 Ejido Guadalupe Septién	384742	2227700	1906	Agrícola	125
SJR-10	Pozo Poliducto S.A.	377589	2271363	1917	Uso Industrial	200
SJR-11	Pozo Rancho El Profeta	377209	2264330	1924	Agrícola	150
SJR-12	Pozo A.P. El Blanco 2 (CEA)	384685	2278862	1904	Público - urbano	200
SJR-13	Pozo A. P. Viborillas (CEA)	377287	2277901	1898	Público - urbano	185
SJR-14	Pozo A. P. Cimatorio IV (CEA)	360715	2267668	1998	Público - urbano	250
SJR-15	Pozo A.P. Cerro Prieto	365915	2281946	1889	Público - urbano	250
SJR-16	Pozo A. P. Saldarriaga 03 (CEA)	365808	2281669	1887	Público - urbano	350
SJR-17	Pozo A.P. Navajas (CEA)	374081	2281918	1900	Público - urbano	130
SJR-18	Pozo A. P. el Colorado (CEA)	370193	2274423	1913	Público - urbano	250
SJR-19	Pozo Rancho Ex Hacienda San Germán	389956	2262924	1901	Agrícola	190
SJR-20	Pozo Alameda del Rincón (CEA)	373620	2242333	2432	Público - urbano	250

Nota: Prof.- profundidad del pozo

Para los análisis de cationes, las muestras de agua se filtraron *in situ* con una membrana de nitrocelulosa (marca Millipore, apertura 0.45 μm HA), y se preservaron acidificando cada muestra de agua con ácido nítrico (HNO_3) a un $\text{pH} < 2$ en botellas de polietileno de 250 mL. En cuanto a los aniones, se tomó en cada sitio 1000 mL de muestra de agua. Para ambos análisis, las muestras fueron selladas con papel Parafilm y etiquetadas, posterior a ello se conservaron en una hielera para ser transportadas a los laboratorios analíticos correspondientes.

En la segunda campaña de muestreo se siguió el mismo protocolo de trabajo (Figura 4.3), y adicionalmente se analizó *in situ* los iones NO_3^- y Cl^- , mediante un equipo de espectrofotometría portátil UV-VIS de marca “HACH”, utilizando los reactivos

correspondientes a cada parámetro y llevando a cabo su calibración in situ. Para el análisis del NO_3^- se empleó el método de reducción de cadmio (Método 8039) y para el Cl^- el método de valoración de nitrato de plata (Método 8207).



Figura 4.3. Toma de muestras y mediciones de parámetros inestables en campo.
Acuífero Valle de San Juan del Río.

Para el análisis de NO_3^- se tomó 0.2 mL de la muestra con una pipeta de 5 mL, se calibro el equipo (tarar a 0) y se adicionó el reactivo NitriVer 5 a la celda con la muestra. Posteriormente, se introdujo la celda en el equipo HACH para su determinación (tiempo = 5 min). Las mediciones de nitratos se obtuvieron en N-NO_3^- , valor en miligramo por litro (mg/L), por tanto, se realizó la conversión a NO_3^- (mg/L) con la siguiente ecuación (Ec.4.3):

$$\text{NO}_3^- = \text{N} - \text{NO}_3^- \times 4.428 \quad (\text{Ecuación 4.3})$$

Para el análisis del Cl^- se siguió el mismo procedimiento utilizando el reactivo Cloruro 2. Las mediciones se obtuvieron en miligramo por litro (mg/L) de Cl^- .

Cabe mencionar que los muestreos se efectuaron conforme a la NOM-014-SSA1-1993 (Procedimientos sanitarios para el muestreo de agua para uso y consumo humano en sistemas de abastecimiento de agua públicos y privados) y los estándares de APHA-AWWA-WFPC (2005).

4.4.3. Análisis de las muestras de agua en laboratorio

Los análisis de cationes se llevaron a cabo en el laboratorio de Geoquímica de la UNAM, campus Juriquilla, Querétaro, y los de aniones en el Laboratorio de Calidad del Agua del IITCA, UAEMex, estado de México.

a) Cationes

Los análisis de cationes se realizaron con la técnica de plasma acoplado inductivamente con espectrometría de masas (ICP-MS) y se evaluó la presencia de: Al, As, Ba, Ca, Cd, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni, Pb, Si y Sr. Los valores de la concentración de Si en mg/L se convirtieron con base en la estequiometría en concentraciones de SiO_2 en mg/L.

b) Aniones

La determinación de aniones se llevó a cabo por métodos convencionales especificados en las normas técnicas mexicanas; Cl^- (NMX-AA-NMX-AA-073-SCFI-2001), F^- (Electrodo de ión selectivo), NO_3^- (Método por espectrofotómetro UV-VIS de marca HACH) y SO_4^{2-} (NMX-AA-074-SCFI-1981).

4.5. Caracterización hidrogeoquímica

4.5.1. Evaluación de los resultados de análisis químicos

La evaluación de los resultados de los análisis químicos se efectuó mediante el tratamiento de datos en hojas de cálculo de Excel. Para esto, se validaron los resultados fisicoquímicos mediante la estimación del error de balance iónico que es la condición de electroneutralidad (ecuación 4.4), para ello se calcula el total de aniones y el total de cationes expresados en miliequivalentes por litro (meq/L) (Dassi, 2011; Marrero, 2010; Custodio y Llamas, 1996).

$$E = \frac{\sum \text{Cationes (meq/L)} - \sum \text{Aniones (meq/L)}}{\sum \text{Cationes (meq/L)} + \sum \text{Aniones (meq/L)}} * 100 \quad (\text{Ecuación 4.4})$$

El valor del error de balance iónico es expresado en porcentaje, y si el resultado obtenido es menor que $\pm 5\%$ el análisis es aceptable, pero si el valor es exacto a 0% es probable que el Na^+ o el $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ estuvieran determinados por la diferencia. Si el balance fuera mayor a $\pm 5\%$ indica un desequilibrio de cargas lo cual puede ser debido a que hay otros iones que no fueron incluidos al calcular el balance o hay presencia de iones orgánicos en cantidades significativas (Apelo y Postma, 2006; Custodio y Llamas, 1996; Hounslow, 1995).

4.5.2. Representación gráfica de las facies hidroquímicas

En esta etapa, para simplificar los análisis de los datos químicos, se emplearon los diagramas comparativos, siendo estos los de Piper, Schöeller-Berkaloff y Stiff (Figura 4.4). Para dichos diagramas se utilizó el software DIAGRAMMES (Acceso libre, creado por la Universidad de Aviñón, Francia).

i. Diagrama de Piper

A partir de las concentraciones de los iones mayoritarios en porcentaje de meq /L (cationes (Na^+ , K^+ , Mg^{2+} y Ca^{2+}) y aniones (Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-})), se procedió a clasificar el tipo de agua y estudiar la evolución temporal química en diferentes épocas (muestras de junio en comparación con las de diciembre) (Figura 4.4a).

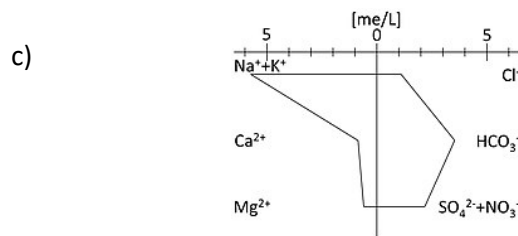
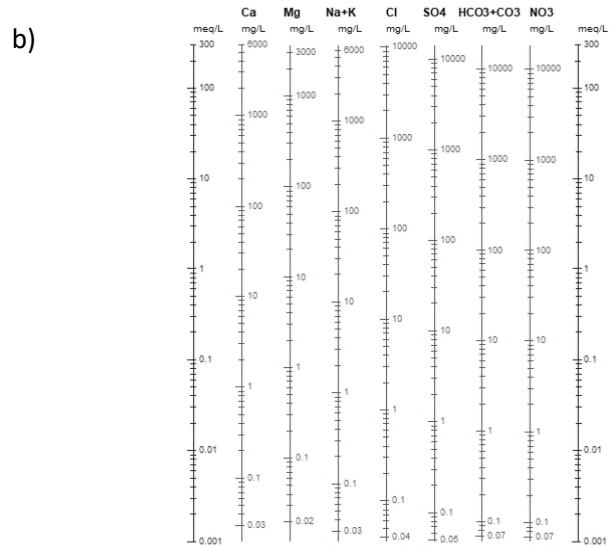
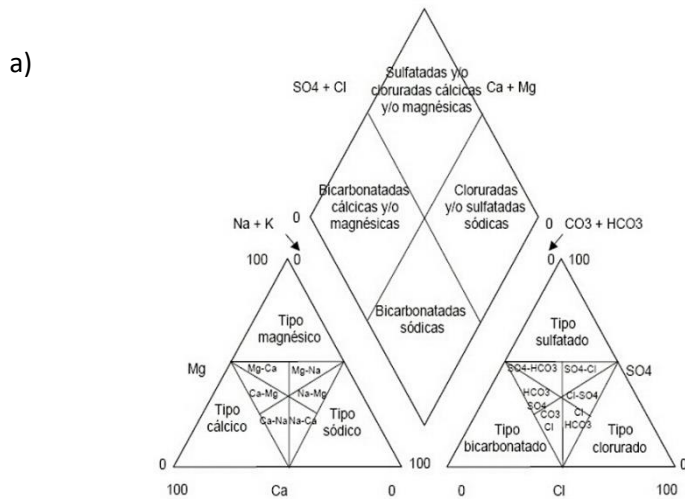


Figura 4.4. Representación gráfica mediante los diagramas a) Piper; b) Schöeller-Berkaloff; c) Stiff.

ii. Diagrama de Schöeller-Berkaloff

La clasificación del tipo de agua y la evolución temporal de agua en un mismo punto se corroboró con el diagrama de Schöeller-Berkaloff (Figura 4.4b). Este diagrama consiste en varias semirrectas verticales paralelas igualmente espaciadas a una escala logarítmica, proporcionales a la concentración de meq/L. Además, permitió representar directamente las relaciones de los iones presentes en el agua subterránea.

iii. Diagrama de Stiff

El diagrama de Stiff ayuda a visualizar por cada sitio de muestreo el ion dominante en meq/L. La forma de la figura resultante representa el tipo de agua (Figura 4.4c). Se graficaron los diagramas de Stiff sobre el mapa de la zona en estudio para comprobar la distribución espacial de los tipos de agua y el grado de mineralización del agua, así como la variabilidad temporal entre las dos campañas de muestreo.

4.5.3. Tratamiento estadístico de los parámetros fisicoquímicos

A partir de los resultados de parámetros inestables, iones mayoritarios y minoritarios (representados en meq/L) se realizó un estudio de estadística con el objetivo de calcular valores de correlación y relaciones iónicas.

La correlación de los parámetros fisicoquímicos se realizó a través de las herramientas del software DIAGRAMMES, el cual permitió calcular el coeficiente de correlación (**r**) por medio del método de Pearson. Este coeficiente es la expresión numérica que indica el grado de relación existente entre 2 variables y en qué medida se relacionan.

4.5.4. Identificación de origen y procesos hidrogeoquímicos

La caracterización hidrogeoquímica llevada a cabo con base en lo descrito en los anteriores apartados permitió estudiar las relaciones entre los distintos parámetros fisicoquímicos, su distribución espacial y la evolución hidroquímica temporal.

El estudio en detalle de algunas de las relaciones entre diversos parámetros fisicoquímicos que se identificaron en los anteriores apartados permitió graficar diagramas de dispersión, con los cuales se puede realizar la interpretación de diversos procesos hidrogeoquímicos.

Así, por ejemplo, la tendencia de las muestras de agua subterránea a ubicarse a lo largo de una línea $y = 2x$ en una gráfica de HCO_3^- versus $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ sugiere que la disolución carbonatos es más predominante en el acuífero y si las muestras se alejan de esta línea, indicaría otros procesos como, por ejemplo, la alteración de silicatos. Otra gráfica de interés es la que representa HCO_3^- versus $\text{Na}^+ + \text{K}^+$, la cual también se usa para el estudio de la disolución de carbonatos y la alteración de silicatos (Biswas *et al.*, 2012).

Los mapas de distribución espacial de algunos de las especies químicas de interés, por el ejemplo As y F, junto con la interpretación de otros datos (geología, fallas geológicas, sistemas de flujo del agua subterránea) pueden ayudar a interpretar el origen de estos elementos.

Asimismo, en el caso de procesos antropogénicos que pueden aportar diversos iones a las aguas subterráneas, se estudia la relación entre el mapa de peligro a la contaminación y los mapas donde se detalla la distribución espacial de algún contaminante de origen antropogénico, como puede ser el nitrato.

4.6. Evaluación de la calidad del agua subterránea

4.6.1. Agua para uso y consumo humano

La calidad del agua para uso público-urbano fue evaluada mediante la comparación de los valores de las variables estudiadas con los valores especificados como límites máximos permisibles definidos en la normatividad aplicable para agua de uso y consumo humano (NOM-127-SSA1-1994; OMS, 2004).

4.6.2. Agua para uso agrícola

Se clasificó el agua con base en su aptitud para riego tomando en cuenta la clasificación de Wilcox y la del Departamento de Agricultura de los EE. UU. (Peinado-Guevara *et al.*, 2011; Custodio y Llamas, 1983). Cabe mencionar que en México se establecen lineamientos de calidad del agua para uso agrícola referidos en el Artículo 224 de la Ley Federal de Derechos (2019), los cuales se tomaron en cuenta como valores óptimos para su uso.

Clasificación de Wilcox

La clasificación de Wilcox (1948) relaciona la conductividad eléctrica (CE) con el porcentaje de sodio. Los valores de CE y % Na⁺ se grafican en un nomograma estandarizado, en el que la clase de agua para riego está definida por intervalos: excelente a buena; buena a admisible; admisible a dudosa; dudosa a no válida y no válida (Peinado-Guevara *et al.*, 2011).

Diagrama de salinidad del Departamento de Agricultura de los EE. UU.

Este diagrama involucra la concentración de SDT y la resistividad a través de la CE, con la relación de adsorción de sodio (RAS), valores en meq/L (Ec 4.5). Si la proporción de sodio (Na⁺) es alta, será mayor el peligro de sodificación; por el contrario, si predominan el calcio (Ca²⁺) y el magnesio (Mg²⁺), el peligro de sodificación es menor (Peinado-Guevara *et al.*, 2011).

$$RAS = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}}} \quad (\text{Ecuación 4.5})$$

RAS: relación de adsorción de sodio

Ca²⁺: concentración en meq/L

Mg²⁺: concentración en meq/L

Na⁺: concentración en meq/L

Los valores de CE y RAS se grafican en un nomograma estandarizado, en el que la clase de agua para riego está definida por los parámetros C (drenaje en suelo), y S (medida del peligro de sodificación), y subíndices en cada una de éstos (bajo, medio, alto y muy alto).

CAPÍTULO 5

Resultados y discusión

5.1. Introducción

Este capítulo tiene como objetivo presentar los resultados obtenidos en este trabajo de investigación, así como su análisis e interpretación. El capítulo se divide en 4 apartados, el primer apartado consistió en definir la piezometría de la zona de estudio que permitió identificar el comportamiento del sistema de flujo del agua subterránea y obtener un conocimiento más claro sobre el funcionamiento del acuífero Valle de San Juan del Río.

El segundo apartado presenta la evaluación de peligro de contaminación de las aguas subterráneas, la cual permitió zonificar áreas con alto, medio y bajo peligro de contaminación por actividades antropogénicas. Esta cartografía se realizó con base en el índice de vulnerabilidad DRASTIC y el índice de la carga potencialmente contaminante estimado mediante el método POSH. Para este último índice se identificaron y clasificaron los principales focos potenciales de contaminación presentes en la superficie del terreno. Este mapa de peligro se utilizó como insumo en la definición de la red de muestreo y, posteriormente, en la caracterización de los procesos contaminantes de origen antropogénico que pueden aportar la presencia de ciertos iones en el agua subterránea.

El tercer apartado se basó en la caracterización hidrogeoquímica del acuífero, donde se analizaron el comportamiento y evolución (espacial y temporal) de los parámetros determinados *in situ*, y de los iones mayoritarios y minoritarios. Se identificaron las facies hidroquímicas y se estudió la distribución espacial de diversas especies químicas. Además, se elaboraron gráficos de dispersión que permitieron identificar procesos hidrogeoquímicos. Todo ello con el fin de conocer el posible origen geogénico/antropogénico de los elementos presentes en el agua, y de los procesos que los afectan, lo cual influye en la calidad del agua.

Finalmente, en el cuarto apartado se presenta la evaluación de la calidad del agua subterránea con base en sus principales usos: consumo humano y uso agrícola.

5.2. Cartografía de la configuración piezométrica

La configuración piezométrica se elaboró con datos piezométricos que corresponden a los registros tomados en diciembre de 2019, los cuales presentan una adecuada cobertura espacial de la zona de estudio y con base en el método propuesto se realizaron las interpolaciones entre puntos para representar la superficie piezométrica.

En el mapa de la figura 5.1 se aprecia como las cotas de niveles piezométricos oscilan entre 1870 msnm, en el sureste, y 1800 msnm al norte de la zona de estudio. Se observa, asimismo, que no existe conexión con el acuífero del Valle de Tequisquiapan (líneas de piezométricas perpendiculares al límite) lo que implica que no existe una entrada lateral oculta de agua subterránea desde estos acuíferos hacia el acuífero San Juan del Río, pero si con el acuífero del Valle de Amazcala (líneas piezométricas paralelas al límite),

En este mismo mapa se aprecia que el flujo del agua subterránea tiene una dirección desde las áreas montañosas del acuífero hacia la porción centro y noroeste del acuífero, donde existe una mayor concentración de pozos de extracción. El estudio de este flujo permitió identificar las principales zonas de recarga (en este caso las zonas montañosas) y las zonas de descarga del agua subterránea del acuífero.

Zona de recarga: la zona de recarga está representada por las áreas montañosas que se encuentran a la periferia del valle, donde afloran materiales fracturados como son las riolitas, tobas riolíticas, andesitas y basaltos, los cuales tiene una permeabilidad media, permitiendo la entrada de agua por infiltración a través de fracturas, incorporándose esta infiltración como entradas laterales ocultas hacia el acuífero poroso.

Zona de tránsito: la zona de tránsito se encuentra principalmente en el valle (sector central del acuífero San Juan del Río), representado por materiales porosos. En esta zona se encuentra la mayor densidad de pozos de explotación y es en donde se dan las diferentes actividades antrópicas que demanda agua.

Zona de descarga: la zona de descarga se ubicada al noroeste del área de estudio. Representa una salida de agua subterránea hacia el acuífero Valle de Querétaro.

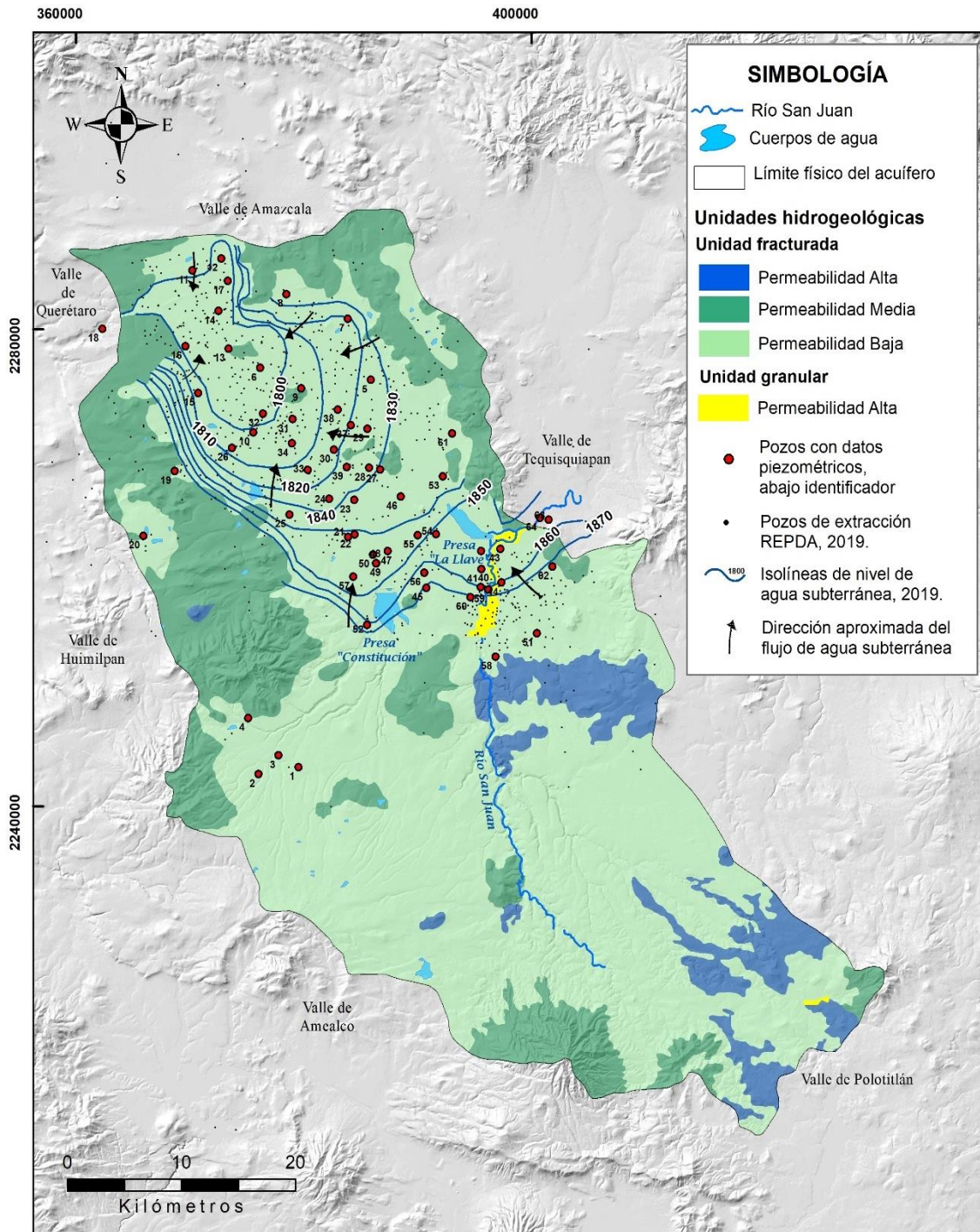


Figura 5.1. Mapa hidrogeológico del acuífero Valle de San Juan del Río. Datos piezométricos del año 2019.

Cabe resaltar que esta información permite establecer la circulación del agua, lo cual está relacionado con el enriquecimiento de elementos químicos a medida que el agua se mueve a través del acuífero. Este enriquecimiento está normalmente acompañado de los cambios regionales en las especies de aniones dominantes, estos cambios conocidos como secuencia de Chebotarev (Freeze & Cherry, 1979).

→ Recorrido a lo largo de un sistema de flujo subterráneo→



→ Aumento de la salinidad →

5.3. Cartografía de peligro de contaminación

Para confeccionar la cartografía de peligro se utilizó el índice de vulnerabilidad DRASTIC elaborado por MAV (2012), y se actualizaron las fuentes potenciales de contaminación para poder establecer una posible evolución temporal del peligro de contaminación.

Esta cartografía permite estimar el impacto que tienen las actividades humanas sobre la calidad de las aguas subterráneas, con base en las características intrínsecas del acuífero (correspondiente al índice de vulnerabilidad), y la clasificación de las fuentes contaminantes, considerando su potencial nocivo.

5.3.1. Evaluación del índice de vulnerabilidad DRASTIC

En el mapa que representa el índice de vulnerabilidad estimado con base en el método DRASTIC y elaborado por MAV (2012), se identificaron las zonas susceptibles a la contaminación, las cuales se clasificaron en tres rangos de vulnerabilidad (Figura 5.2).

Las zonas caracterizadas con una **vulnerabilidad baja** se presentan en gran proporción en el área de estudio, y se localizan en las zonas de lomeríos y montañosas que rodean el valle. Este resultado se debe a la combinación de diferentes factores físicos, que se presentan en estas zonas, como son el tipo de litología, compuesta por rocas de escasa porosidad, los valores bajos de conductividad hidráulica, las pendientes escarpadas (en las zonas montañosas) que impiden la acumulación de fluidos, y los altos valores de profundidad del

agua subterránea, lo que en conjunto da como resultado zonas de bajo potencial de migración de contaminantes.

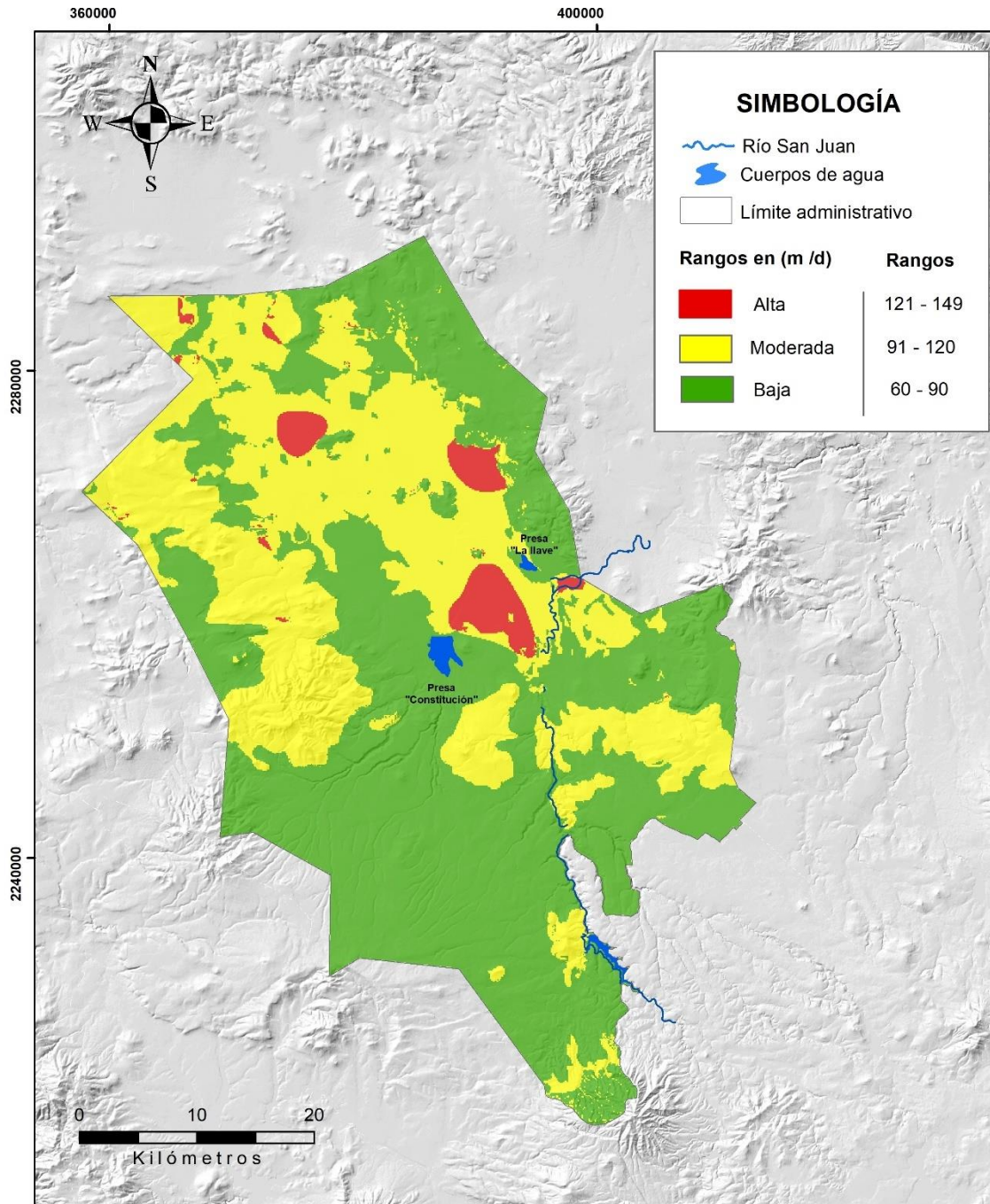


Figura 5.2. Mapa de vulnerabilidad DRASTIC del acuífero Valle de San Juan del Río (Tomado de MAV, 2012)

Las zonas con **vulnerabilidad moderada** se presentan en gran proporción en la zona central del área de estudio, y en algunas zonas de las partes montañosas. En estas zonas, es importante aclarar, que aun cuando se cuenta con valores considerables de recarga, para el caso específico de la zona central, las características de la litología y los valores no muy altos de conductividad hidráulica disminuyen la velocidad del transporte de contaminantes y, por lo tanto, la susceptibilidad a la contaminación.

Las zonas de **vulnerabilidad alta** se localizan en algunas proporciones aisladas en la parte central del área de estudio. Dichos resultados se deben principalmente a la interacción de los altos valores de conductividad hidráulica, las características litológicas, la elevada tasa de recarga y las pendientes bajas del terreno. La combinación de estos factores disminuye, en gran medida, la posibilidad de que los procesos de atenuación natural ocurran, y, por lo tanto, estas zonas son propensas a recibir y transmitir contaminantes.

5.3.2. Actualización del inventario de fuentes potenciales de contaminación

Se actualizó el inventario de focos potenciales de contaminación descrito en el estudio de MAV (2012), con la finalidad de verificar si hubo algún cambio en la proliferación de los focos de contaminación, centrándose en aquellos focos que, de acuerdo con sus características específicas, presentan mayores probabilidades de generar un impacto adverso en la calidad del agua subterránea.

a) Identificación y localización de los focos potenciales de contaminación

Se localizaron establos, gasolineras, cementerios, bancos de materiales, plantas de tratamientos de aguas residuales, sitios de disposición de residuos sólidos y zonas industriales, a través de Google Earth (2019). Posteriormente, se procesó la imagen satelital LANSAT-8 (USGS, 2020), lo cual permitió la identificación de las zonas urbanas y la actividad agrícola.

Cabe resaltar que se identificaron focos de contaminación de tipo puntual y difuso. Dentro de los focos de carácter puntual se encuentran los sitios de disposición de residuos sólidos, gasolineras, cementerios, plantas de tratamiento de agua residual, banco de materiales, establos y zonas industriales. Las fuentes de origen difuso corresponden a la agricultura de

riego y las zonas urbanas. Estos focos están localizados principalmente en la porción centro y norte del acuífero (Figura 5.3).

i) Focos de contaminación de tipo puntual

Sitios de disposición de residuos sólidos: Se localizaron un total de 7 sitios de disposición de residuos sólidos, los cuales, en su mayoría, no están equipados conforme a lo establecido de las normas vigentes para su correcto funcionamiento.

Actividad industrial: Las áreas industriales se ubican principalmente en las zonas aledañas al valle y en la porción noroeste, en municipios como son El Márquez y Colón.

Gasolineras y cementerios: Se localizan 7 gasolineras ubicadas en la ciudad de San Juan del Río fundamentalmente, mientras que un total de 20 cementerios, se encuentran distribuidos en los alrededores del valle.

Establos, plantas de tratamiento de agua residual y bancos de materiales: Existe una importante actividad agropecuaria, en su mayoría en la porción noroeste, localizándose un total de 33 establos. Además, se ubicaron 7 plantas de tratamiento de agua residual residencial, en la porción centro-este del valle; 2 plantas de tratamiento de agua industrial ubicadas en el municipio de San Juan del Río y otra en la zona noroeste. En los alrededores del valle se ubicaron 20 bancos de materiales.

ii) Focos de contaminación de tipo difuso

Agricultura de riego: En el valle hay una importante actividad agrícola lo que implica la aplicación de grandes cantidades de estiércol, pesticidas y fertilizantes, sobre todo en el caso de la agricultura de riego, donde las cantidades excesivas de agua que son aplicadas generan unos grandes volúmenes de lixiviados, los cuales pueden alcanzar la zona saturada y afectar la calidad del agua subterránea. Esta actividad cubre un área aproximada de 205.74 km², y se ubica principalmente en la porción centro y noroeste del valle.

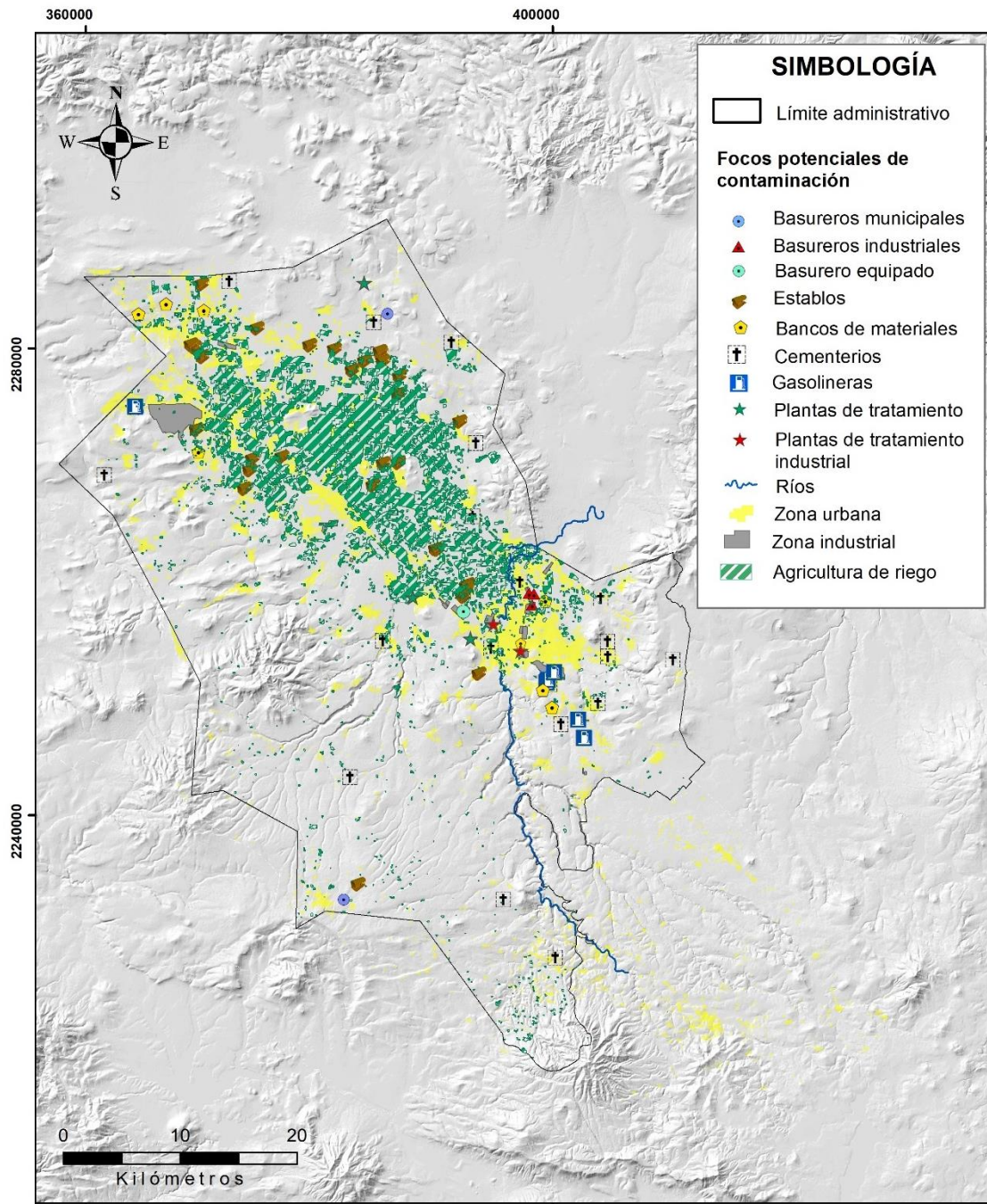


Figura 5.3. Localización de focos potenciales de contaminación existentes en el acuífero Valle de San Juan del Río. Año, 2020.

Zona urbana: Una de las mayores preocupaciones en áreas urbanas es la carga contaminante vinculada a la forma de saneamiento. Los contaminantes generados por este tipo de foco, principalmente, son los nitratos, los cuales son siempre móviles y a menudo estables, y por lo tanto persistentes.

Cabe señalar que en el año 2011 (MAV, 2012) se presenta menor cobertura de agricultura de riego que en el año 2019 (Tabla 5.1) lo que indica que la superficie agrícola ha disminuido. Por otra parte, se observa que la superficie que cubren las zonas urbanas ha incrementado, principalmente, hacia la zona norte del acuífero. Con respecto a los sitios de disposición de residuos sólidos, gasolineras, plantas de tratamiento y cementerios no presentan cambios; sin embargo, existe un aumento de establos en la porción centro y norte del acuífero, y bancos de materiales hacia la porción sureste.

Tabla 5.1. Focos de contaminación inventariados en el año 2011 (MAV, 2012) vs. 2019

Foco de contaminación	Año	
	2011	2019
Agricultura de riego	422.22 km ²	205.74 km ²
Zona urbana	63.01 km ²	185.40 km ²
Zona industrial	Sin dato	16.98 km ²
Basureros	9	9
Gasolineras	7	7
Plantas de tratamiento de aguas residuales	7	7
Cementerios	20	20
Establos	13	33
Banco de materiales	11	20

b) Clasificación de focos potenciales de contaminación mediante el método POSH

Una vez identificados los focos de contaminación, se realizó su clasificación conforme a los criterios y especificaciones establecidas para la carga de contaminación de acuerdo con las características de cada foco mediante el método POSH (Figura 5.4). En la Tabla 5.2 se detalla la clasificación para cada uno de los focos de contaminación de la zona de estudio.

Tabla 5.2. Clasificación de las fuentes potenciales de contaminación del acuífero Valle de San Juan del Río

Fuente de contaminación	Nocividad
Sitios de disposición de residuos municipales	Elevada
Sitios de disposición de residuos industriales	Elevada
Plantas de tratamiento industrial	Elevada
Río San Juan	Elevada
Agricultura de riego	Elevada
Zona industrial	Elevada
Gasolineras	Moderada
Bancos de materiales	Moderada
Sitios de disposición de residuos equipado	Moderada
Cementerios	Moderada
Zona urbana	Moderada
Establos	Reducida
Plantas de tratamiento de agua residual urbana	Reducida

i) Focos clasificados con carga potencial contaminante elevada

En la zona de estudio predominan los focos de contaminación con carga potencial contaminante elevada, localizados principalmente en gran porción en el centro y noroeste del acuífero, los cuales corresponden a los sitios de disposición de residuos sólidos (municipales e industriales), plantas de tratamiento de aguas residuales industriales, zona industrial, agricultura de riego y el río San Juan.

i) Focos clasificados con carga potencial contaminante moderada

Los focos potenciales de contaminación, clasificados dentro del método POSH con carga potencial contaminante moderada, localizados en las periferias del valle de San Juan del Río, los cuales corresponden a las gasolineras, bancos de materiales, sitios de disposición de residuos sólidos equipados, cementerios y zonas urbanas.

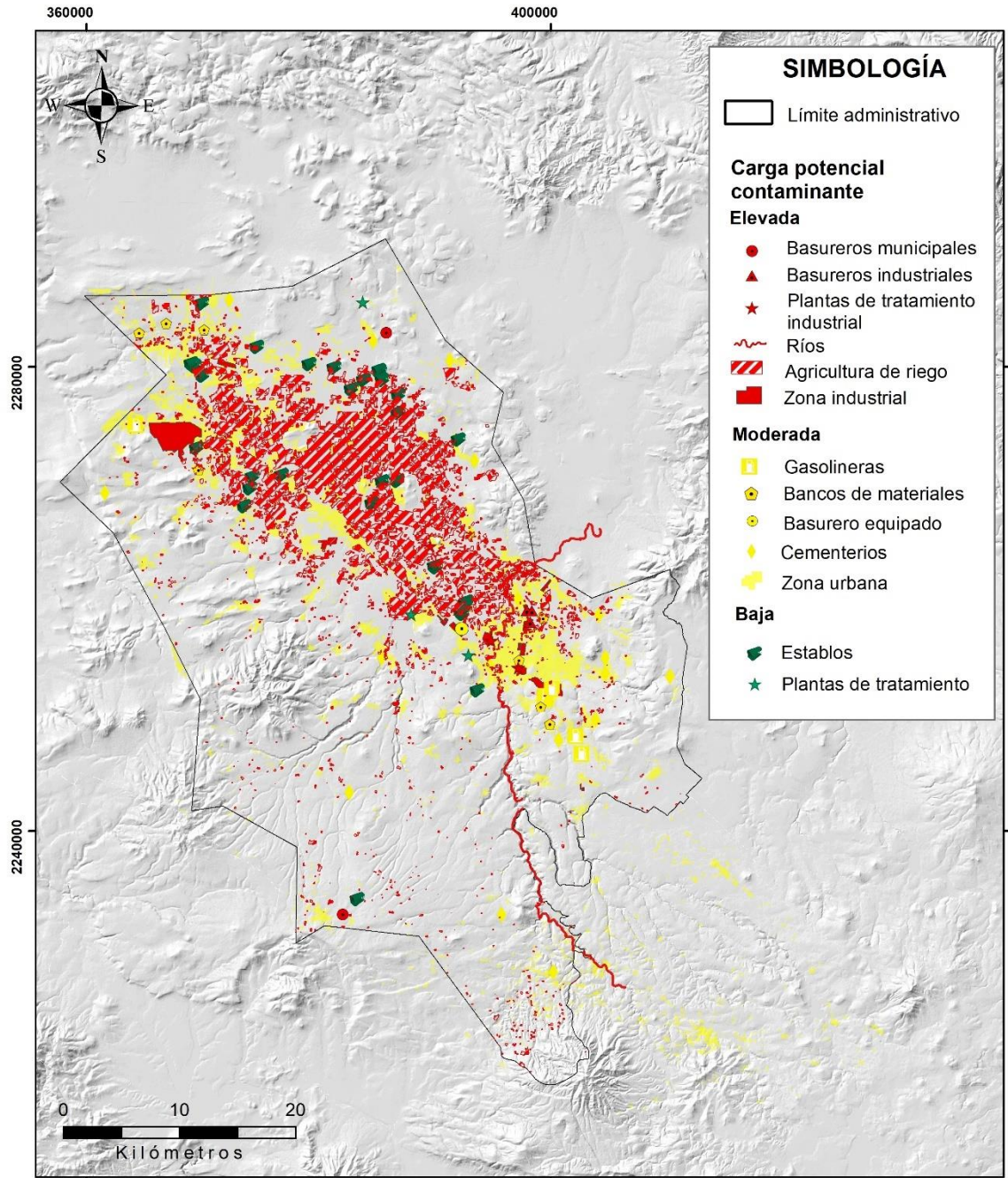


Figura 5.4. Clasificación de los focos potenciales de contaminación en el acuífero Valle de San Juan del Río.
Año 2020

i) Focos clasificados con carga potencial contaminante reducida

Por último, los focos clasificados con carga potencial reducida, por sus características y criterios establecidos en el método POSH, fueron los establos y las plantas de tratamiento de agua residual residencial.

5.3.3. Evaluación de la cartografía de peligro de contaminación

Como resultado de los índices de vulnerabilidad y de la carga potencial contaminante, se obtuvo el mapa de peligro, donde se muestran los valores del índice de peligrosidad, los cuales están entre 1 y 9. Estos valores fueron clasificados en tres rangos; bajo (valores de 1 a 2), moderado (valores entre 3 y 4) y alto peligro (valores de 6 a 9).

En la Figura 5.5, se observa que las zonas con **alto peligro** se localizan en su mayoría en el centro y noroeste del valle. Dichas zonas coinciden con la carga potencial contaminante elevada y la vulnerabilidad alta y moderada. Los focos de contaminación son sitios de disposición de residuos sólidos municipales e industriales, plantas de tratamiento industrial, zonas industriales y zonas agrícola.

Las zonas caracterizadas con un **peligro moderado** se encuentran aledañas al valle y corresponden a zonas con vulnerabilidad moderada. En estas áreas se ubican gasolineras, bancos de materiales, sitio de disposición de residuos sólidos equipados, cementerios y parte de la zona urbana.

Finalmente, las zonas caracterizadas con un potencial de **peligro bajo** cubren la mayor parte del acuífero con un rango de vulnerabilidad de moderado a bajo. Estas zonas corresponden a zonas de lomeríos y montañas donde se presentan algunas fuentes de contaminación como son establos, plantas de tratamiento, cementerios y algunos basureros municipales. En este sentido, debido a las características del medio hidrogeológico y a la nocividad de los focos existentes, representan zonas con menores probabilidades de contaminación de agua subterránea

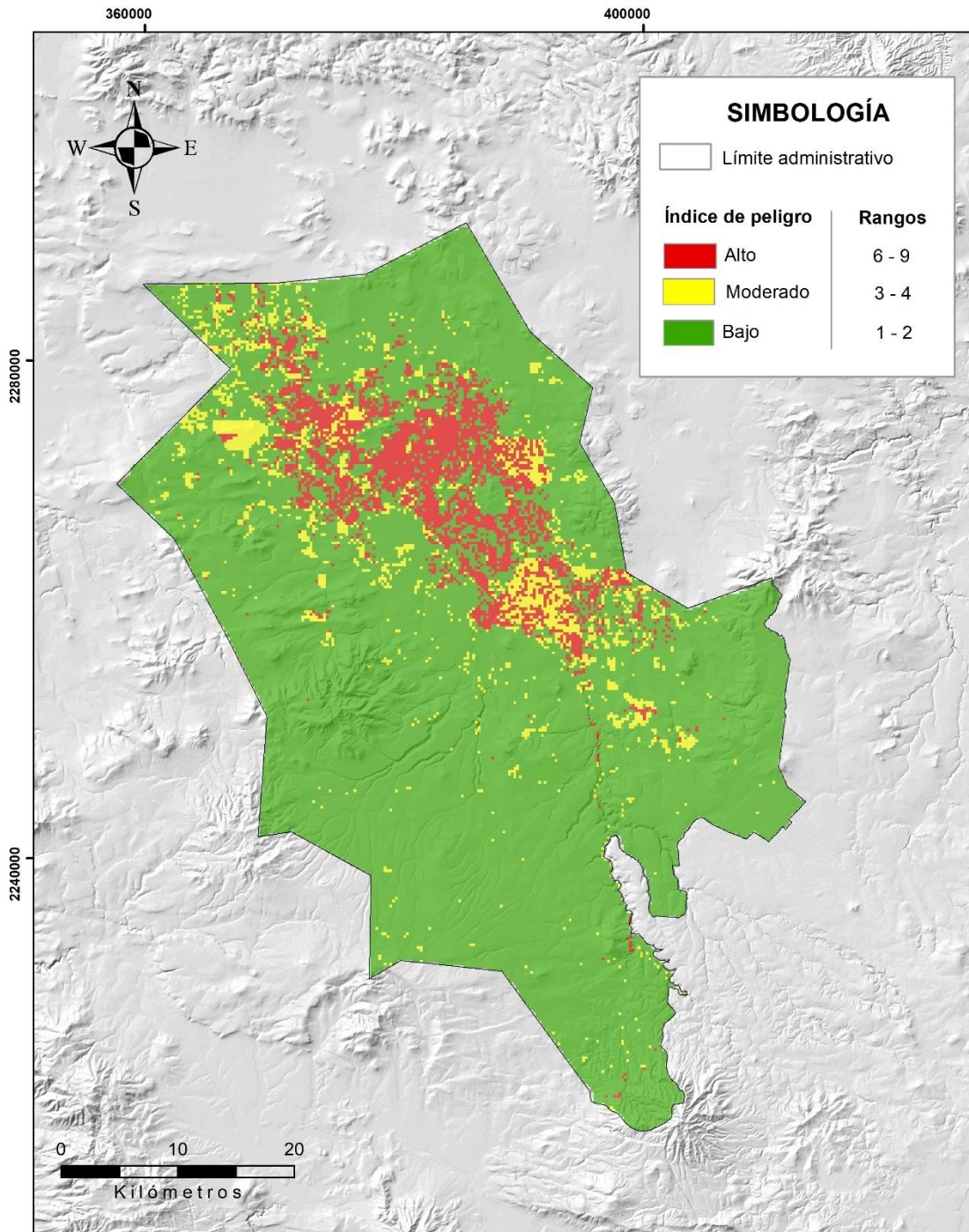


Figura 5.5. Cartografía de peligro de contaminación del agua subterránea en el acuífero Valle de San Juan del Río. Año 2020.

5.4. Caracterización hidrogeoquímica

En este apartado se presenta la caracterización hidrogeoquímica en varios epígrafes, mostrando los resultados obtenidos en las dos temporadas de muestreo (junio y diciembre de 2019).

5.4.1. Balance iónico

Como primer paso para el tratamiento de los datos químicos, se validó la información sobre la concentración de cationes y aniones reportada por los análisis de laboratorio a través de un análisis de electroneutralidad (error del balance iónico). Previo a esto, se llevaron a cabo los cálculos correspondientes para convertir los mg/L en meq/L.

El error del balance iónico para el muestreo llevado a cabo en junio 2019 (antes de temporada de lluvias) fue aceptable (con un promedio de error de balance del 1.5 %) y solo en el caso de las muestras SJR-06, SJR-08 y SJR-13 se obtuvieron valores de error ligeramente superiores al 5%, ya que exista mayor concentración de aniones en estas muestras (Tabla 5.3). Para los datos obtenidos en diciembre 2019 (después de temporada de lluvias), se encontraron errores máximos, superiores al 5%, en las muestras SJR-05, SJR-07, SJR-10 y SJR-13 (Tabla 5.3), mientras que, en el resto de las muestras, los errores fueron inferiores al 5%, con un valor promedio del 1.3% de error.

Los resultados de error del balance iónico para ambas campañas de muestreo se consideraron aceptables y, posteriormente, se continuó con la caracterización hidrogeoquímica del agua.

Tabla 5.3. Valores de error del balance iónico de las muestras de agua recolectadas en diferentes campañas.
(En negrita valores máximos de electroneutralidad)

Id muestra	JUNIO 2019			DICIEMBRE 2019		
	Cationes	Aniones	Error	Cationes	Aniones	Error
	meq/L		%	meq/L		%
SJR-01	2.91	2.94	-0.46	2.75	2.99	-4.33
SJR-02	3.27	3.29	-0.31	3.52	3.34	2.58
SJR-03	2.90	3.03	-2.19	3.09	3.06	0.45
SJR-04	3.18	3.12	0.86	2.83	2.96	-2.27
SJR-05	3.35	3.26	1.38	3.80	4.21	-5.10
SJR-06	5.73	6.36	-5.15	5.50	6.00	-4.30
SJR-07	3.71	3.53	2.40	4.24	3.77	5.88
SJR-08	4.38	4.92	-5.89	3.92	3.69	3.14
SJR-09	4.06	3.91	1.81	3.82	3.78	0.51
SJR-10	4.58	4.55	0.34	4.69	4.19	5.71
SJR-11	3.57	3.77	-2.70	3.55	3.60	-0.68
SJR-12	3.88	3.92	-0.61	4.40	3.96	5.24
SJR-13	3.47	3.89	-5.68	5.51	4.81	6.81
SJR-14	4.03	4.24	-2.55	4.51	4.52	-0.12
SJR-15	5.38	5.36	0.23	6.18	5.51	5.69
SJR-16	4.64	4.56	0.84	5.30	4.83	4.71
SJR-17	3.58	3.71	-1.88	3.47	3.22	3.79
SJR-18	4.17	4.48	-3.62	4.70	4.61	0.93
SJR-19	3.67	3.98	-4.10	3.55	3.76	-2.89
SJR-20	0.86	0.91	-3.27	0.83	0.82	0.83
Promedio			-1.53			1.33

5.4.2. Parámetros *in situ*

Los resultados de las mediciones y determinaciones de las características fisicoquímicas del agua efectuadas *in situ*, así como los valores máximos, mínimos, promedios y desviación estándar se reportan en la Tabla 5.4. La temperatura del agua oscila entre 20 y 40 °C, con un valor promedio de 31.5 °C.

Es importante destacar que la temperatura del agua subterránea presenta valores por encima de la temperatura ambiental media anual, siendo esta de 22 °C. De acuerdo con Fagundo *et al.* (2004) se identifica el agua como termal debido a que la temperatura del agua es superior a 4 °C con respecto a la temperatura media ambiental y la profundidad a la que se encuentra el agua.

El resultado de pH muestra un agua de carácter básico en la mayoría de los puntos muestreados del acuífero, excepto para el pozo SJR-20 que tiene un pH ligeramente ácido con un valor de 6.2 y 6.4 (junio y diciembre, respectivamente) y el pozo SRJ-5 que es el único que presenta un agua neutra con un pH = 7.1. Derivado de que el pH de las muestras SJR-15 y SJR-16 muestran un valor por encima de 8.3, se calculó la concentración del ion carbonato (CO_3^{2-}) con la siguiente fórmula (Ec. 5.1) (Deutsch, 1997):

$$\text{CO}_3^{2-} \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) = 60 * \left[\frac{\text{Alcalinidad} \left(\frac{\text{mg CaCO}_3}{\text{L}} \right)}{50 * \left(\frac{2 + 10^{-\text{pH}}}{10^{-10.3}} \right)} \right] \quad (\text{Ecuación 5.1})$$

Así, se obtuvieron para el mes de junio en el pozo SRJ-15 y SRJ-16, valores del contenido de CO_3^{2-} de 3.24 y 5.47 mg/L, respectivamente; y en diciembre de 2.88 para SJR-15 y 3.09 mg/L en SJR-16. Si se relacionan estos valores con el pH, se aprecia que, al incrementarse el pH, teóricamente, aumenta el contenido de CO_3^{2-} en el agua.

Los valores de conductividad eléctrica (CE) varían en un rango de 77 a 756 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en el mes de junio y entre 79 y 750 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en diciembre. Después de un periodo de lluvias se observa una ligera disminución de CE. Sin embargo, los valores máximos se mantienen en los pozos SJR-15 y SJR-16, ubicados al noroeste del acuífero. Estos valores de CE indican que existe una mayor cantidad de especies químicas que permiten transmitir electricidad.

En cuanto a los sólidos disueltos totales (SDT) se reportan valores máximos en los pozos SJR-15 y SJR-16, ubicados al noroeste del acuífero, con un valor de 741 y 624 ppm antes de temporada de lluvias y después de lluvias de 735 y 619 ppm, respectivamente. Cabe mencionar que los SDT están relacionados con la CE, cuanto mayor sea la cantidad de sales disueltas en el agua, mayor será la conductividad eléctrica.

Con respecto a los valores de potencial redox (Eh) para el mes de junio se presenta un rango entre -38 a 298 mV y en diciembre es de 30 y 206 mV. El valor negativo en SJR-19 antes de temporada de lluvia indica la existencia de un ambiente reductor en el acuífero.

Tabla 5.4. Características fisicoquímicas del agua determinadas in situ, valores mínimos, máximos, promedio y desviación estándar correspondientes a junio y diciembre de 2019.

Id muestra	JUNIO 2019						DICIEMBRE 2019					
	pH	° T Amb	° T Agua	CE μS/cm	SDT mg/L	Eh mV	pH	° T Amb	° T Agua	CE μS/cm	SDT mg/L	Eh mV
SJR-01	8.03	26	35	315	309	291.5	7.77	26	34	328	321	205.5
SJR-02	8.01	19	30	325	319	171.0	7.69	21	29	333	326	124.6
SJR-03	8.01	19	31	302	296	113.0	7.69	23	29	303	297	117.7
SJR-04	7.83	28.5	34	331	324	228.8	7.65	19	31	345	338	137.5
SJR-05	7.1	26.5	29	340	333	298.4	7.19	29	29	378	370	103.3
SJR-06	7.86	23	29	517	507	174.8	7.83	16	26	493	483	202.3
SJR-07	7.44	20	35	417	409	159.1	7.42	16	32	447	438	199.5
SJR-08	7.84	23	36	494	484	204.6	8.00	22	33	465	456	169.3
SJR-09	7.37	21	27	383	375	200.3	7.72	17	30	429	420	162.8
SJR-10	7.86	26	26	468	459	201.0	7.8	22	23	448	439	150.3
SJR-11	7.97	21	34.5	364	357	179.0	7.86	25	32	376	369	153.4
SJR-12	7.62	21	27	409	401	173.1	7.67	18	27	408	399	83.0
SJR-13	8.11	19	27	455	446	140.3	7.68	25	26	519	509	199.5
SJR-14	7.97	19	31.4	515	505	201.3	7.65	22	31	522	512	64.3
SJR-15	8.4	19	39	756	741	198.9	8.39	27	36	750	735	30.5
SJR-16	8.93	22	40	637	624	99.5	8.72	25	38	632	610	36.5
SJR-17	8.2	19	39	420	412	134.9	7.98	26	37	429	420	195.5
SJR-18	7.63	19	33	458	449	139.6	7.57	24	31	495	485	199.6
SJR-19	7.91	23	28	322	316	-37.6	7.3	18	26	334	327	125.8
SJR-20	6.39	17	20	77.4	76	205.5	6.24	15	20	79.1	77	124.5
Mínimo	6.39	17	20	77.4	76	-37.6	6.24	15	20	79.1	77	30.5
Máximo	8.93	28.5	40	756	741	298.4	8.72	29	38	750	735	205.5
Promedio	7.82	21.55	31.55	415.27	378	173.8	7.69	21.80	30	425.66	417	139.2
D.E.	0.51	3.15	5.12	139.23	136	70.7	0.48	4.14	4.55	135.89	133	55.1

Nota: CE. - conductividad eléctrica; Eh. - potencial redox; SDT. - solidos disueltos totales; D.E.- desviación estándar

5.4.3. Iones mayoritarios

Los resultados de las determinaciones de los iones presentes en el agua obtenidos a partir de los análisis en los laboratorios analíticos, y los valores mínimos, máximos, promedios y desviación estándar se presentan en la Tabla 5.5. El anión dominante fue el bicarbonato (HCO_3^-). El valor más alto se registra en el pozo SJR-06 con 343.98 mg/L y 324.19 mg/L (muestreo junio y diciembre, respectivamente), el cual se ubica en la parte sureste del Valle de San Juan del Río.

Tabla 5.5. Resultados de iones mayoritarios presentes en el agua, valores mínimos, máximos, promedios y desviación estándar. Las concentraciones se reportan en mg /L (dureza: mg CaCO₃/L).

Id muestra	JUNIO 2019									DICIEMBRE 2019								
	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	HCO ₃ ⁻	Dureza mg/L	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	HCO ₃ ⁻	Dureza mg/L
SJR-01	17.95	5.01	32.86	6.45	6.97	11.7	8.41	140.02	65.47	15.89	4.76	31.50	7.37	15.88	12.12	5.71	134.90	59.32
SJR-02	21.24	5.70	34.84	8.64	10	11.7	11.95	154.57	76.53	21.96	6.06	37.87	10.56	10.73	12.53	<Lc	167.41	79.87
SJR-03	18.29	4.16	32.76	8.51	6.55	10.9	11.51	144.91	62.84	18.78	4.30	35.22	10.18	6.79	14.55	14.61	137.41	64.65
SJR-04	20.13	8.02	29.71	8.40	7.25	10.9	11.07	150.26	83.34	16.40	6.88	28.17	8.43	8.34	12.12	16.82	131.46	69.30
SJR-05	26.70	8.83	23.40	10.03	10.21	12.1	17.93	146.22	103.09	27.16	10.22	29.41	12.24	15.88	18.19	26.12	178.43	109.98
SJR-06	29.36	15.49	63.49	8.35	7.32	10.9	14.17	343.98	137.15	26.09	14.39	63.71	9.37	7.99	12.12	9.25	324.19	124.46
SJR-07	19.55	1.42	57.02	5.07	20.75	18	10.18	146.00	54.72	19.36	1.42	68.53	6.65	23.23	21.01	15.49	146.94	54.25
SJR-08	23.05	7.59	52.33	12.39	8.87	17.15	32.31	218.09	88.85	19.24	6.31	48.92	12.27	9.72	18.19	28.77	144.95	74.05
SJR-09	28.84	6.73	41.16	10.34	20.56	16.3	17.71	165.53	99.81	26.10	6.20	39.50	10.96	23.28	17.78	17.26	151.65	90.79
SJR-10	35.33	6.72	44.65	12.08	40.1	25.5	11.95	169.57	116.00	30.68	6.15	53.43	12.66	34.84	27.88	<Lc	161.84	102.04
SJR-11	20.96	7.79	37.66	9.20	11.27	26.1	9.30	159.55	84.47	19.69	7.42	38.73	10.48	12.07	13.34	<Lc	179.55	79.76
SJR-12	26.11	5.80	38.67	15.81	14.87	13.4	21.69	174.95	89.12	26.09	5.96	49.52	17.48	15.42	14.55	14.61	181.43	89.77
SJR-13	19.47	6.26	39.96	9.28	27.92	13.8	16.73	158.99	74.44	34.14	10.96	56.80	16.88	64.83	27.48	<Lc	161.99	130.47
SJR-14	20.93	13.21	39.85	5.81	13.73	9.62	12.39	210.31	106.71	22.07	14.43	46.47	7.42	14.56	12.53	14.61	219.42	114.55
SJR-15	9.20	1.16	110.13	1.34	33.74	41.9	30.54	178.38	27.77	10.61	2.38	122.86	4.17	23.91	48.5	10.18	208.81	36.31
SJR-16	9.76	2.19	89.92	2.11	22.96	48.9	13.06	130.40	33.42	11.48	2.98	100.80	3.79	31.13	52.94	25.23	119.54	40.97
SJR-17	28.23	0.56	47.49	2.11	23.93	15.5	7.75	144.11	72.90	9.95	0.75	64.44	4.28	24.99	18.59	5.31	111.18	27.98
SJR-18	28.86	7.06	44.27	8.20	21.85	14.6	37.63	174.93	101.22	28.19	9.46	50.23	12.71	22.86	18.99	36.74	175.41	109.42
SJR-19	28.84	5.02	37.07	7.66	6.37	11.3	10.62	203.30	92.74	22.90	6.25	36.92	10.95	6.71	14.95	12.84	181.50	83.00
SJR-20	4.55	1.95	6.73	6.60	6.45	3.15	5.53	36.59	19.40	2.98	1.10	8.46	8.03	6.01	4.14	15.05	29.27	12.00
Mínimo	4.55	0.56	6.73	1.34	6.37	3.15	5.53	36.59	19.40	2.98	0.75	8.46	3.79	6.01	4.14	5.31	29.27	12.00
Máximo	35.33	15.49	110.113	15.81	40.10	48.94	37.63	343.98	137.15	34.14	14.43	122.86	17.48	64.83	52.94	36.74	324.19	130.47
Promedio	21.86	6.03	45.19	7.91	16.08	17.18	15.62	171.70	79.50	20.49	6.42	50.57	9.84	18.96	19.63	13.43	162.36	77.65
D.E.	7.67	3.78	22.47	3.56	9.95	11.00	8.67	59.52	29.74	7.75	3.94	25.58	3.75	13.70	11.94	10.24	55.36	32.70
Lc.	0.112	0.006	0.099	0.399	0.004	----	0.006	----	----	0.112	0.006	0.099	0.399	0.004	----	0.006	----	----

Nota: Lc. - límite de cuantificación; D.E.- desviación estándar

En cuanto al cloruro (Cl^-), se reporta un valor máximo de 48.94 mg/L en el pozo SJR-16 para el muestreo de junio, y en diciembre el valor máximo fue de 52.94 mg/L en el pozo SJR-17, ubicados en la zona noroeste del acuífero. En el caso de los sulfatos (SO_4^{2-}), estos se detectan con bajas concentraciones (valor máximo de 40 y 64 mg/l para las campañas de junio y diciembre, respectivamente).

La concentración de nitratos (NO_3^-) presentó valores máximos en el pozo SJR-18, con 37.63 mg/L y 36.74 mg/L, correspondientes al muestreo de junio y diciembre, respectivamente. El orden de abundancia para los aniones con base en sus concentraciones promedio es $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^-$.

El catión con mayor concentración fue el sodio (Na^+) con valores promedio de 45.19 y 50.57 mg/L (junio y diciembre, respectivamente). Los valores máximos fueron de 110.13 y 122.86 mg/L en el pozo SJR-16 (valores correspondientes a junio y diciembre, respectivamente), ubicado en la parte noroeste del acuífero. En cuanto al Ca^{2+} , este se presenta con mayor concentración en el pozo SJR-10 en el muestreo de junio (35.33 mg/L), mientras que en diciembre la concentración máxima se detectó en el pozo SJR-13. La concentración de Mg^{2+} , más elevada, con valores de 15 mg/L se determinó en el pozo SJR-06 en la campaña de junio y de 14 mg/L en diciembre en el pozo SJR-14. Las concentraciones de K^+ no superaron los 15 y 17 mg/L en las campañas de junio y diciembre, respectivamente. Con base en los valores promedio se tiene $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+}$, para ambas campañas.

La dureza del agua en los pozos muestreados se obtuvo a partir de la concentración total de calcio (Ca^{2+}) y magnesio (Mg^{2+}) en mg/L entre el peso molecular (P.M) de cada ion, mediante la siguiente fórmula (Ec. 5.2):

$$\text{Dureza } (\text{CaCO}_3) = \left(\left(\text{Ca}^{2+} \frac{\text{mg/L}}{\text{P.M}} \right) + \left(\text{Mg}^{2+} \frac{\text{mg/L}}{\text{P.M}} \right) \right) \times 100 \quad (\text{Ecuación 5.2})$$

De acuerdo con los valores obtenidos de dureza total, la dureza del agua subterránea del acuífero en estudio es blanda a moderadamente dura con respecto a la clasificación de la dureza del agua según la OMS (2004) (Tabla 5.6).

Tabla 5.6. Clasificación de dureza del agua según OMS (2004).

Concentración de CaCO ₃ en mg/L	Tipo
0 - 60	Blanda
61 - 120	Moderadamente dura
121 - 180	Dura
> 180	Muy dura

5.4.4. Iones minoritarios y traza: As, F⁻, SiO₂ y Sr

Entre los elementos minoritarios y traza presentes en el agua del acuífero Valle de San Juan del Río, cabe destacar por sus altas concentraciones, así como su papel en la hidroquímica de este acuífero, los iones As, F⁻, SiO₂ y Sr (Tabla 5.7). Los resultados de los análisis del resto de elementos minoritarios y traza se presentan en los anexos A2 y A3, en donde se comprueba que el resto de estos iones se detectan en concentraciones por debajo del límite cuantificación del método y equipo utilizado para su análisis o bien en concentraciones muy próximas a este límite.

Los altos contenidos de F⁻ y As en el agua subterránea se detectan en el agua de los pozos SJR-7, SJR-15, SJR-16 y SJR-17, con valores de As que superan los 0.010 mg/L, e incluso el valor de 0.025 mg/L, y con valores de F⁻ que varían entre 5.2 y 0.07 mg/L. El origen del fluoruro y de arsénico podría ser geogénico, ya que suele depender de las características mineralógicas de las rocas o sedimentos presentes en el área y de las características del agua con la cual están en contacto estos materiales (Morales *et al.*, 2015).

La concentración de sílice (SiO₂) presenta un valor promedio de 73.84 y 76.65 mg/L, valores correspondientes a junio y diciembre. En cuanto al estroncio (Sr²⁺) tiene una concentración promedio de 0.13 mg/L, en las dos temporadas de muestreo. Estos iones serían reflejo del ambiente volcánico en el cual se encuentran las aguas subterráneas del acuífero (Marrero, 2020)

Tabla 5.7. Resultados de iones minoritarios y traza presentes en el agua, valores mínimos, máximos, promedios y desviación estándar. Las concentraciones se reportan en mg/L.

Id muestra	JUNIO 2019				DICIEMBRE 2019			
	As	F ⁻	SiO ₂	Sr ²⁺	As	F ⁻	SiO ₂	Sr ²⁺
SJR-01	<l.c.	0.33	80.46	0.11	<l.c.	0.24	81.55	0.09
SJR-02	<l.c.	0.34	86.12	0.16	<l.c.	0.27	82.21	0.14
SJR-03	<l.c.	0.32	89.21	0.10	<l.c.	0.26	82.28	0.09
SJR-04	<l.c.	0.32	86.24	0.11	<l.c.	0.26	88.89	0.09
SJR-05	<l.c.	0.24	97.99	0.23	<l.c.	0.20	95.23	0.26
SJR-06	0.02	0.60	65.96	0.36	<l.c.	0.53	57.87	0.28
SJR-07	0.04	2.80	59.46	0.01	0.04	2.25	51.94	0.01
SJR-08	<l.c.	0.45	91.37	0.14	<l.c.	0.40	84.06	0.11
SJR-09	<l.c.	0.29	85.77	0.18	<l.c.	0.24	78.97	0.15
SJR-10	<l.c.	0.31	89.57	0.27	<l.c.	0.31	81.40	0.21
SJR-11	<l.c.	0.26	90.43	0.12	<l.c.	0.24	78.78	0.09
SJR-12	<l.c.	0.52	97.65	0.17	<l.c.	0.46	93.64	0.15
SJR-13	<l.c.	0.42	48.84	0.12	<l.c.	0.41	69.34	0.19
SJR-14	<l.c.	0.41	62.79	0.26	<l.c.	0.38	77.55	0.29
SJR-15	0.10	5.00	45.16	0.05	0.09	5.10	65.11	0.04
SJR-16	0.07	5.20	50.76	0.04	0.12	4.90	54.50	0.06
SJR-17	0.03	2.50	40.90	0.03	0.03	2.45	47.78	0.03
SJR-18	<l.c.	0.32	68.47	0.14	<l.c.	0.27	82.01	0.16
SJR-19	<l.c.	0.32	68.63	0.15	<l.c.	0.29	83.87	0.17
SJR-20	<l.c.	0.10	70.99	0.02	<l.c.	0.07	96.04	0.03
Mínimo	0.02	0.10	40.9	0.01	0.03	0.07	47.78	0.01
Máximo	0.10	5.20	97.99	0.36	0.12	5.10	96.04	0.30
Promedio	0.05	1.05	73.84	0.13	0.07	0.98	76.65	0.13
D.E.	0.03	1.56	18.10	0.09	0.04	1.52	14.31	0.08
l.c.	0.01	0.01	0.01	0.0002	0.02	0.01	0.01	0.0001

Nota: l.c. – límite de cuantificación; D.E. - desviación estándar

5.4.5. Facies hidroquímicas

Las concentraciones de los cationes y aniones en los distintos puntos de muestreo fueron utilizadas para interpretar la composición química del agua, y las variaciones de entre las distintas temporadas, para ello se utilizó el software DIAGRAMMES, con el cual se trazaron los diagramas de Piper, Schöeller-Bercaloff y Stiff, cuya discusión se presenta a continuación.

a) Diagrama de Piper

En los diagramas de Piper (Figura 5.6) se aprecia que el anión dominante en el agua subterránea es el bicarbonato (HCO_3^-), mientras que el catión dominante es sodio (Na^+). Por tanto, la facie hidroquímica que predomina en el acuífero es bicarbonatada sódica ($\text{Na}^+ - \text{HCO}_3^-$). Con más detalle, se determinaron cuatro facies hidroquímicas (Tabla 5.8):

- i) Bicarbonatada sódica (HCO_3-Na), representa el 65 % de las muestras en la campaña de junio y el 75% de las muestras en la campaña de diciembre.
- ii) Mixta ($\text{HCO}_3-\text{Na}-\text{Ca}$) con el 20 % en las muestras de junio y el 10 % de diciembre.
- iii) Bicarbonatada cálcica (HCO_3-Ca) corresponde al 15 % de las muestras en junio y 10 % en diciembre.
- iv) Bicarbonatada clorurada sódica ($\text{HCO}_3-\text{Cl}-\text{Na}$), solo representa el 5 % de las muestras de diciembre, y corresponde al pozo SJR-16.

Tabla 5.8. Facie hidroquímica identificada en cada una de las muestras tomadas en junio y diciembre, 2019.

Id muestra	Nombre del pozo	Facies hidroquímica	
		Junio	Diciembre
SJR-01	Pozo 33 Granjas Banthi (JAPAM)	$\text{HCO}_3 - \text{Na}$	$\text{HCO}_3 - \text{Na}$
SJR-02	Pozo 03 Pedro Escobedo (CEA)	$\text{HCO}_3 - \text{Na}$	$\text{HCO}_3 - \text{Na}$
SJR-03	Pozo 3-bis Quintanares	$\text{HCO}_3 - \text{Na}$	$\text{HCO}_3 - \text{Na}$
SJR-04	Pozo JAPAM 04 Jazmín	$\text{HCO}_3 - \text{Ca}$	$\text{HCO}_3-\text{Na}-\text{Ca}$
SJR-05	Pozo A.P. La Rueda	$\text{HCO}_3 - \text{Ca}$	$\text{HCO}_3 - \text{Ca}$
SJR-06	Pozo A.P. Paso de Mata (Viejo)	$\text{HCO}_3 - \text{Na}$	$\text{HCO}_3 - \text{Na}$
SJR-07	Pozo 01 Rancho El Rocío	$\text{HCO}_3 - \text{Na}$	$\text{HCO}_3 - \text{Na}$
SJR-08	Pozo Hotel Fiesta Americana, Galindo	$\text{HCO}_3 - \text{Na}$	$\text{HCO}_3 - \text{Na}$
SJR-09	Pozo 04 Ejido Guadalupe Septién	$\text{HCO}_3-\text{Na}-\text{Ca}$	$\text{HCO}_3 - \text{Na}$
SJR-10	Pozo Poliducto S.A.	$\text{HCO}_3-\text{Na}-\text{Ca}$	$\text{HCO}_3 - \text{Na}$
SJR-11	Pozo Rancho El Profeta	$\text{HCO}_3 - \text{Na}$	$\text{HCO}_3 - \text{Na}$
SJR-12	Pozo A.P. El Blanco 2 (CEA)	$\text{HCO}_3 - \text{Na}$	$\text{HCO}_3 - \text{Na}$
SJR-13	Pozo A. P. Viborillas (CEA)	$\text{HCO}_3 - \text{Na}$	$\text{HCO}_3-\text{Na}-\text{Ca}$
SJR-14	Pozo A. P. Cimatorio IV (CEA)	$\text{HCO}_3 - \text{Ca}$	$\text{HCO}_3 - \text{Ca}$
SJR-15	Pozo A.P. Cerro Prieto	$\text{HCO}_3 - \text{Na}$	$\text{HCO}_3 - \text{Na}$
SJR-16	Pozo A. P. Saldarriaga 03 (CEA)	$\text{HCO}_3 - \text{Na}$	$\text{HCO}_3-\text{Cl}-\text{Na}$
SJR-17	Pozo A.P. Navajas (CEA)	$\text{HCO}_3 - \text{Na}$	$\text{HCO}_3 - \text{Na}$
SJR-18	Pozo A. P. el Colorado (CEA)	$\text{HCO}_3-\text{Na}-\text{Ca}$	$\text{HCO}_3 - \text{Na}$
SJR-19	Pozo Rancho Ex Hacienda San Germán	$\text{HCO}_3-\text{Na}-\text{Ca}$	$\text{HCO}_3 - \text{Na}$
SJR-20	Pozo Alameda del Rincón (CEA)	$\text{HCO}_3 - \text{Na}$	$\text{HCO}_3 - \text{Na}$

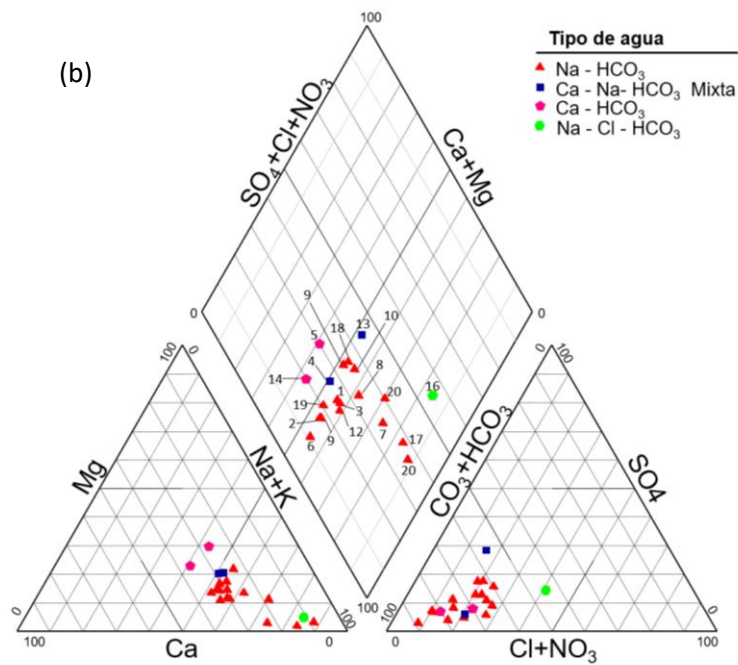
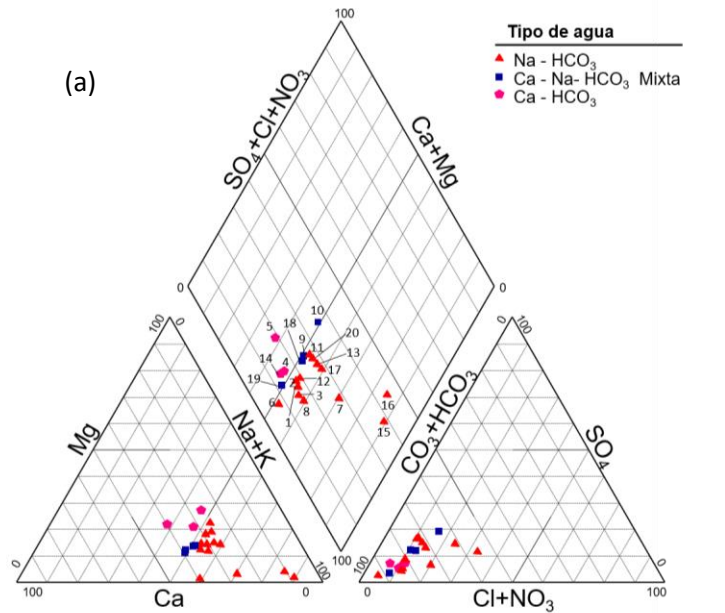


Figura 5.6. Diagramas de Piper de las muestras recolectadas en el acuífero Valle de San Juan del Río. (a) Antes de temporada de lluvias, junio, 2019 (b) Después de temporada de lluvias, diciembre, 2019.

b) Diagrama de Schöeller-Bekaloff

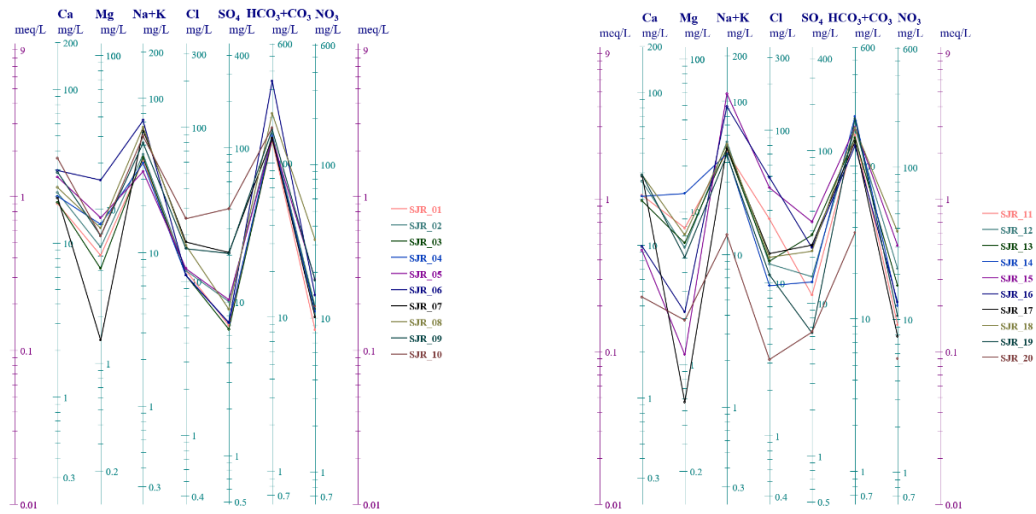
Los diagramas de Schöeller-Berkaloff (Figura 5.7) confirman la clasificación de agua efectuada con el diagrama de Piper, y representan las variaciones de los cationes y aniones con mayor claridad para cada muestra. En líneas generales, se aprecia que el comportamiento de los distintos iones (que se refleja en el trazado de las líneas) es muy similar entre muestras y entre campañas de muestreo. Si difieren las líneas que representan la composición química de las muestras de los pozos SJR-20, SJR-15 y SJR-16.

c) Diagrama de Stiff

Los diagramas de Stiff se presentan sobrepuestos en el mapa hidrogeológico (Figuras 5.8 y 5.9), el cual permite observar la distribución espacial de las características hidroquímicas principales del acuífero, específicamente en términos de cationes (Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}), y aniones (Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-}).

En las Figuras 5.8 y 5.9 se distinguen tres zonas; la primera corresponde a la zona de recarga donde se ubica el pozo 20 que representa el agua de reciente infiltración, con una mineralización del agua baja (SDT: 76 ppm Tabla 5.4). Una segunda zona que está representada por la mayoría de los pozos muestreados ubicados principalmente en el sector central del acuífero (valle), y con un agua bicarbonatada sódica ($\text{HCO}_3\text{-Na}$), mixta ($\text{HCO}_3\text{-Na-Ca}$) y bicarbonatada cálcica ($\text{HCO}_3\text{-Ca}$), y por último, se localiza la zona de noroeste, por donde se produce la salida del flujo de agua subterránea hacia el acuífero Valle de Querétaro y donde se localizan los pozos SJR15 y SJR16, que presentan la mayor concentración de los iones, resultado de la interacción agua-roca.

(a)



(b)

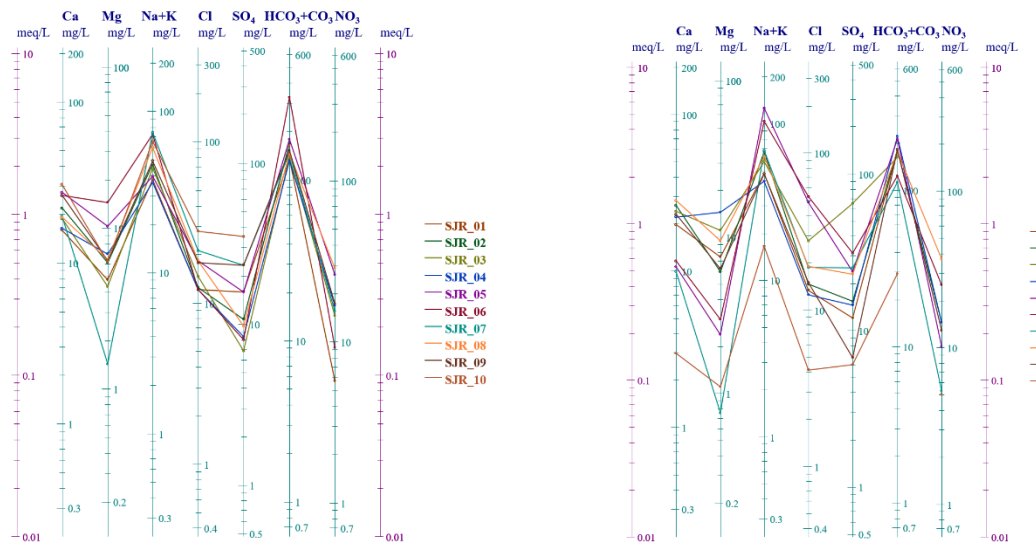


Figura 5.7. Diagramas de Schöeller-Berkaloff de las muestras recolectadas en el acuífero Valle de San Juan del Río. (a) Antes de temporada de lluvias, junio, 2019 (b) Después de temporada de lluvias, diciembre, 2019

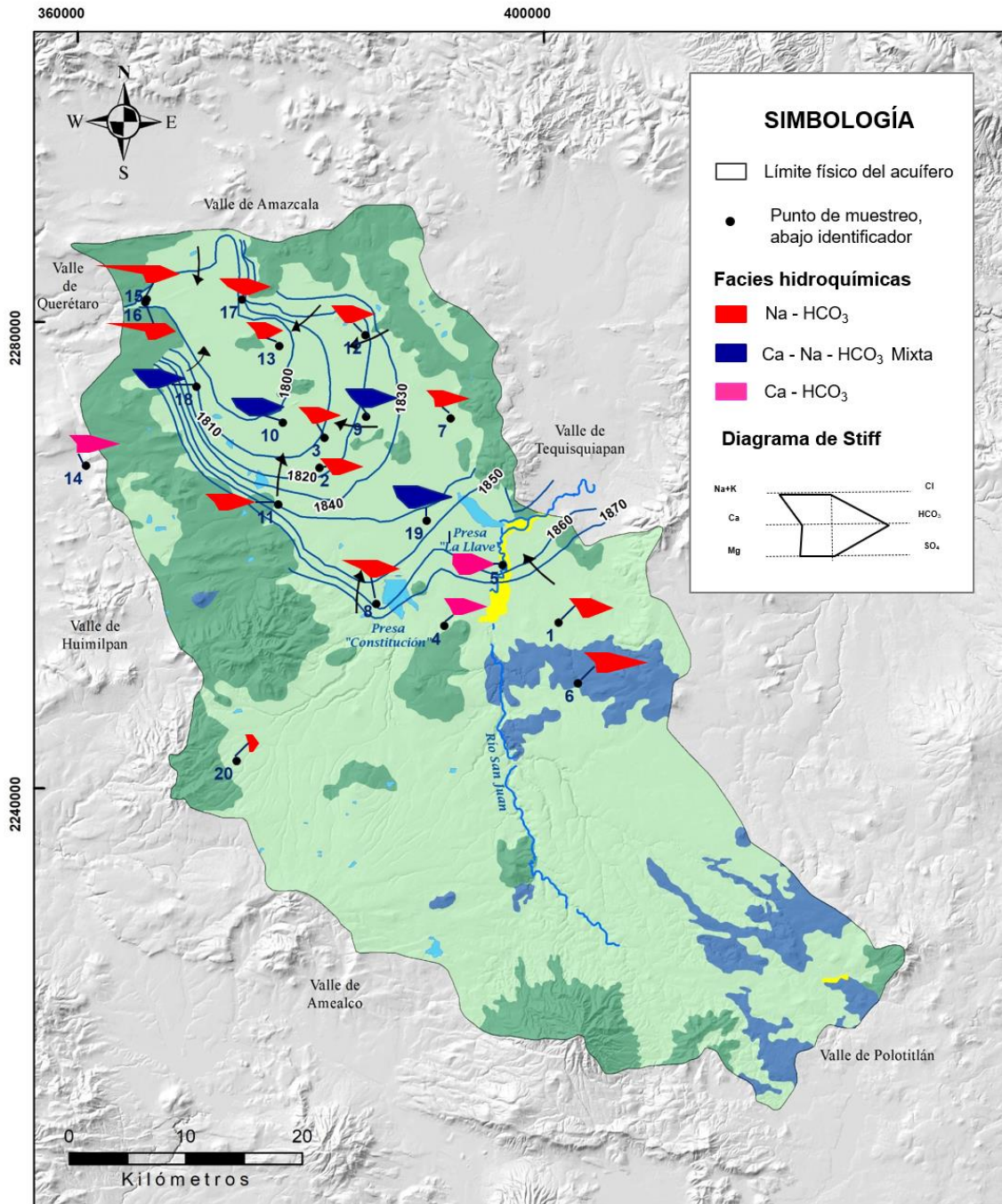


Figura 5.8. Distribución espacial de los diagramas de Stiff. Muestreo de junio 2019.

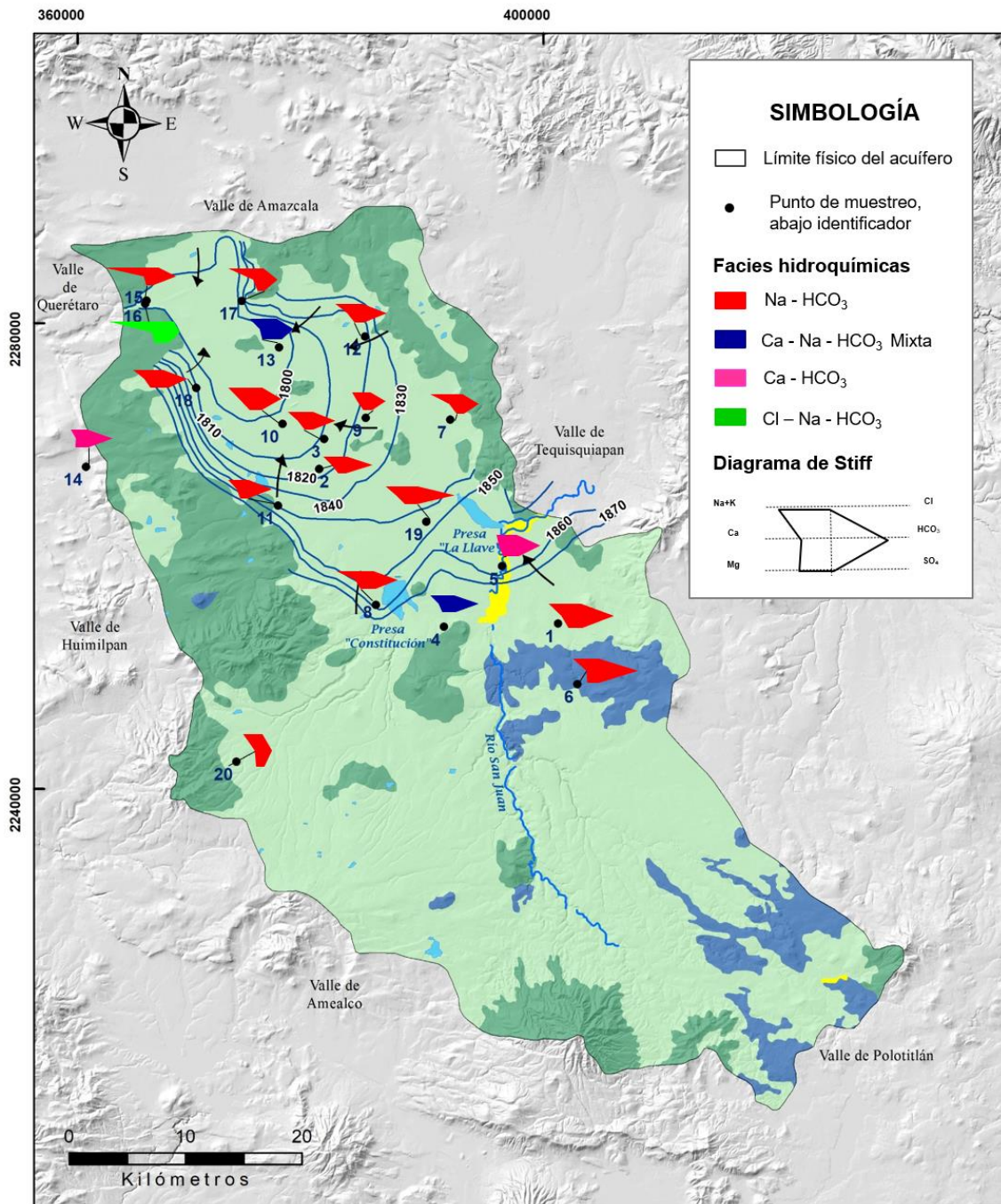


Figura 5.9. Distribución espacial de los diagramas de Stiff. Muestreo de diciembre, 2019

5.4.6. Correlación de parámetros fisicoquímicos

Para conocer cómo se relacionan los parámetros inestables (mediciones de campo), e iones mayoritarios y minoritarios del agua subterránea del acuífero en estudio, se generó la matriz de correlación a través del coeficiente de correlación de Pearson (**r**). El análisis de las correlaciones se hizo a partir de las concentraciones iónicas, expresadas en unidades de meq/L.

Para analizar la matriz de correlación para cada periodo de muestreo (junio y diciembre), se consideraron los criterios establecidos en la guía de Koh *et al.* (2009) aplicados para el caso de estudios hidroquímicos. La correlación elevada corresponde a valores de $r > \pm 0.75$, una correlación moderada, $r = \pm 0.50$ a ± 0.75 , y, por último, una correlación débil para $r < \pm 0.50$. Con base en estos criterios, se reportan algunas de las correlaciones identificadas en las Tablas 5.9 y 5.10.

El muestreo correspondiente al mes de junio presenta una correlación elevada entre los parámetros: CE con Na^+ y Cl^- ; Mg^{2+} con Sr^{2+} , y una correlación moderada entre los siguientes parámetros: CE con Mg^{+2} , HCO_3^- , SO_4^{-2} , NO_3^- ; Ca^{+2} con K^+ , Sr^{+2} , HCO_3^- ; Mg^{+2} con HCO_3^- ; Na^+ con HCO_3^- , Sr^{+2} con HCO_3^- ; Cl^- con SO_4^{-2} . De estas correlaciones cabe destacar la de la CE con el anión (HCO_3^-) y el catión mayoritario (Na^+), lo que indica como el grado de mineralización depende fuertemente de la presencia de estos dos iones, así como la del HCO_3^- con Ca^{2+} , Mg^{2+} y Na^+ , que reflejaría las facies hidroquímicas identificados en el diagrama de Piper. Otra correlación interesante es la de la temperatura con la CE y el Na^+ , lo que indicaría que a mayor temperatura el agua subterránea tiene una mayor cantidad de iones disueltos, y entre ellos cabría destacar al Na^+ . El resto de los parámetros corresponden a una correlación débil, lo que identifica que sus variaciones no tienen una causa similar.

Bajo los mismos criterios, en el muestreo llevado a cabo en diciembre, existen correlaciones muy similares a las de la anterior campaña de muestreo (Tabla 5.10).

A continuación, se estudian con mayor detalle estas relaciones.

Tabla 5.9. Matriz de coeficientes de correlación de parámetros fisicoquímicos. Junio 2019 (en rojo de $r > \pm 0.75$, en negrita $r = \pm 0.50$ a ± 0.75).

Parámetros	° T.	pH	CE	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Sr ²⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	SiO ₂	Eh
° T.	1													
pH	0.71	1												
CE	0.61	0.70	1											
Ca	0.10	0.18	0.48	1										
Mg ²⁺	0.04	0.14	0.52	0.46	1									
Na ⁺	0.66	0.73	0.88	-0.24	-0.19	1								
K ⁺	-0.49	-0.31	-0.11	0.52	0.44	-0.31	1							
Sr ²⁺	-0.41	-0.09	0.10	0.65	0.88	-0.07	0.49	1						
HCO ₃ ⁻	0.22	0.37	0.64	0.54	0.71	0.51	0.19	0.60	1					
Cl ⁻	0.6	0.65	0.75	0.15	-0.35	0.80	-0.24	-0.28	0.16	1				
SO ₄ ²⁻	0.17	0.32	0.60	-0.28	-0.31	0.48	-0.04	-0.09	0.08	0.60	1			
NO ₃ ⁻	0.22	0.08	0.52	0.13	0.10	0.31	0.40	0.10	0.40	0.24	0.27	1		
SiO ₂	-0.39	-0.41	-0.47	0.33	0.34	0.52	0.74	0.40	-0.13	-0.35	-0.43	0.02	1	
Eh	-0.02	-0.33	-0.08	-0.10	0.24	-0.27	0.23	0.18	-0.10	-0.13	-0.04	0.06	0.37	1

Tabla 5.10. Matriz de coeficientes de correlación de parámetros fisicoquímicos. Diciembre 2019. (en rojo de $r > \pm 0.75$, en negrita $r = \pm 0.50$ a ± 0.75).

Parámetros	° T.	pH	CE	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Sr ²⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	SiO ₂	Eh
° T.	1													
pH	0.74	1												
CE	0.57	0.80	1											
Ca	-0.35	0.03	0.19	1										
Mg ²⁺	-0.26	-0.01	0.18	0.69	1									
Na ⁺	0.57	0.76	0.90	-0.12	-0.18	1								
K ⁺	0.58	-0.28	-0.20	0.77	0.45	-0.41	1							
Sr ²⁺	-0.39	-0.07	0.13	0.74	0.92	-0.20	0.49	1						
HCO ₃ ⁻	0.07	0.34	0.51	0.59	0.72	0.30	0.16	0.67	1					
Cl ⁻	0.50	0.71	0.80	-0.09	-0.25	0.88	-0.32	-0.21	0.20	1				
SO ₄ ²⁻	0.06	0.30	0.49	0.39	0.06	0.41	0.22	0.07	0.04	0.55	1			
NO ₃ ⁻	0.32	0.11	0.24	0.06	0.12	0.10	0.02	0.07	0.05	0.16	-0.18	1		
SiO ₂	0.54	0.56	0.58	0.17	0.18	0.72	0.56	0.25	-0.25	0.50	-0.38	0.11	1	
Eh	0.15	0.22	0.29	0.25	0.11	-0.34	0.19	0.00	0.01	-0.46	0.15	-0.13	-0.17	1

a) Correlación entre parámetros fisicoquímicos y parámetros químicos

En la Figura 5.10 se observa que la temperatura está en relación con la conductividad eléctrica (CE) del agua. También se aprecian tres grupos; el primero corresponde a una zona de recarga (SJR-20) con la temperatura y CE baja, un segundo grupo que corresponde a la mayoría de los pozos ubicados en el Valle con temperatura que oscila entre 25 y 40 °C y la CE entre 300 y 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, y un tercer grupo que representa los pozos SJR-15 y SJR-16 con las temperaturas (36- 40 °C) y CE más altas (CE > 640 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

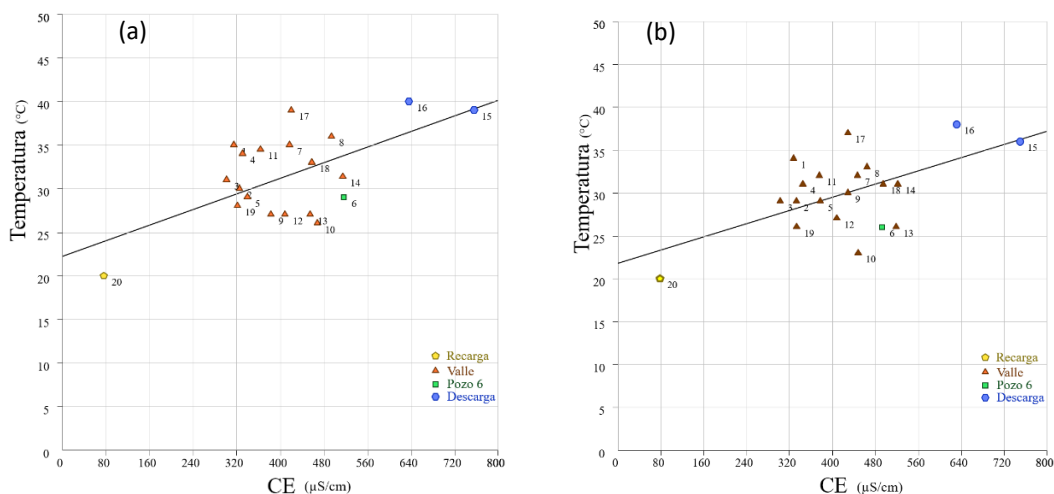


Figura 5.10. Relación de correlación Temperatura /CE (a) antes de temporada de lluvias, junio, 2019 y (b) después de temporada de lluvias, diciembre, 2019.

En el periodo de muestreo de junio, se tiene una correlación elevada de CE con respecto al contenido de Na^+ y Cl^- (Figura 5.11 a, b); y es moderada con las concentraciones de Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , SO_4^{2-} , y NO_3^- . Esta elevada correlación de los parámetros químicos con la CE confirma que el quimismo de agua está controlado por la presencia de los iones mayoritarios.

Para diciembre, los valores de las correlaciones identificadas con respecto a las de junio, aumentaron ligeramente en cuanto a Na^+ y Cl^- (Figura 5.11 c, d). La correlación con NO_3^- se mantiene débil, y el SiO_2 pasa de tener una correlación débil a moderada.

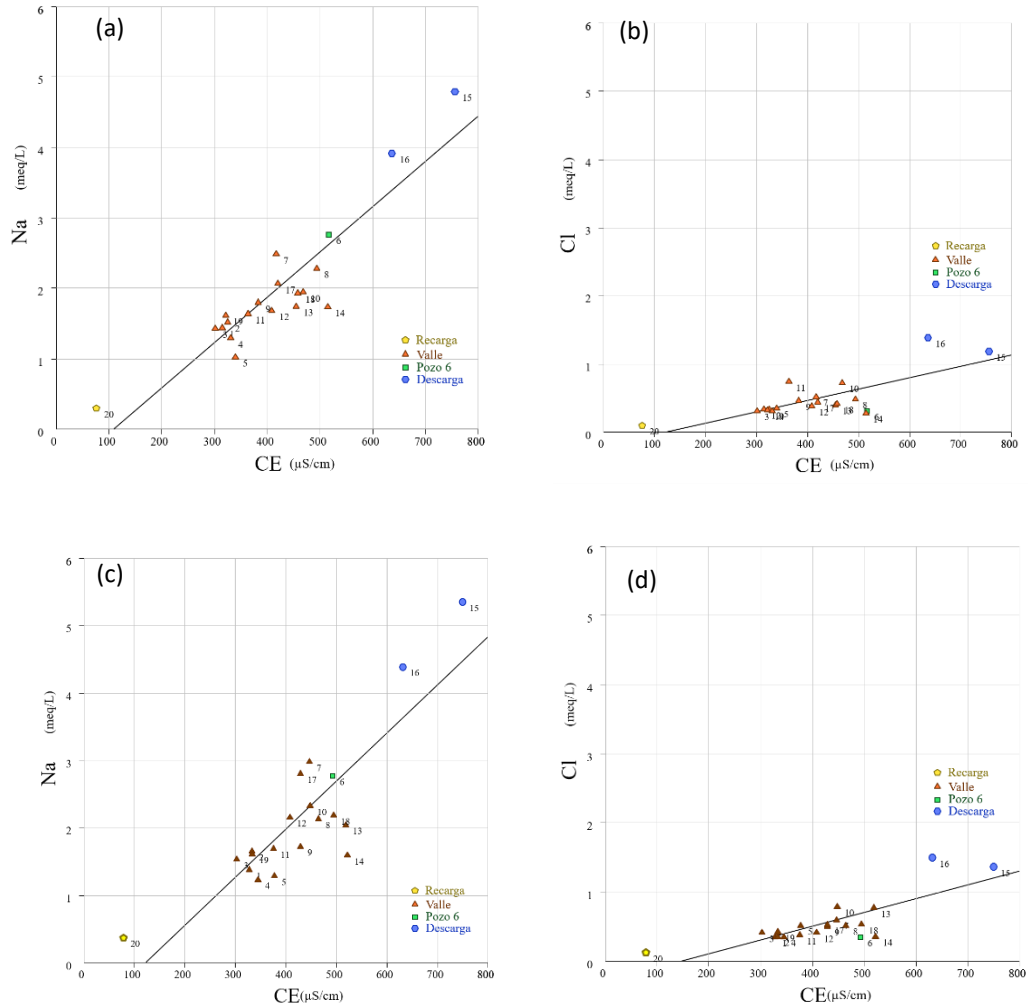


Figura 5.11. Relación de correlación (a) CE /Na⁺ y (b) CE /Cl⁻, antes de temporada de lluvias, junio, 2019. (c) CE /Na⁺ y (d) CE /Cl⁻, después de temporada de lluvias, diciembre, 2019.

b) Correlaciones entre iones

En las muestras de junio (Figura 5.12), la concentración de Mg²⁺ aumenta a la vez que se incrementa el contenido de bicarbonatos (HCO₃⁻), y su correlación con Sr²⁺ es moderada. En la temporada después de lluvias (Tabla 5.10), disminuye la correlación entre Mg²⁺ y HCO₃⁻ (r = 0.60) y se incrementa la correlación con Sr²⁺ (r = 0.92).

En el muestreo de junio, el contenido de Ca²⁺ en el agua está correlacionado moderadamente con HCO₃⁻ y Mg²⁺, y en la temporada de lluvias su correlación con K⁺ es elevada (r = 0.77), y se mantiene con Sr²⁺, Mg²⁺ y HCO₃⁻ en una correlación moderada.

La correlación de Na^+ con Cl^- es elevada y moderadamente negativa con SiO_2 , en la temporada antes de lluvias; sin embargo, después de la temporada de lluvias esta correlación incrementa. En cuanto al comportamiento de K^+ está moderadamente correlacionado con el contenido de SiO_2 .

Las correlaciones entre NO_3^- y SO_4^{2-} son débiles correlacionadas con los demás parámetros, lo que puede significarse que su origen no está relacionado con la composición química del medio y, por tanto, no hay correlación significativa con los demás elementos evaluados, lo que podría ser indicio de su origen antropogénico.

Para estudiar con más detalle al quimismo que manifiesta el agua subterránea del acuífero Valle de San Juan del Río, se generaron algunos gráficos representativos de las relaciones iónicas señaladas en los anteriores párrafos. En las Figura 5.12 se muestra la relación del HCO_3^- con $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ y se observa que el agua con mayor contenido de HCO_3^- corresponde al pozo 6, ubicado al sureste del acuífero; mientras que el pozo 20 presenta un bajo contenido de estos iones y los pozos 15 y 16 tienen una mayor concentración de HCO_3^- que de $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$.

La relación entre HCO_3^- y $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ (Figura 5.13) muestra similar comportamiento en el sentido de que los pozos 6 y 20 se diferencian del resto de las muestras de pozos ubicados en el valle, así como también en el caso de los pozos ubicados en la zona noroeste (pozos 15 y 16). La tendencia de las muestras de agua subterránea procedentes de aquellos pozos ubicados en el Valle tienden a localizarse por debajo de la línea $y = 2x$ en el gráfico HCO_3^- versus $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ (Figura 5.12) junto con una baja proporción de HCO_3^- frente a $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ (Figura 5.13) sugiere que la disolución de minerales carbonatados no es el origen de la presencia de estos iones y, por tanto, tomando en cuenta la litología de la zona de estudio hay que considerar la alteración de silicatos.

Además, en la figura 5.13 los puntos de muestreo se ubican debajo de $y = 2x$ y cerca de $y = x$ debido a concentraciones más altas de Na^+ y K^+ , y ello posiblemente indicarían la alteración de silicatos que podría causar un enriquecimiento de Na^+ y K^+ , debido al efecto de disolución de feldspatos con Na^+ y K^+ (Biswas *et al.*, 2012; Esteller *et al.*, 2017).

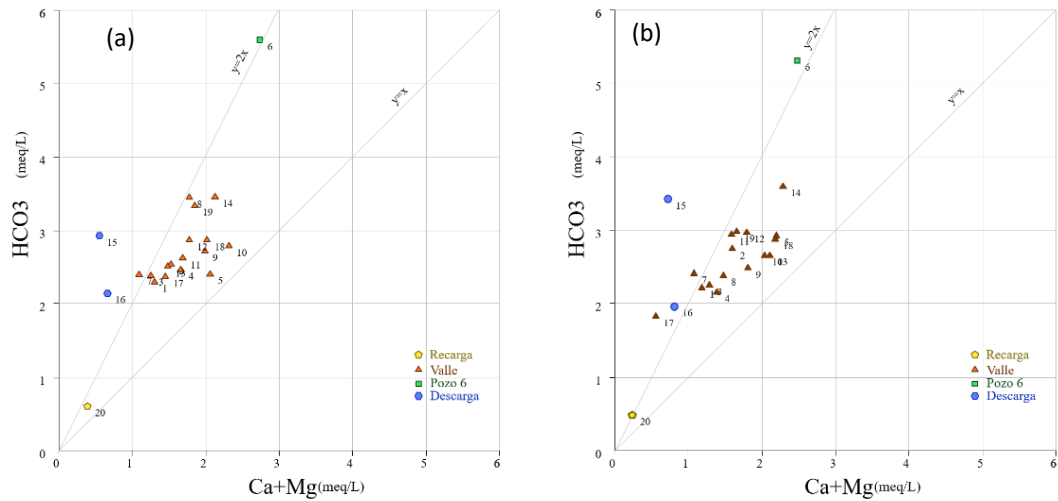


Figura 5.12. Relación de $\text{HCO}_3^- / \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$. (a) Antes de temporada de lluvias, junio 2019, y (b) después de temporada de lluvias, diciembre, 2019.

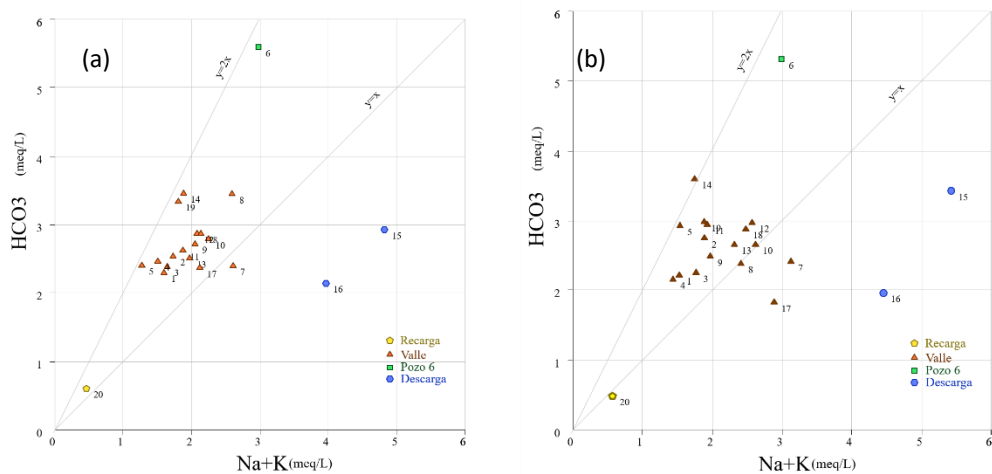


Figura 5.13. Relación de $\text{HCO}_3^- / \text{Na}^+ + \text{K}^+$. (a) Antes de temporada de lluvias, junio, 2019 (b) Después de temporada de lluvias, diciembre, 2019.

Con respecto a Cl^- en relación con Na^+ , se puede apreciar que todos los puntos se alejan de la línea $x = y$ (que representa la disolución de halita) y quedan agrupados por encima de esta línea lo que indica mayores aportes de Na^+ que podrían estar relacionados con la alteración de los silicatos y/o proceso de intercambio iónico (Biswas et al., 2012). Hay que resaltar los puntos que se ubican en la zona noroeste (pozos 15 y 16), los cuales presentan las concentraciones más altas de Na^+ , así como de Cl^- . Por otro lado, se aprecia un bajo contenido

de estos elementos en la zona de recarga que está representado por el pozo 20 y que indicaría un agua de reciente infiltración (Figura 5.14).

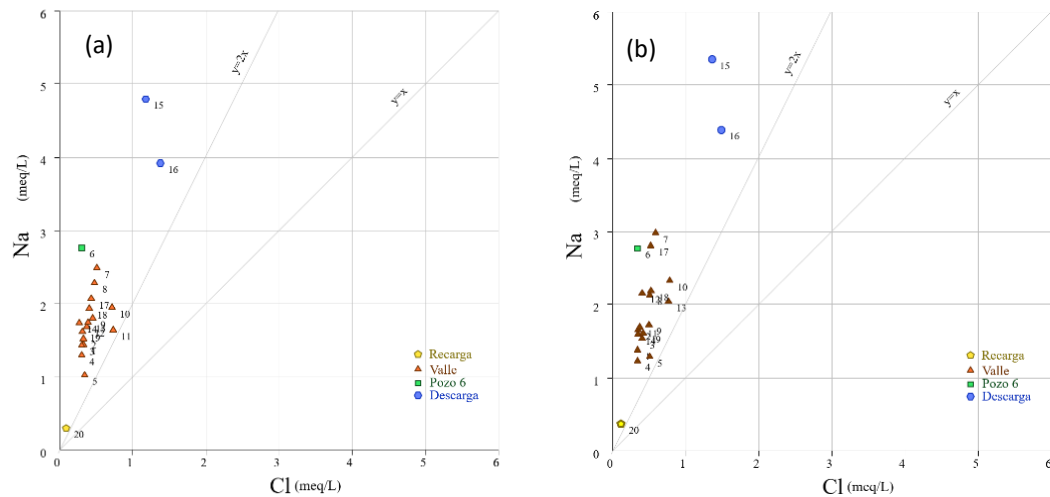


Figura 5.14. Relación de Na^+/Cl^- . (a) Antes de temporada de lluvias, junio 2019, y (b) después de temporada de lluvias, diciembre, 2019.

5.4.7. Posibles orígenes y procesos hidrogeoquímicos

En general, el grado de aporte de iones al agua no es sólo función de la composición mineralógica de las rocas volcánicas, volcanosedimentarias y/o sedimentarias, sino también del tipo de textura y de su alterabilidad, del grado de fragmentación del material y de la agresividad del agua, así como de la temperatura y la presión. La agresividad del agua en terrenos volcánicos suele estar relacionada a la disponibilidad de CO_2 , lo cual favorece los procesos de interacción agua-roca, (Custodio y Llamas, 1996; Marrero, 2010), hecho que puede ser apreciado en las reacciones que se presentan en los siguientes incisos.

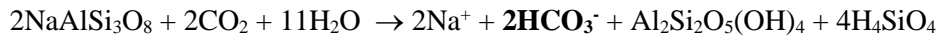
Las rocas básicas aportan iones a las aguas subterráneas más rápidamente que las rocas ácidas, dado que estas últimas están formadas por minerales menos alterables.

a) Bicarbonatos

Dado que el HCO_3^- es el ion dominante en el acuífero, una posible explicación sobre su origen podría ser que el acuífero Valle de San Juan del Río pertenece a un ambiente volcánico, por ende, la meteorización de las rocas volcánicas aporta dióxido de carbono al agua subterránea

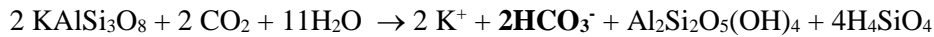
(Marrero, 2010). En la cadena natural de reacciones, el dióxido de carbono en el agua forma el ácido carbónico y, éste último los bicarbonatos y protones (Esteller *et al.*, 2017).

La alteración de los minerales de sílice (presentes en las rocas ígneas que conforman el acuífero) pueden ser otra fuente importante de bicarbonatos ya que en el medio subterráneo se tienen reacciones como:



Albita

Caolinita



Ortoclasa (microclina)

Caolinita

Este tipo de reacciones también pueden afectar a otros minerales del grupo de los silicatos como son feldespatos potásicos, y minerales del grupo de piroxenos, olivinos y biotitas. Esta alteración de los silicatos se ha podido establecer en las anteriores Figuras 5.12 y 5.13, donde se comprueba que el origen de estos aniones, así como del Ca^{2+} y Mg^{2+} no está relacionado con apotres de rocas carbonatadas.

Por otra parte, otros aportes son debidos a entradas de CO_2 desde la atmósfera al suelo, así como por su presencia en el suelo debido a la respiración de las raíces y la degradación de la materia orgánica (Appelo y Postma, 2005). Este tipo de proceso estaría más ligados a las aguas de reciente infiltración, como podría ser el caso del pozo 20, ubicado en la zona de recarga y que además presenta un bajo contenido de SDT.

b) Cloruro

El cloruro procede por el lavado de terrenos marinos; siendo de gran aporte de cloruro por aguas congénitas (agua almacenada dentro de yacimientos de hidrocarburo) y la disolución de fósiles. También por rocas evaporíticas (halita: NaCl) y en menor porción por minerales presentes en rocas ígneas y metamórficas como son sodalita y apatito $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F,Cl,OH})$, (Custodio y Llamas, 1996). En el presente caso de estudio, su origen no es posible vincularlo a ninguno de estos procesos (Figura 5.14).

Los valores más altos de Cl^- se encuentran en los pozos 15 y 16 para ambas campañas de muestreo, mismos que se encuentran al noroeste del acuífero. Una posible respuesta a estas elevadas concentraciones es que a medida que el agua circula desde la zona de recarga hasta la zona de descarga, tiende a ir aumentando su grado de mineralización (Custodio y Llamas, 1996), es decir, desde el punto de recarga (infiltración) la concentración aumenta a medida que el agua transita por diferentes unidades geológicas, ricas en otras sales solubles, lo que posibilita que la composición del agua sea distinta en la zona de descarga. En este caso también hay que considerar adicionalmente otros orígenes, ya que como se ha comprobado en el epígrafe de iones minoritarios, estos pozos están caracterizados por la presencia de As y F^- (epígrafe 5.4.4), así como por una elevada temperatura (Figura 5.10).

c) Sulfato

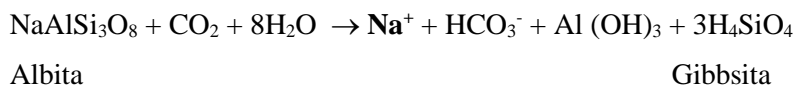
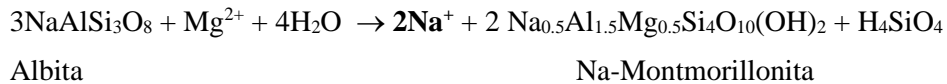
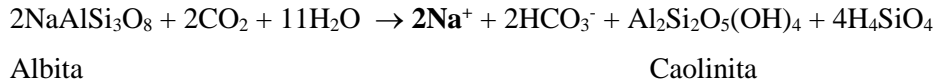
El sulfato procede del lavado de terrenos en condiciones de aridez o en ambientes marinos. También de la oxidación de sulfuros de rocas ígneas, metamórficas o sedimentarias, de la disolución de minerales como pirita (FeS_2), yeso ($(\text{CaSO}_4) (2\text{H}_2\text{O})$), y anhidrita (CaSO_4). En algunas condiciones, se pueden obtener cantidades considerables de sulfato a partir de compuestos orgánicos de azufre (combustión de carbón y petróleo, fundición de minerales de sulfuro y aguas geotermales) (Custodio y Llamas, 1996; Appelo y Postma, 2006).

En el presente caso de estudio, se detectan concentraciones de este anión que no superan los 64 mg/L. Se podría señalar la presencia de algunos minerales de sulfuros en las rocas ígneas, que se hayan podido oxidar ya que parece existir un ambiente oxidante en el acuífero (los valores de potencial redox tienen un valor medio de entre 139 y 173 mV, tabla 5.4) como un posible origen. Otro posible origen podrían ser los fertilizantes, ya que algunos de ellos están formulados a base de sulfato amónico, y que podrían ser lixiviados con el agua de riego. Sobre este punto cabe destacar, la correlación que existe entre SO_4 y Cl (con r próximos a 0.5, Tablas 5.9 y 5.10), que podrían indicar un origen común relacionado con el retorno de riegos.

d) Sodio

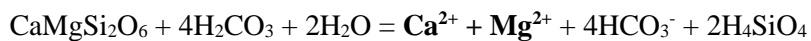
Siendo el ion sodio Na^+ el segundo ion predominante en el acuífero, este puede relacionarse al intemperismo de silicatos incluyendo la albita (plagioclasa sódica) ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), que es común en rocas de composición alcalina como son las andesíticas basálticas (Marrero, 2010),

las cuales conforman la litología de la zona, así como de los minerales constituyentes de los materiales que forman el acuífero poroso. Posibles reacciones serían:

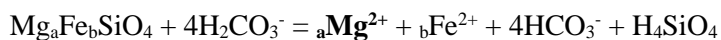


e) Calcio y Magnesio

Refiere Marrero (2010), uno de los procesos que pueden explicar el origen de las aguas subterráneas con altos contenidos en Ca^{2+} y Mg^{2+} es la hidrólisis del piroxeno ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$) y el olivino ($\text{Mg}_a\text{Fe}_b\text{SiO}_4$) presentes en rocas ígneas cuando son atacados por aguas ricas en CO_2 disuelto, tal y como reflejan las siguientes reacciones:



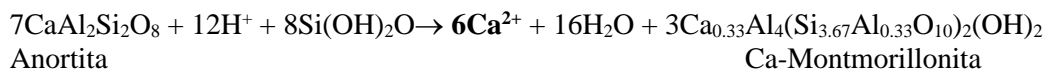
Piroxeno



Olivino

siendo $a + b = 1$.

Otras reacciones, implican a la anortita (del grupo de la plagioclasa)



f) Potasio

Según Custodio y Llamas (1996) el potasio K^+ , al igual que el sodio Na^+ , se origina fundamentalmente del ataque de la ortosa y otros silicatos, principalmente feldespato potásico (KAlSi_3O_8), mica ($\text{KA1}_2(\text{AlSi}_3)\text{O}_{10}(\text{OH})_2$), y arcillas. También pueden ser aportes

de K^+ sales potásicas naturales (silvinita (KCl), carnalita, etc.) y en pequeñas cantidades de aportes del agua de lluvia.

Ejemplos de algunas reacciones de silicatos que explican la presencia de K son:



Feldespató potásico



Biotita

Caolinita

g) Sílice

En las muestras de agua subterránea procedentes del acuífero San Juan del Río, La concentración de sílice (SiO_2) presenta un valor promedio de 74 y 77 mg/L, para las dos campañas.

Como se puede apreciar en las anteriores reacciones de ataque de minerales de sílice, uno de los productos de las reacciones es el H_4SiO_4 , que es la forma iónica en la que normalmente se encuentra el silicio en el agua (Custodio y Llamas, 1996).

h) Estroncio

Los minerales que contiene Sr^{2+} principalmente son la estroncianita (SrCO_3), celestita (SrSO_4) y aragonita (CaCO_3). En este último es común que el estroncio Sr^{2+} sustituye a Ca^{2+} en aragonita, pero no en calcita. Durante la diagénesis cuando la aragonita se convierte en calcita polimorfo más estable, el estroncio se libera al agua (Hounslow, 1995).

Los valores de estroncio Sr^{2+} se reportaron bajos y estos oscilan entre 0.01 y 0.36 mg/L para las muestras tomadas antes de temporada de lluvias y entre 0.01 y 0.30 mg/L después de temporada de lluvias.

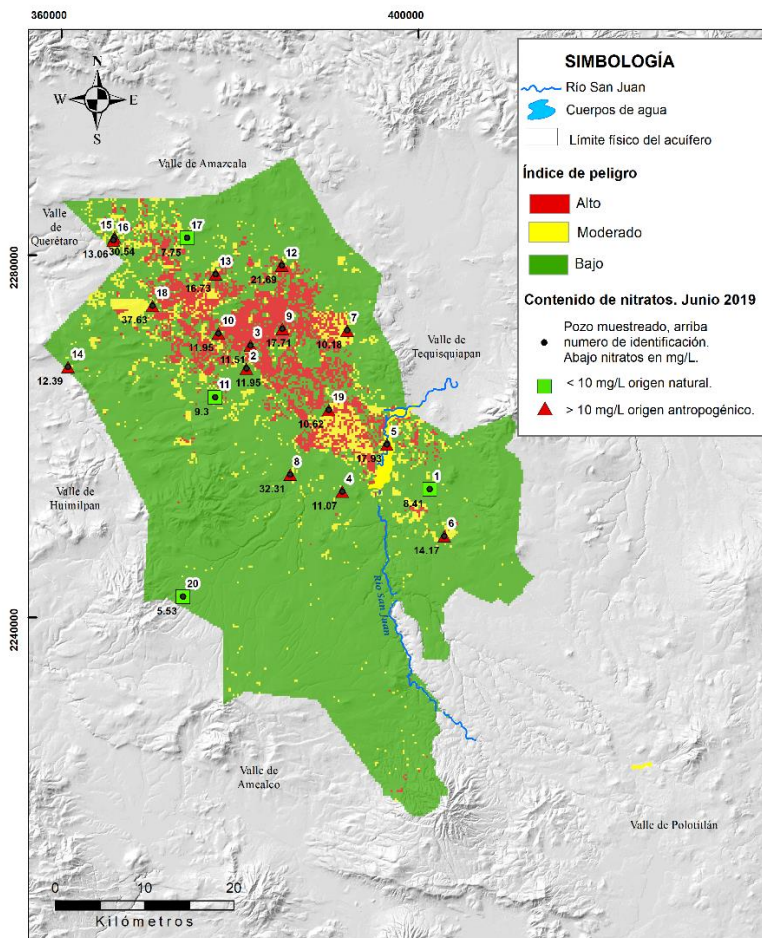
i) Nitrato

El nitrato NO_3^- se encuentra en concentraciones que exceden los 10 mg/L en la mayoría de los pozos muestreados, valor que se considera como indicador de un proceso contaminante (Sankaramakrishnan *et al.*, 2008), lo que posiblemente indica contaminación desde las zonas agrícolas (contaminación antropogénica) que se encuentran cubriendo gran parte del sector central del acuífero.

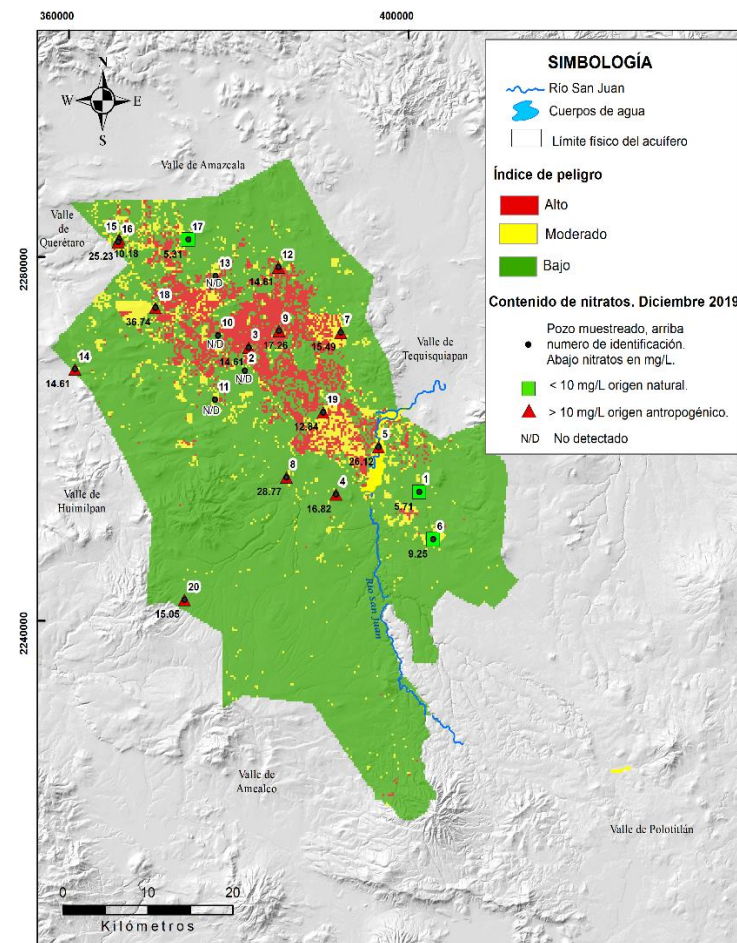
En las Figuras 5.15a y 5.15b se observan los puntos muestreados con su respectivo valor de NO_3^- ; en triángulo rojo los sitios con valores > 10 mg/L, y en cuadrado verde, los sitios con valores < 10 mg/L, teniendo como fondo el mapa de peligro a la contaminación. Se puede comprobar, para ambas campañas, como los pozos con concentración superiores a los 10 mg/L se encuentran ubicados en las áreas señaladas de mayor peligro. Estas mismas áreas están relacionadas, fundamentalmente, con las actividades de agricultura de riego

Cabe mencionar que, los valores cambiaron ligeramente con respecto a las temporadas antes y después de lluvias, sin embargo, los valores más altos se mantuvieron en el pozo 18 ubicado al noroeste del acuífero y el pozo 8 localizado al poniente de la presa “Constitución”.

Con base en la comparación entre los datos detallados en el estudio MAV, (2012) (campaña de muestreo diciembre 2011, y los datos obtenidos en el presente trabajo de investigación (junio y diciembre de 2019) se comprueba que ha habido una ligera variación ya que en la campaña realizada en el 2011, el valor mínimo obtenido par este ion fue de 3.5, y el máximo de 51.7, siendo el valor promedio de 17.2 y existiendo dos pozos que superaban el valor máximo señalado en la norma de agua para uso y consumo humano. En el presente estudio el valor promedio fue de 13.4 mg/L en junio y de 15.6 mg/L en diciembre, no existiendo ningún pozo que superara el valor limite. Ello puede estar relacionado con el descenso de la superficie agrícola, entre estos años lo cual implica también una disminución en el uso de fertilizantes.



(a)



(b)

Figura 5.15. Concentración de NO_3^- en el AVSJR, sobre mapa de peligro. Temporadas antes (a) y después (b) de lluvias, 2019

a) Fluoruro

El fluoruro en las aguas subterráneas se origina a partir de la disolución de fluorita (F_2Ca), así como la criolita (F_6AlNa_3) y la fluorapatita ($(PO_4)_3(F,Cl)Ca_5$), o más comúnmente, de la disolución de micas y anfíboles que contienen fluoruro (Hounslow, 1995). La presencia de la fluorita 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).

En las Figuras 5.16a y 5.16b se observan cuatro pozos con valores de F^- mayores a 1.5 mg/L; el pozo 7 el cual se encuentra al este del acuífero y cercano a una falla geológica de tipo normal, asimismo, los pozos 15, 16 y 17 que se ubican en el sector noroeste del acuífero y localizados próximos a fallas geológicas. Una posible explicación a su origen es que el agua subterránea del acuífero en estos puntos está en contacto con flujos geotérmicos que interactúan con rocas ricas en F^- y ascienden por las fallas (Galicía *et al.*, 2011).

Además, la presencia por fluoruro está relacionada con la disolución de rocas volcánicas ácidas (Armienta y Segovia, 2008), y en este caso corresponden a riolitas y tobas riolíticas (ToR-TR y TplR-TR).

b) Arsénico

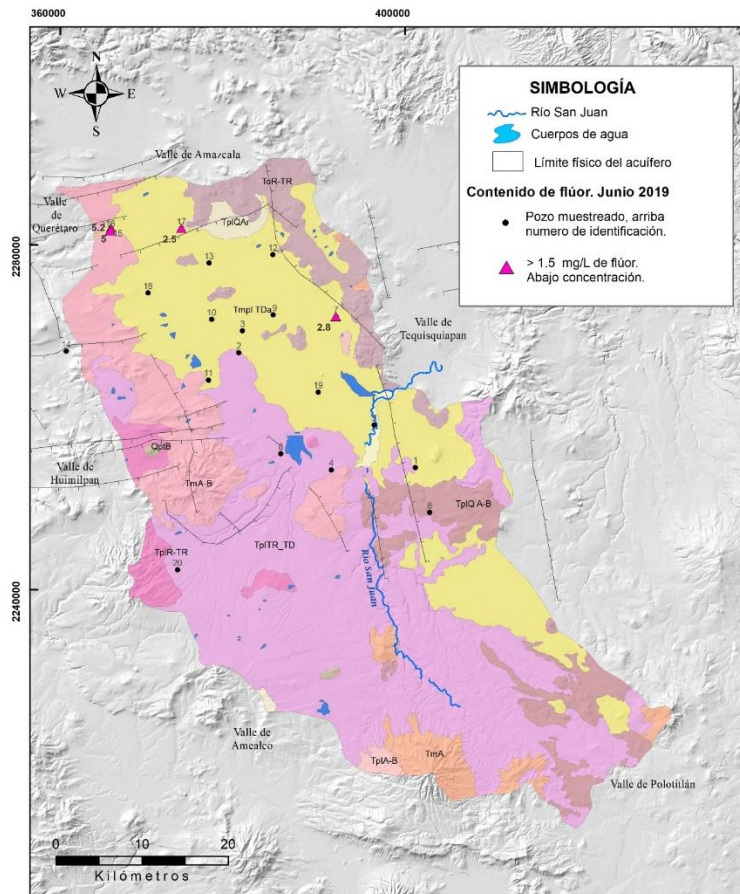
Los minerales de arsénico como es la arsenopirita ($FeAsS$) se pueden encontrar en una gran variedad de entornos geológicos, que incluyen rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas. También existe un gran aporte de arsénico por el ascenso de flujos geotérmicos a través estructuras geológicas, como son fracturas y fallas (Hurtado y Gardea, 2006; Aragonés *et al.*, 2001).

También se ha encontrado que las rocas riolíticas-ignimbríticas, además del F^- , contienen cantidades importantes arsénico en minerales, que pueden ser incorporadas en solución durante su contacto con el agua subterránea, en condiciones de oxidación (Ortega-Guerrero, 2009).

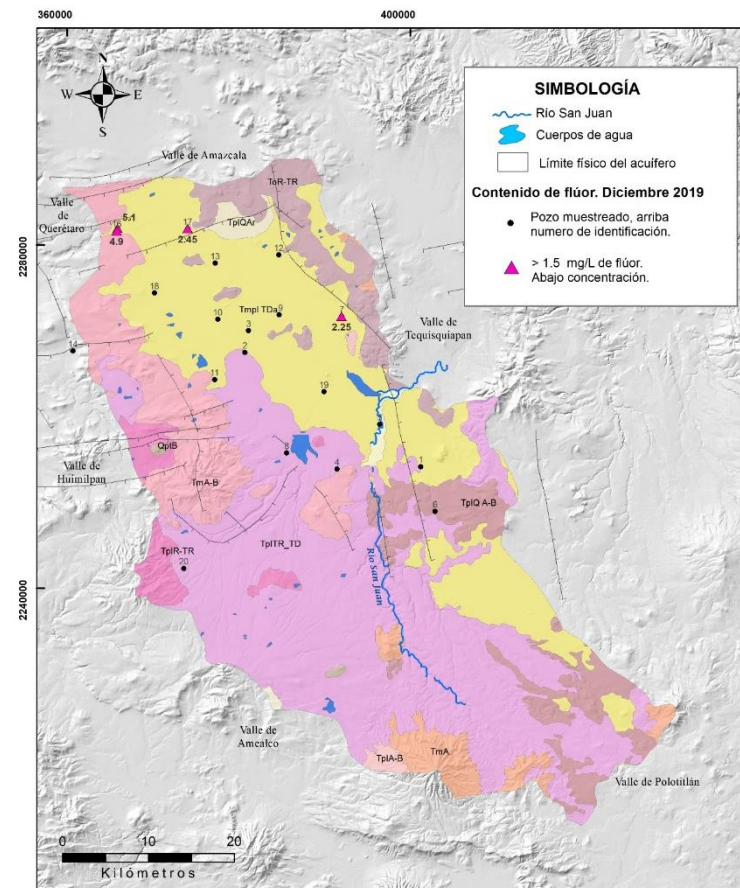
En el acuífero Valle de San Juan del Río, el cual está conformado por rocas de composición ácida (ToR-TR y TplR-TR), se detectaron concentraciones de arsénico en los pozos 6 con

valores entre 0.010 y 0.025 mg/L y en los pozos 7, 15, 16 y 17 por encima de 0.025 mg/L (límite máximo permisible por la NOM-127-SSA1-1994) en ambas temporadas de muestreo (Figura 5.17a y 5.17b).

Como se comprueba, la presencia de F^- y As se da de forma conjunta en los mismos pozos, pozos que también tienen como característica particular temperaturas del agua entre 35 y 40°C (excepto pozo 6 con 29°C). Situación similar se ha podido comprobar en los acuíferos volcanosedimentarios del Bajío Guanajuatense, lo cual ha sido estudiado por Morales et al. (2015). Estos autores señalan que el F^- y el As están presentes en aguas naturales casi siempre como aniones, por lo que desde el punto de vista hidrogeoquímico tienen un comportamiento similar. El As está regularmente asociado con sulfuros metálicos, pero también se encuentran en minerales formadores de rocas como los silicatos. Las riolitas tienen concentraciones significativas de F^- y As que se puede liberar e incorporar al agua subterránea en condiciones oxidantes. Por otro lado, en este acuífero se pudieron comprobar que aquellos pozos con las temperaturas más altas se encontraban cerca de fallas y fracturas, lo cual también coincidían con las concentraciones más altas de F y As en agua subterránea. En sistemas hidrotermales la solubilidad de algunos minerales es mayor con respecto a aguas no termales y normalmente las concentraciones de F^- y As^+ también son más altas en los sistemas geotérmicos. Para la presente zona de estudio se puede invocar un proceso similar.

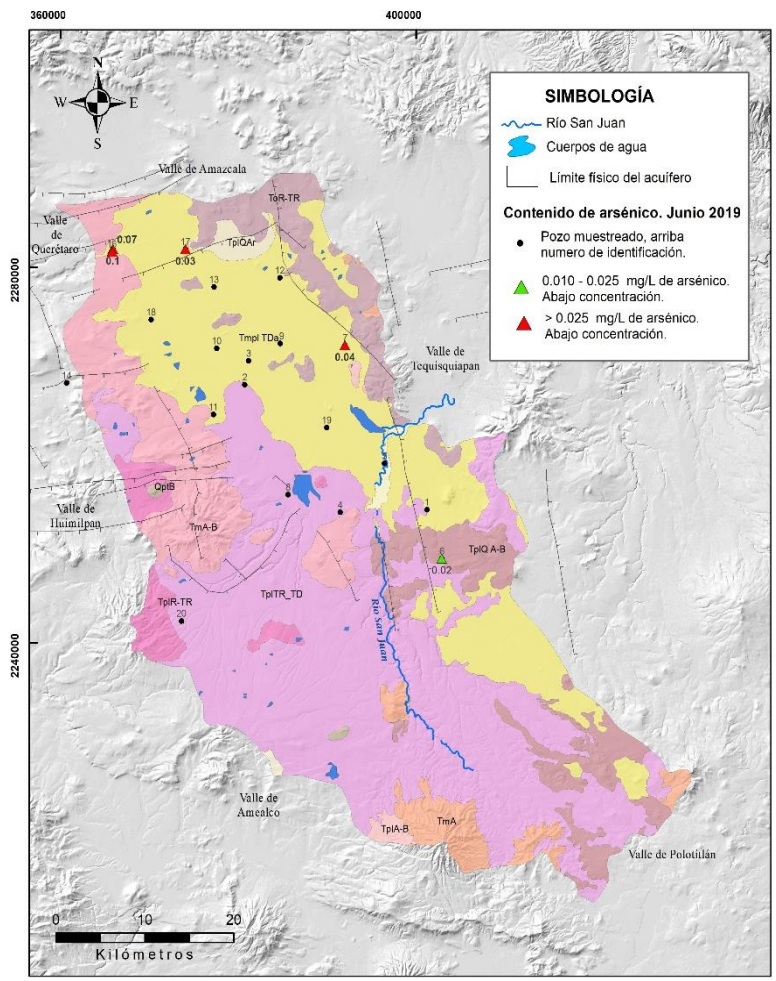


(a)

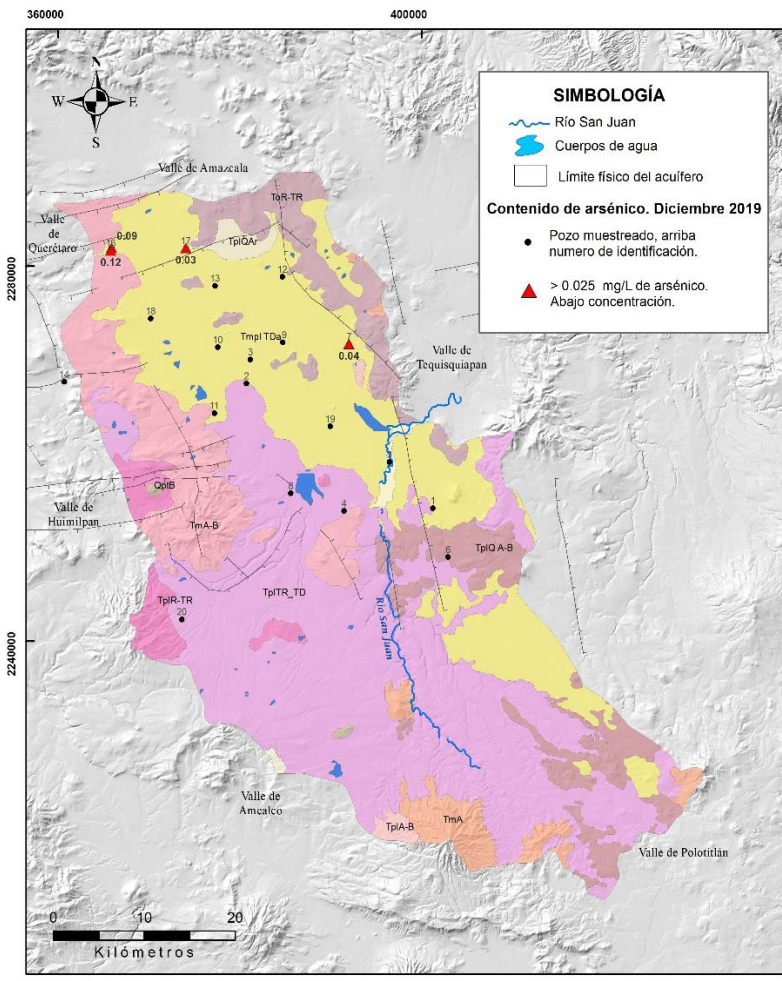


(b)

Figura 5.16. Concentración de F⁻ en el AVSJR, sobre mapa de geología. Temporadas antes (a) y después (b) de lluvias, 2019.



(a)



(b)

Figura 5.17. Concentración de As^+ en el AVSJR, sobre mapa de geología. Temporadas antes (a) y después (b) de lluvias, 2019.

5.4.8. Secciones geológicas en relación con los pozos que presentan As y F⁻

Desde el punto de vista hidrogeológico, el acuífero Valle de San Juan del Río es de tipo libre conformado por dos medios principales: poroso y fracturado. El medio poroso está constituido por depósitos volcánicos de caída libre (Tmpl TDa y Tpl TR-TD) con espesores que varían de 40 a 200 m. Por su parte, el medio fracturado corresponde a rocas volcánicas de composición andesítica-basáltica (Tm A-B y Tm A) menor a 400 m. Ambos medios, se encuentran hidráulicamente conectados y sobreyacen a una secuencia de riolitas de baja permeabilidad (ToR-TR) de composición ácida, las cuales son consideradas el basamento del acuífero y tiene un espesor mayor que 400m. (Medina, 2017).

Además, el acuífero presenta un sistema de fallamiento complejo siendo de tipo normal, lo que provocan caída de bloques en escalonamiento. Estas fallas podrían facilitar la entrada de agua de lluvia, agentes contaminantes y/o el ascenso de flujos hidrotermales. También es importante mencionar que se han detectado altos contenidos de As y F en el acuífero y altas temperaturas, y de acuerdo con la literatura consultada (Hurtado y Gardea, 2006; Aragonés et al., 2001; Ortega-Guerrero, 2009), las rocas volcánicas de composición ácida como son las riolitas contienen cantidades importantes de arsénico y fluor, y también, existe un gran aporte de estos iones por el ascenso de flujos geotérmicos a través fallas y fracturas.

Con base en la información geológica del Servicio Geológico Mexicano del SGM, 2010 (Anexo C1) y Medina, 2017 se procedió a realizar un reconocimiento geológico principalmente en los pozos que presentan anomalías hidroquímicas. Para un estudio a mayor detalle se elaboraron dos secciones (Figura 5.18) las cuales se describen a continuación:

Sección A – A’: Esta sección representa el perfil geológico de la zona norte del acuífero (Figura 5.19). En la porción oeste y en el Valle existe una capa de tobas dacíticas (Tmpl TDa) con espesor de 60 m, hacia la porción noreste se encuentra un material de tipo sedimentario (TplQAr) que cubre el graben limitado entre dos fallas de tipo normal. En profundidad, se encontraría material de tipo andesítico-basáltico (Tm A-B), andesitas (Tm A) y material de composición ácida correspondiente a las rocas más antiguas que son las riolitas y tobas riolíticas (ToR-TR) con espesor > 400 m.

Los pozos 15, 16 y 17 los cuales su profundidad esta en contacto con el medio fracturado, y como se ha mencionado con anterioridad, se presentan anomalías hidroquímicas, como es la temperatura y altos contenidos de As y F, cabe resaltar que, estos pozos se encuentran en contacto con una falla geológica.

Sección B – B': Esta sección representa una línea transversal a lo largo del Valle y es representada por tobas dacíticas (Tmpl TDa) que conforman el medio poroso, además de material de tipo andesítico (TmA), basáltico-andesítico (Tm A-B) y riolitas, y tobas riolíticas (ToR-TR) y estas constituyen al medio fracturado. En esta sección se ubican los pozos 10, 9 y 7, siendo este último de gran relevancia, ya que se encuentra cercano a una falla de tipo normal que marca el contacto con la unidad de riolitas y tobas riolíticas (ToR-TR) y tiene una dirección noreste-sureste (Figura 5.20). En tal sentido, se han detectado altas concentraciones de As y F, además de un alta temperatura en el pozo 7.

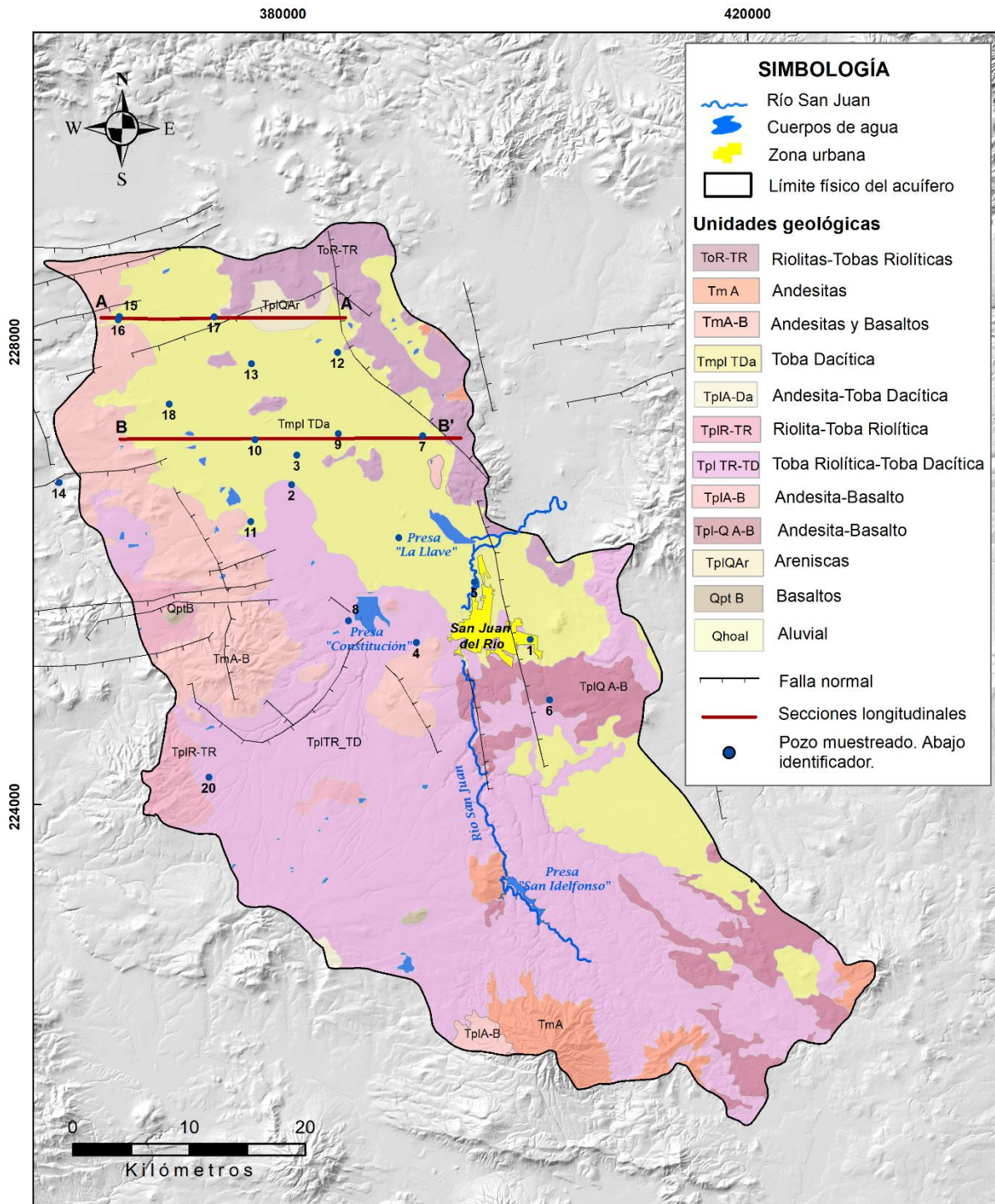


Figura 5.18. Mapa geológico con secciones longitudinales en el acuífero Valle de San Juan del Río.

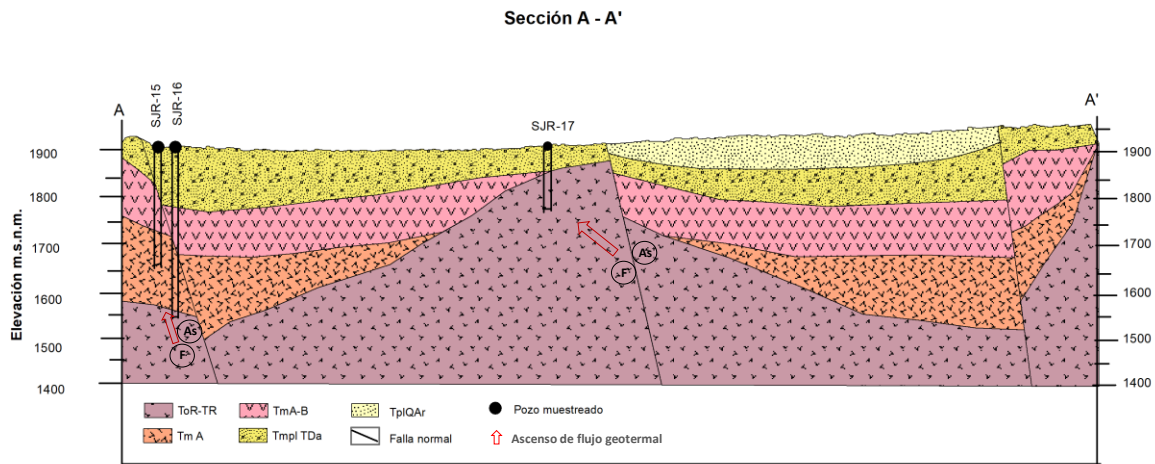


Figura 5.19. Sección longitudinal A – A'. Acuífero Valle de San Juan del Río.

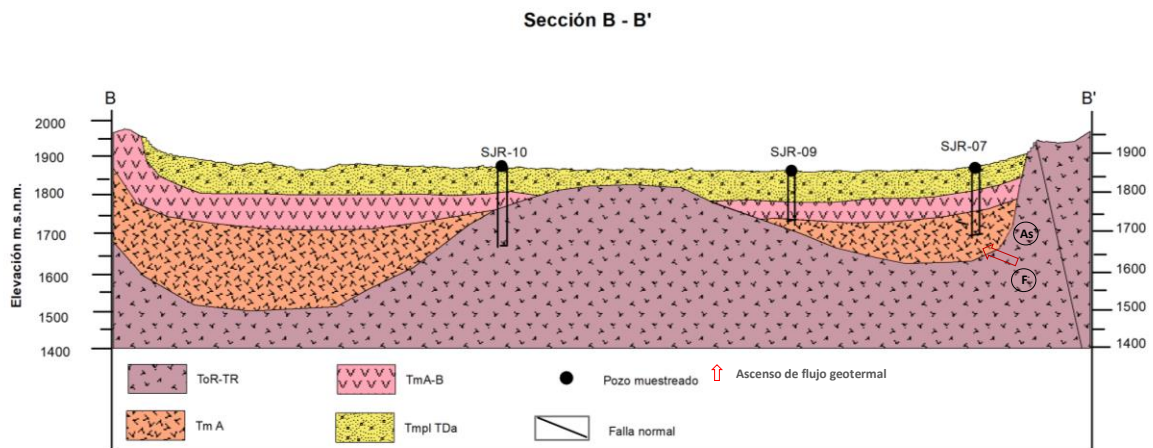


Figura 5.20. Sección longitudinal B – B' Acuífero Valle de San Juan del Río.

En la Tabla 5.11 se muestra la profundidad a la que se encuentra el agua subterránea en los pozos muestreados, también se observa que la temperatura del agua supera el gradiente geotérmico (entre 2.5 y 3.0 °C/100 metros IGME, 2008), y esto puede, indicar la existencia de flujos geotermales que posiblemente se mezclan con el flujo subterráneo del acuífero, favoreciendo a su vez la disolución de rocas ricas en As y F⁻, como es la roca volcánica de tipo riolítica (ToR-TR).

Tabla 5.11. Datos de los pozos con altos contenidos de As y F, con respecto a la temperatura y profundidad.

No. Pozo	Prof. (m)	JUNIO 2019					DICIEMBRE 2019				
		° T Amb	° T Agua	As mg/L	F ⁻ mg/L	Facie	° T Amb	° T Agua	As mg/L	F ⁻ nmg/L	Facie
7	152	20	35	0.04	2.80	HCO ₃ - Na	16	32	0.04	2.25	HCO ₃ - Na
15	150	19	39	0.10	5.00	HCO ₃ - Na	27	36	0.09	5.10	HCO ₃ - Na
16	350	22	40	0.07	5.20	HCO ₃ - Na	25	38	0.12	4.90	HCO ₃ -Cl-Na
17	130	19	39	0.03	2.50	HCO ₃ - Na	26	37	0.02	2.45	HCO ₃ - Na

Nota: l.c. – límite de cuantificación; Prof.- profundidad del agua subterránea; °T Amb.- temperatura ambiental del sitio; HCO₃- Na, Bicarbonatada sódica; ; HCO₃-Cl-Na Bicarbonatada clorurada sódica

Con base en los datos descritos en el estudio MAV, 2012 (campaña de muestreo diciembre 2011. (Anexo B2) y los datos obtenidos en el presente trabajo de investigación (junio y diciembre de 2019) se elaboró la Tabla 5.12, con el fin de conocer la evolución temporal de las concentraciones de esos iones.

Como resultado se observa que la temperatura es superior a los 30 °C y el pH indica que el agua de las muestras es alcalina. En cuanto a las concentraciones de As y F estas varían ligeramente con respecto a las campañas de muestreo. En general, la temperatura juega un papel de gran importancia en las concentraciones de As y F⁻ como se ha mencionado anteriormente, por ende, a mayor temperatura del agua mayor será la disolución en rocas ricas en As y F⁻, por ejemplo, la roca riolítica (ToR-TR).

Tabla 5.12. Datos de los pozos con altos contenidos de As y F, 2011 vs 2019.

No. Pozo	Prof. (m)	DICIEMBRE 2011				JUNIO 2019				DICIEMBRE 2019			
		° T Agua	pH	As ⁺ mg/L	F ⁻ mg/L	° T Agua	pH	As ⁺ mg/L	F ⁻ mg/L	° T Agua	pH	As ⁺ mg/L	F ⁻ mg/L
7	152	35	7.70	<l.c.	0.52	35	7.41	0.04	2.80	32	7.42	0.04	2.25
15	150	S/D	S/D	S/D	S/D	39	8.4	0.10	5.00	36	8.39	0.09	5.10
16	350	36	8.8	0.11	6.04	40	8.93	0.07	5.20	38	8.72	0.12	4.90
17	130	31	8.3	0.03	2.9	39	8.2	0.03	2.50	37	7.98	0.03	2.45

Nota: Prof.- Profundidad al agua subterránea en metros; <l.c.- Por debajo del límite de cuantificación; S/D. – Sin dato

5.5. Calidad del agua

5.5.1. Agua destinada al uso público urbano

Una evaluación de la calidad del agua en la zona del estudio se presenta en la Tabla 5.13, donde se ilustran los valores de los parámetros medidos contrastados con los límites definidos en la normatividad mexicana aplicable al uso y consumo humano (NOM-127-SSA1-1994, SSA1-2005), y con los criterios de la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2008). Los datos resaltados indican que se sobrepasa el límite permisible (L.P.).

Tabla 5.13. Resultados de los parámetros con respecto a la NOM-127-SSA1-1994 (SSA1-2005) y la OMS (2008) de los pozos destinados a consumo humano.

Parámetros	Limite NOM-127 (mg/L)	Límite OMS (mg/L)	Pozos que exceden (L.P.)	JUNIO 2019			DICIEMBRE 2019		
				Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio
Dureza total (CaCO ₃)	500	500		17	140	78	11	117	70
pH	6.5 - 8.5	6.5 - 8.5	2	6.39	8.93	7.66	6.24	8.72	7.69
Na ⁺	200	200		6.73	89.92	48.3	8.46	122.86	50.57
Cl ⁻	250	250		3.15	48.94	26	4.14	52.94	19.63
NO ₃ ⁻	44.3	50		5.53	37.63	21.58	5.31	36.74	13.43
SO ₄ ⁻²	400	250		6.37	40.1	23.2	6.01	64.83	18.96
As	0.025	0.01	3	0.02	0.10	0.05	0.03	0.12	0.07
F ⁻	1.5	1.5	3	0.10	5.20	1.05	0.07	5.10	0.98

Nota: L.P. – límite permisible; NOM. - norma oficial mexicana; OMS. - organización mundial de la salud

De acuerdo con los parámetros fisicoquímicos descritos en este trabajo de investigación y los límites permisibles de características químicas establecidos por la NOM-127 NOM-127-SSA1-1994 y la OMS todas las muestras cumplen con la dureza total (< 500mg/L como CaCO₃), Na⁺ (< 200 mg/L), Cl⁻ (< 250 mg/L), NO₃⁻ (< 50 mg/L y < 44.3 mg/L) y SO₄⁻² (< 400 mg/L). Sin embargo, existen parámetros que exceden los límites permisibles como es el pH (< 6.5 y > 8.5), los dos pozos que presenta un valor que excede con los límites permisibles son: SJR-16 pH >8.5 y SJR-20 pH < 6.5, esto se observa para ambas temporadas de muestreo.

En relación con los resultados reportados en la Tabla 5.13, los pozos que rebasan los límites permisibles de fluoruro (F^-) fueron SJR-15 (5.00 mg/L), SJR-16 (5.20 mg/L) y SJR-17 (2.5 mg/L) antes de la temporada de lluvias (muestreo del mes de junio, 2019). En la temporada después de lluvias en el pozo SJR-15 se incrementó su contenido de F^- a 5.10 mg/L, sin embargo, para los pozos SJR-16 y SJR-17 disminuyó poco, pero se mantienen por encima de los límites permisibles.

En cuanto a las concentraciones de arsénico (As), los pozos que no cumplen el límite son los mismos que presentan altas concentraciones de F^- (en ambas temporadas de muestreo). El pozo SJR-15 presenta un valor entre 0.09 y 0.10 mg/L, al igual que el pozo SJR-16 con valores de 0.07 y 0.12 mg/L, y por último el pozo SJR-17 se mantuvo en una concentración de 0.03 mg/L.

5.5.2. Agua destinada al uso agrícola

La calidad de agua para riego fue evaluada mediante diagramas de Wilcox. Esta evaluación se presenta y se discute en los epígrafes siguientes.

Clasificación del agua según el diagrama de Wilcox

Con respecto al diagrama de Wilcox (Figuras 5.21a y 5.21b), se logró clasificar el agua para riego con relación entre porcentaje de Na^+ y CE. Para las muestras tomadas antes de la temporada de lluvias (junio), se observa que la mayor parte de los pozos se encuentran en “Excelente a Buena” con un 50 % de sodio cercano al límite; sin embargo, un ligero aumento en la conductividad disminuye su calidad a “Buena a Admisible”, y en el caso del pozo 7 su calidad cambia de “Admisible a Dudosa”. En cuanto a las muestras de diciembre (después de temporada de lluvias), se nota un aumento del porcentaje de Na^+ para los pozos 7 y 17, los cuales su clasificación es “Admisible a Dudosa”, y también destaca el pozo 15 (uso: abastecimiento público) casi en el límite de “Dudosa a No valida”.

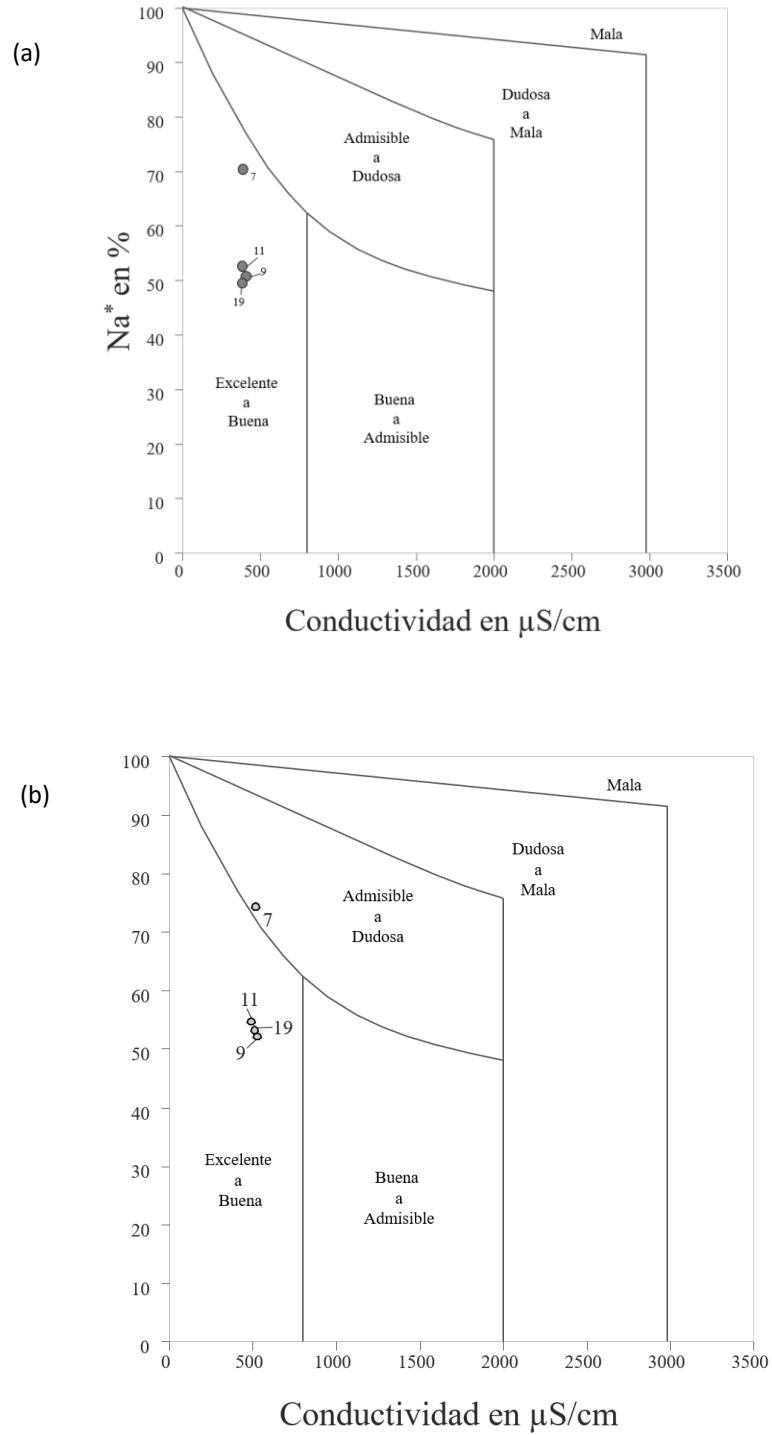


Figura 5.21. Diagramas de Wilcox para la clasificación del agua para uso agrícola. (a) Antes de temporada de lluvias, junio, 2019 (b) Después de temporada de lluvias, diciembre, 2019. Pozos destinados a riego

En la Tabla 5.14 se muestran los pozos muestreados destinados a uso agrícola, representados casi en su totalidad con una clasificación de “Excelente a Bueno”, excepto en el pozo 7 que pasó de “Excelente a Bueno” a “Admisible a Dudosa” debido a que incremento el % de sodio. Con base en esta clasificación se puede señalar que el agua de estos pozos puede seguir siendo utilizada para la actividad agrícola.

Tabla 5.14. Relación de los pozos destinados al uso agrícola y el diagrama de Wilcox

Id muestra	Nombre del pozo	Uso	Clasificación Wilcox	
			JUNIO	DICIEMBRE
SJR-07	Pozo 01 Rancho El Rocío	Agrícola	“Excelente a Bueno”	“Admisible a Dudoso”
SJR-09	Pozo 04 Ejido Guadalupe Septién	Agrícola	“Excelente a Bueno”	“Excelente a Bueno”
SJR-11	Pozo Rancho El Profeta	Agrícola	“Excelente a Bueno”	“Excelente a Bueno”
SJR-19	Pozo Rancho Ex Hacienda San Germán	Agrícola	“Excelente a Bueno”	“Excelente a Bueno”

Clasificación del agua según el diagrama de salinidad SAR

El diagrama de salinidad de EE. UU. es la relación de adsorción del sodio, donde el ion Na^+ es expresado en meq/L. El SAR mide el grado en el que el sodio en las aguas de riego reemplaza a los adsorbidos ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$) en las arcillas del suelo, y así daña la estructura del suelo. Las aguas de riego se clasifican en términos de peligro de salinidad (conductividad o SDT) y peligro de sodificación (SAR) (Hounslow, 1995; Peinado-Guevara *et al.*, 2011).

En las Figuras 5.22a y 5.22b se observa que hay una ligera variación con respecto a las muestras tomadas antes y después de temporada de lluvias, sin embargo, la clasificación se mantiene en C2 lo que significa que existe un lavado moderado del suelo, y el grado de peligro de sodificación (salinidad) se detecta bajo debido a concentraciones bajas de Na^+ en el agua de riego. Por tanto, el agua destinada al uso agrícola no presenta problemas para seguir siendo utilizada sin prácticas especiales de control.

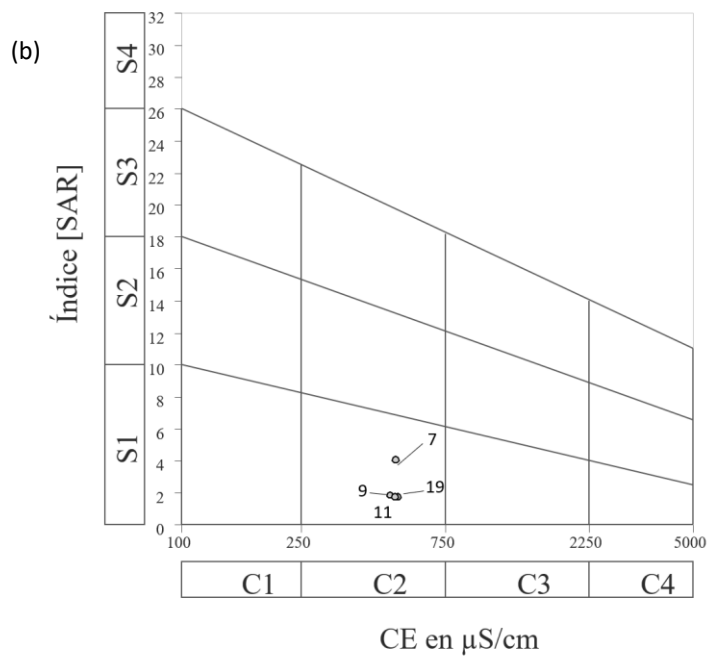
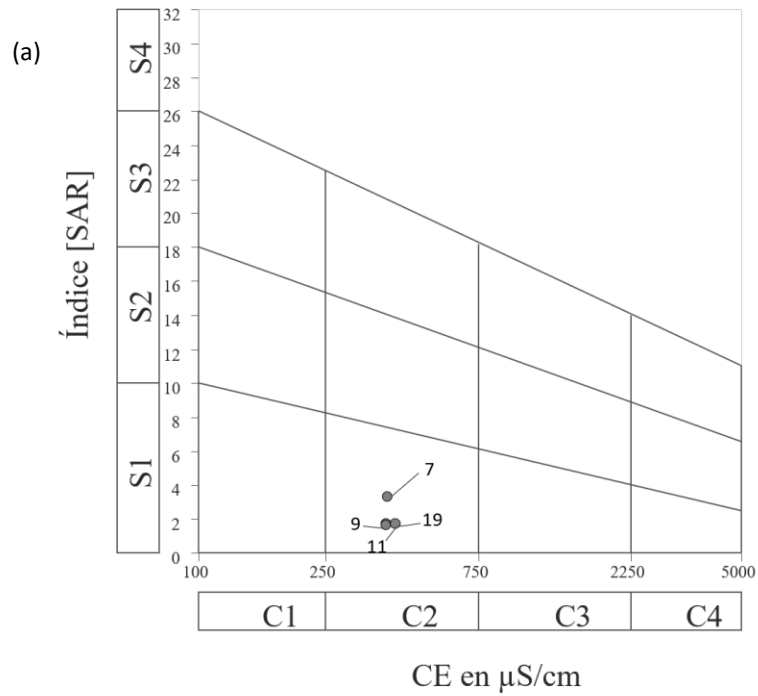


Figura 5.22. Diagramas de SAR para la clasificación del agua para uso agrícola. (a) Antes de temporada de lluvias, junio, 2019 (b) Después de temporada de lluvias, diciembre, 2019. Pozos destinados a riego

CAPÍTULO 6

Conclusiones y recomendaciones

6.1. Conclusiones

La integración de la información hidrogeológica y las características fisicoquímicas del acuífero Valle de San Juan del Río, permitieron tener un conocimiento más profundo sobre el funcionamiento hidrogeoquímico del acuífero.

Características fisicoquímicas para destacar son el termalismo que tiene el agua subterránea con una temperatura promedio de 31.5 °C y la baja conductividad eléctrica, que oscila entre 70 y 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$. La caracterización hidroquímica permitió clasificar las facies hidroquímicas correspondientes a las dos temporadas de muestreo; siendo bicarbonatada sódica la facie dominante en el acuífero.

El estudio de correlación de parámetros fisicoquímicos y la representación en gráficas permitió identificar que la correlación entre conductividad eléctrica y los iones mayoritarios, en concreto con sodio y en menor medida con iones bicarbonatos y magnesio. También se observó que los nitratos y sulfatos presentes en el agua no tienen correlación con los demás parámetros, lo que puede significarse que su origen puede ser antropogénico y, por tanto, no hay correlación significativa con los demás elementos evaluados.

En cuanto al contenido de iones minoritarios, se identificaron 4 iones de mayor importancia en el quimismo del agua subterránea, estos fueron: arsénico (0.01 – 0.12 mg/L), fluoruro (0.01 – 5.20 mg/L), SiO_2 (40 – 100 mg/L) y Sr (0.01 – 40 mg/L). El origen del fluoruro y de arsénico se asocia al proceso geogénico, ya que suelen depender de las características de las rocas riolíticas y flujos geotérmicos que ascienden por las fallas y fracturas.

Los nitratos NO_3^- se encontraron en la mayoría de los sitios muestreados con valores >10 mg/L, lo que significa que, el origen puede ser antropogénico debido a fertilizantes utilizados en las zonas agrícolas. Este proceso se pudo comprobar con la cartografía de peligro que permitió conocer la probabilidad que tiene el agua subterránea de contaminarse con base en las características

intrínsecas de la zona no saturada y la carga contaminante por actividades antropogénicas en la superficie del área en estudio. Las zonas con mayor peligro de contaminación se localizan en el centro y porción noroeste del Valle de San Juan, correspondientes en mayor parte a zonas de agricultura de riego y donde se localizaron los pozos con contenidos de $\text{NO}_3^- > 10 \text{ mg/L}$.

Por otra parte, se llevó a cabo una evaluación de la calidad del agua considerando los límites permisibles de la NOM-127-SSA1-1994 (SSA1-2005) y la OMS (2008), para uso y consumo humano. Esta evaluación permitió identificar 3 pozos con altos contenidos de arsénico ($\text{As} > 0.025 \text{ mg/L}$, NOM-127; $\text{As} > 0.010 \text{ mg/L}$, OMS) y flúor ($\text{F}^- > 1.5 \text{ mg/L}$ NOM-127 y OMS), ubicados al noroeste del acuífero.

En cuanto a la evaluación de la calidad del agua para uso agrícola a través del diagrama de Wilcox y SAR, se observó que los pozos destinados a la actividad agrícola están en óptimas condiciones para seguir siendo utilizados. Sin embargo, es importante saber que el uso racional del agua mitiga problemas a largo plazo.

6.2. Recomendaciones

De acuerdo con los resultados obtenidos en este trabajo de investigación se establecen las siguientes recomendaciones:

Se recomienda evaluar con más detalle los procesos hidrogeoquímicos, estudiando los índices de saturación y las especies químicas para tener un conocimiento más completo del funcionamiento hidrogeoquímico del acuífero Valle de San Juan del Río.

Otro estudio a realizar sería el enfocado a evaluar el termalismo de las aguas subterráneas y como ello podría estar condicionado el quimismo.

Referente a los pozos que exceden los límites permisibles para agua destinada a uso y consumo humano por arsénico y flúor establecidos en la NOM-127, se propone dar recomendaciones oportunas en cuanto al régimen de bombeo de los pozos de abastecimiento público-urbano para un control de las concentraciones de estos dos elementos. Además, se necesita realizar un monitoreo continuo con el fin de detectar cambios en las concentraciones de estos elementos contaminantes, y así evitar la afectación a la población.

Sería aconsejable llevar a cabo talleres, conferencias y foros, dirigidos a la población sobre los efectos del arsénico, fluoruro y otros elementos químicos presentes en el agua. Es importante reconocer a las autoridades responsables del suministro de agua potable, quienes tienen la capacidad de promover información referente al tema, para facilitar la planificación de estrategias que ayudan a mitigar el daño.

Una técnica que refiere la OMS (2008) para reducir la concentración de F^- y As^+ es mediante el tratamiento con alúmina activada ya que, a pesar de no ser un proceso de tratamiento convencional, la instalación de filtros con este material resulta relativamente sencilla. Otros tratamientos aplicados para reducir As son los convencionales, como la coagulación.

Referencias

- Albornoz I., & González R. (2017).** Vulnerabilidad a la contaminación del acuífero yucateco bajo escenarios de cambio climático. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*. 4(11), 275-286. Disponible en: <http://www.scielo.org.mx/pdf/era/ v4n11/2007-901X-era-4-11-00275.pdf>
- André, L., Franceschi, M., Pouchan, P., & Atteia, O. (2005).** Using geochemical data and modelling to enhance the understanding of groundwater flow in a regional deep aquifer, Aquitaine Basin, south-west of France. *Hydrology*, 305(1-4), 40-62. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.08.027>
- Antares, S.A. de C.V. (2008).** Estudio técnico justificativo del acuífero Valle de San Juan del Río para su reglamentación. Informe Técnico.
- APHA. (American Public Health Association), AWWA. (American Water Works Association) & WFPC. (Water Pollution Control Federation) (2005).** Standard methods for the examination of water and wastewater. 21th Edn. APHA, AWWA, WEF. Washington, D.C.
- Appelo, C., & Postma, D. (2006).** Geochemistry, groundwater, and pollution. 2nd Edit. A.A. Balkema Publishers, 615 p. ISBN 04-1536-428-0.
- Aragonés, N., Palacios, M., Avello, A., Gómez, P., Martínez, M., & Rodríguez, M. (2001).** Arsenic levels in drinking water supplies from underground sources in the community of Madrid. *Revista Española de Salud Pública*, 75 (5), 421-432. Disponible en: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11764560>
- Armienta, M., & Segovia, N. (2008).** Arsenic and fluoride in the groundwater of Mexico. *Environmental Geochemistry and Health*, 30 (4), 345-353. <https://doi.org/10.1007/s10653-008-9167-8>
- Auge, M. (2008).** Protección del agua subterránea frente a la contaminación y al agotamiento. *Hidrogeología Ambiental*, (34 - 45). Buenos Aires. Disponible en: <http://tierra.rediris.es/hidrored/ebooks/miguel/HidroGeoAmb.pdf>
- Ayala, A., & Aguirre, L. (1993).** Provincias Hidrogeológicas de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 52(1), 15-33.
- Báez, A. (2001).** Validación de mapas de vulnerabilidad en medios urbanos. Instituto de Geofísica. Universidad Nacional Autónoma de México. México.
- Biswas, A., Nath, B., Bhattacharya, P., Halder, D., Kundu, A.K., Mandal, U., Mukherjee, A., Chatterjee, D., Mörth, C.M., Jacks, G. (2012).** Hydrogeochemical contrast between

brown and grey sand aquifers in shallow depth of Bengal Basin: consequences for sustainable drinking water supply. *Sci. Total Environ.* 431, 402–412. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.05.031>.

Cap-Net (2010). Gestión de Aguas subterráneas en la GIRH. Manual de capacitación, Modulo 11 (27-61) Disponible en: <https://agua.org.mx/biblioteca/manual-de-gestion-de-aguas-subterranas-en-la-girh/>

CEA. Comisión Estatal del Agua del Estado de Querétaro-Universidad Autónoma de Querétaro. (2002). Estudio Integral del recurso agua en los acuíferos del estado de Querétaro. Reporte técnico, Tomo I.

CONAGUA. Comisión Nacional del Agua. (2018a). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero valle de San Juan del Río (2203), estado de Querétaro. Disponible en: https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/queretaro/DR_2203.pdf

Custodio, E., & Llamas, M. (1996). Hidrología Subterránea. Segunda edición. Tomo I, sección 10: Hidroquímica. 2da edición. Barcelona. Omega.

Dassi, L. (2011). Investigation by multivariate analysis of groundwater composition in multilayer aquifer system from North Africa: A multi tracer approach. *Applied Geochemistry*, 26 (8), 1386-1398. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2011.05.012>

Deutsch, W. (1997). Groundwater geochemistry. Fundamentals and Applications to Contamination. Lewis Publishers. 8 (13), 33-78. ISBN 0-87371-308-7.

Dochartaigh, B., Diaz, D., Rutter, H., & MacDonald, A. (2015). User guide: Groundwater Vulnerability (Scotland) GIS dataset. Version 2, revised report. Nottingham, UK, British Geological Survey, 27 p. (OR/15/002).

DOF. Diario Oficial de la Federación. (2015). Acuerdo por el que se da a conocer el resultado de los estudios técnicos de aguas nacionales subterráneas del acuífero Valle De San Juan del Río, clave 2203, en el estado de Querétaro, Región Hidrológico-Administrativa Golfo-Norte. Disponible en: http://www.dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?Codigo=5406472

EA. Environment Agency. (2013). Groundwater protection: Principles and practice (GP3). Reino Unido. Disponible en: <https://www.gov.uk/government/publications/groundwater-protection-principles-and-practice-gp>

Eastman, J. (2015). TerrSet, Geospatial Monitoring and Modeling System. Clark University. Massachusetts, Unites States. Manual, version 18.31.

- Escobar, J. & Cuervo, A. (2008).** Validez de contenido y juicio de expertos: una aproximación a su utilización. *Avances en medición*, 6 (1), 27-36. Universidad El Bosque, Institución Universitaria Iberoamericana. Colombia
- ESRI. Environmental Systems Research Institute. (2016).** ArcGIS Desktop Server: ArcMap 10.4
- Esteller, M., Kondratenko, N., Expósito, J., Medina, M., & Martin del Campo, M. (2017).** Hydrogeochemical characteristics of a volcanic-sedimentary aquifer with special emphasis on Fe and Mn content: A case study in Mexico. *Journal of Geochemical Exploration* 180:113-126. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.06.002>
- Expósito, J. (2012).** Características hidrodinámicas e hidroquímicas del acuífero multicapa del Valle de Toluca y sus implicaciones en la optimización de estrategias para la protección de la calidad del agua subterránea. Tesis de doctorado, Centro Interamericano de Recursos del Agua, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de México.
- Fagundo, J., Cima, A., & González, P. (2004).** Revisión bibliográfica sobre clasificación de las aguas minerales y mineromedicinales. Disponible en: http://www.sld.cu/galerias/pdf/sitios/rehabilitacionbal/clasificacion_aguas_minerales.pdf
- FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations (2015).** World reference base for soil resources 2014 International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. Update 2015. ISBN 978-92-5-308369-5. Web site: <http://www.fao.org>
- FEA. Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental, & CEMDA. Centro Mexicano de Derecho Ambiental. (2006).** El agua en México: Lo que todas y todos debemos saber: Medio Ambiente y Desarrollo: hacia un manejo sustentable del agua, 1, 21–22. Disponible en: <http://www.fusda.org/revista11pdf/Revista115ELAGUA ENMEXICO.pdf>
- Foster, S. S. D. Garduño, H., Kemper, K., Tuinhof, A., Nanni, M. & Dumars, C. (2006).** Protección de la Calidad del Agua Subterránea definición de estrategias y establecimiento de prioridades. Serie de notas informativas. Nota 8. WG-MATE. Banco Mundial, Washington D.C., EE. UU.
- Foster, S. S. D.; Hirata, R. (1988).** Groundwater pollution risk assessment: a methodology using available data. WHO-PAHO/HPECEPIS Technical Manual. Lima, Peru.
- Foster, S. S. D. Hirata, R., Daniel, G., D'Elia, M., & Paris, M. (2007).** Protección de la Calidad de Aguas Subterráneas. Guías para las empresas de agua, autoridades municipales y agencias ambientales. Banco Mundial. Washington, D.C., EE. UU.

- Galicia, L., Molina, N., Oropeza, A., Gaona, E., & Juárez, L. (2011).** Análisis de la concentración de fluoruro en agua potable de la delegación Tláhuac, Ciudad de México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 27 (4), 283-289.
- Hirata, R. (2002).** Carga contaminante y peligros a las aguas subterráneas. *Revista Latinoamericana de Hidrogeología*, (2), 81-90. <https://doi.org/10.5380/hg.v2i0.2624>
- Hounslow, A. (1995).** *Water Quality Date: Analysis and Interpretation*. Lewis Publishers. EE.UU. ISBN 0-87371-676-0.
- Huan, H., Xu, J., Wang, J., & Xi, B. (2018).** Groundwater Pollution Risk Control from an Industrial Economics Perspective: A Case Study on the Jilin Section of the Songhua River. Springer. ISBN 978-981-10-7706-7 <https://doi.org/10.1007/978-981-10-7706-7>
- Hurtado, R., & Gardea, J. (2006).** Arsenic in drinking water in the Los Altos de Jalisco region of Mexico. *Salud Pública de México*, 20 (4), 236-247
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2010).** Censo de población y vivienda para el año 2010. Disponible en: https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2010/default.html#Datos_abiertos
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2017).** Conjunto nacional de Datos Vectoriales de Uso de Suelo y Vegetación. Escala 1:250 000. Serie VI, edición: 1 (2016). Aguascalientes, México. Disponible en: http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadata/gis/usv250s6gw.xml?httpcache=yes&_xsl=/db/metadata/xsl/fgdc_html.xsl&indent=no
- IGME. Instituto Geológico y Minero de España. (2010).** *Manual de Geotermia*. España: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía IDAE., 187 p.
- Kania, J., Witzak, S., & Rózański, K. (2011).** Classification of groundwater quality based on variability of hydrogeochemical environment. In: *Climate Change and its Effects on Water Resources: NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security* 3, 247-257. DOI 10.1007/978-94-007-1143-3_27.
- Koh, DCh., Chae, G.T., Kang, B.-R., Koh, G.-W., Park, K.H. (2009).** Baseline geochemical characteristics of groundwater in the mountains of Jeju Island, South Korea: implications for degree of mineralization and nitrate contamination. *J. Hydrol.* 376, 81–93. <http://dx.doi.org/10.1016/j.j.hydrol.2009.07.016>.
- Lesser, J.M. (2016).** *Aplicación de Técnicas Isotópicas Valle de San Juan del Río, Querétaro*: 58 p.

- DOF. Diario Oficial de la federación. (2019).** Ley Federal de Derechos. Última reforma DOF. 09-12-2019. 174 p. México. Disponible en: http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/107_281219.pdf
- López, B., Ramos, J., Moran, J., Cardona, A., & Hernández, G. (2013).** Origen de la calidad del agua del acuífero colgado y su relación con los cambios de uso de suelo en el Valle de San Luis Potosí. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 65 (1), 9-26. <https://doi.org/10.18268/BSGM2013v65n1a2>
- Madrigal, H., Fonseca, A., & Reynolds, J. (2017).** Caracterización hidrogeoquímica de los acuíferos volcánicos Barva y Colima en el Valle Central de Costa Rica. *Tecnología y Ciencias del Agua*. 8 (1), 115-132.
- Manassaram, D., Backer, L., & Moll, D. (2006).** A review of nitrates in drinking water: Maternal exposure and adverse reproductive and developmental outcomes. *Environmental Health Perspectives*, 114 (3), 320–327. <https://doi.org/10.1289/ehp.8407>
- Marrero, R. (2010).** Modelo hidrogeoquímico del acuífero de las Cañadas del Teide, Tenerife, Islas Canarias. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Catalunya. Cap. 4, 102. Barcelona.
- MAV. Ingeniería Integral. (2012).** Caracterización del acuífero Valle de San Juan del Río. Querétaro. Segunda etapa: hidrogeoquímica y red de monitoreo. Reporte técnico, 133p. COTAS.SJR.001/2011.
- Medina, C. (2017).** Desarrollo de una Metodología para la Construcción de Modelos Conceptuales en Acuíferos de Alta Complejidad Hidrogeológica: caso de Estudio Acuífero del Valle de San Juan del Río. Tesis doctoral. Facultad de Ingeniería, Centro Interamericano de Recursos del Agua, Universidad Autónoma del Estado de México.
- Minatel, B., Sage, A., Anderson, C., Hubaux, R., Marshall, E., Lam, W., & Martínez, V. (2018).** Environmental arsenic exposure: From genetic susceptibility to pathogenesis. *Environnement International*, 112, 183–197. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.12.017>
- Montiel, S., Armienta, M., Rodríguez R., & Domínguez, E. (2014).** Identificación de zonas de contaminación por nitratos en el agua subterránea de la zona sur de la Cuenca de México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 30 (2), 149-165.
- Morales, I., Villanueva-Estrada, R., Rodríguez, R. Armienta M. (2015).** Geological, hydrogeological, and geothermal factors associated to the origin of arsenic, fluoride, and groundwater temperature in a volcanic environment “El Bajío Guanajuatense”, Mexico. *Environ Earth Sci* 74, 5403–5415 (2015). <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4554-9>

- Morales, J., Armienta, M., & Rodríguez, R. (2018).** Estimación de la exposición a elevados contenidos de fluoruro en agua potable en distintas comunidades de Guanajuato, México. *Tecnología y Ciencias del Agua* 9 (3), 156–179. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2018-03-07>
- NOM-127-SSA1-1994 (2005).** Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. Diario Oficial de la Federación (DOF) SSA-2005.
- OMS. Organización Mundial de la Salud. (2004).** Guías para la calidad del agua potable. Primer apéndice a la tercera edición, (1), 300, 330, 350. Disponible en: https://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3_es_full_lowres.pdf
- Ortega-Guerrero, M. (2009).** Presencia, distribución, hidrogeoquímica y origen de arsénico, fluoruro y otros elementos traza disueltos en agua subterránea, a escala de cuenca hidrológica tributaria de Lerma-Chapala, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 26 (1), 143–161.
- Othax, N., Peluso, F., & Gonzales, J. (2014).** Riesgo a la salud integrado por fluoruros, nitratos y arsénico en agua subterránea: caso del Partido de Tres Arroyos, Argentina. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 30 (1), 27–41.
- Pacheco, J., Pat, R., & Cabrera, A. (2002).** Análisis del ciclo del nitrógeno en el medio ambiente con relación al agua subterránea y su efecto en los seres vivos. *Ingeniería*, 6 (3), 73-81. <https://doi.org/10.1109/ICCSN.2011.6013626>
- Paredes, J. (2010).** Determinación del índice de vulnerabilidad de contaminación del Valle de Toluca mediante la adecuación del método SINTACS. Tesis de Maestría. Centro Interamericano de Recursos del Agua, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de México.
- Parkhurst, D., & Appelo, C. (2013).** Description of input and examples for PHREEQC version 3. A computer program for speciation, beach-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations: U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 6, chap. A43, 519 p. available only at <https://pubs.usgs.gov/tm/06/a43/>
- Pauwels, H., Lachassagne, P., Bordenave, P., Foucher, J., & Martelat, A. (2001).** Temporal variability of nitrate concentration in a schist aquifer and transfer to surface waters. *Applied Geochemistry*, 16, 583-596. [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(00\)00062-7](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(00)00062-7).
- Peinado-Guevara, H., Green-Ruiz, C., Herrera-Barrientos, J., Escolero-Fuentes, O., Delgado-Rodríguez, O., Belmonte-Jiménez, S., & Ladrón de Guevara, M. (2011).**

Calidad y aptitud de uso agrícola y doméstico del agua del acuífero del río Sinaloa, porción central. *Hidrobiológica*, 21 (1), 63-76.

Peña, S., Rosas, V., Pedraza, Y. (2014). Vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas en la ciudad de Yopal, *Casanare Scientia Et Technica*. 19 (1), 106-110. Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia. ISSN: 0122-1701. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=84930900016>

Pérez, C. (1998). Métodos estadísticos con Statgraphics para Windows: técnicas básicas. ISBN: 8478973052. Madrid. Ra-Ma: 705 p.

Salcedo, E., Garrido, S., Martínez, M., & Esteller, M. (2015). Evaluación de la Calidad del Agua Subterránea Mediante la Utilización del Índice CCME-WQI, en el Acuífero del Valle de Puebla. *Revista Latinoamericana el Ambiente y las Ciencias* 6 (12), 831-837.

Sankararamakrishnan, N., Sharma, A., & Iyengar, L. (2008). Contamination of nitrate and fluoride in ground water along the Ganges Alluvial Plain of Kanpur district, Uttar Pradesh, India. *Environmental Monitoring and Assessment*, (146), 375-382. <https://doi.org/10.1007/s10661-007-0085-5>.

SEDENA. Secretaria de la Defensa Nacional. (2015). Conjunto de datos vectoriales escala 1: 100 000 cubrimiento Nacional, hidrografía en líneas. Dirección General de Cartografía. Recuperado en abril de 2020 de <https://datos.gob.mx/busca/dataset/carta-general-de-la-republica-mexicana/resource/77015a9a-edce-4899-8563-864fd6ff1263>

SGM. Servicio Geológico Mexicano (2010). Caracterización Hidrogeológica de la porción no saturada del acuífero del Valle de San Juan del Río, estado de Querétaro.

USGS. United States Geological Survey (2020). Consult and download LANDSAT-8 image (december 10th, 2019). EarthExplorer U.S. Department of the Interior. Reston, Virginia. Disponible en: <https://earthexplorer.usgs.gov/>

Vélez, M. V., Otálvaro, D. L., & Navarro, L. F. (2014). Guía Metodológica para la formulación de planes de manejo ambiental de acuíferos. Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (88 p.) ISBN: 978-958-8491-83-7.

Vergara V., Gutiérrez G., & Flórez H. (2010). Evaluación de la vulnerabilidad del acuífero Morroa a contaminación por plaguicidas aplicando la metodología DRASTIC. Colombia. *Ingeniería y Desarrollo* No. 26, ISSN: 0122-3461. Disponible en: <http://rcientificas.uninorte.edu.co/index.php/ingenieria/article/view/740/403>

Vrba J., & Adams B. (2008). Groundwater Early Warning Monitoring Strategy: A Methodological Guide. UNESCO. Francia.

WHO. World Health Organization. (2004). Fluoride in Drinking-water. Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality. Disponible en: https://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/chemicals/fluorid.pdf

Winkel, L., Berg, M., Amini, M., Hug, S., & Johnson, A. (2008). Predicting groundwater arsenic contamination in Southeast Asia from surface parameters. *Nature Geoscience*, 1 (8), 536–542. <https://doi.org/10.1038/ngeo25>

ANEXOS

ANEXO A

Anexo A1. Datos generales de los pozos muestreados en junio y diciembre de 2019

No. Pozo	ID Muestra	No. COTAS	Nombre	Lugar	Municipio	Naturaleza del pozo	Uso de Agua	Volumen concesionado (m3/año)	Profundidad	Régimen de bombeo (horas)	Tiempo de bombeo	Altura del brocal(cm)	Observaciones
1	SJR-01	CSJR0082	Pozo 33 Granjas Banthi	Colonia Granjas Banthi	San Juan del Río	Sondeo	Abastecimiento	1153450	400	24	Diario	30	
2	SJR-02	CSJR0151	Pozo 03 Pedro Escobedo	Pedro Escobedo	Pedro Escobedo	Sondeo	Abastecimiento	124.6	250	22	Diario	28	
3	SJR-03	P0963SJ	Pozo 3-bis Quintanares	Quintanares	Pedro Escobedo	Sondeo	Abastecimiento	S/D	175	S/D	S/D	50	
4	SJR-04	CSJR0155	Pozo JAPAM 04 Jazmín	Comunidad El Jazmín	San Juan del Río	Sondeo	Abastecimiento	183000	240	12	Diario	0	
5	SJR-05	CSJR0163	Pozo A.P. La Rueda	Fraccionamiento La Rueda	San Juan del Río	Sondeo	Abastecimiento	137370	110	16	Diario	100	
6	SJR-06	CSJR0169	Pozo A.P. Pazo de Mata (Viejo)	Paso de Mata	San Juan del Río	Sondeo	Abastecimiento	263000	240	17	Diario	61	
7	SJR-07	CSJR0221	Pozo 01 Rancho El Rocío	Rancho el Rocío	Tequisquiapan	Sondeo	Riego y Agricultura	229740	152	1	Diario	S/D	
8	SJR-08	CSJR0256	Pozo Hotel Fiesta Americana Galindo	Hotel Fiesta Americana Galindo	San Juan del Río	Sondeo	Abastecimiento	11924	338	2	Diario	50	
9	SJR-09	CSJR0325	Pozo 04 Ejido Guadalupe Septien	Ejido Guadalupe Septien	Guadalupe Septien	Sondeo	Agrícola	846000	125	S/D	S/D	S/D	No se permite el acceso al pozo, y para muestrear solo se abrió una llave que se encuentra a 100mts del pozo.
10	SJR-10	CSJR0355	Pozo Poliducto S.A.	Grupo Durman Esquivel México	Pedro Escobedo	Sondeo	Uso Industrial	10047	200	2.5	Diario	53	
11	SJR-11	CSJR0438	Pozo Rancho El Profeta	Rancho el Profeta	Pedro Escobedo	Monitoreo	Agrícola	340000	150	S/D	Cada 4 o 5 días	54	
12	SJR-12	CSJR0617	Pozo A.P. El Blanco	Comunidad El Blanco	Colón	Sondeo	Abastecimiento	131400	200	10	Diario	43	
13	SJR-13	CSJR0620	Pozo A. P. Viborillas	Viborillas	Colón	Sondeo	Abastecimiento	35750	185	8	Diario	9	
14	SJR-14	CSJR0701	Pozo A. P. Cimatorio IV	Cimatorio	Huimilpan	Sondeo	Abastecimiento	11563	250	10	Diario	190	
15	SJR-15	PO728SJ	Pozo A.P. Cerro Prieto	Cerro Prieto	El Marqués	Sondeo	Abastecimiento	157680	250	10	Diario	12	
16	SJR-16	CSJR0726	Pozo A. P. Saldarriaga 03	Saldarriaga	La Marqués	Sondeo	Abastecimiento	S/D	350	24	Diario	40	
17	SJR-17	CSJR0764	Pozo A.P. Navajas	San José Navajas	El Marqués	Sondeo	Abastecimiento	87250	130	14	Diario	40	
18	SJR-18	CSJR0737	Pozo A. P. el colorado	El Colorado	El Marqués	Sondeo	Abastecimiento	286890	250	S/D	Diario	50	
19	SJR-19	CSJR0750	Pozo Rancho Exhacienda San Gerónimo	Rancho Exhacienda San Germán	San Juan del Río		Agrícola	840000	190	S/D	S/D	S/D	No se determinaron los parámetros físicos in situ debido a zona de peligro por delincuencia
20	SJR-20	CSJR0774	Pozo Alameda del Rincón	Alameda del Rincón	Amealco	Sondeo	Abastecimiento	42000	250	10	Diario	34	

Anexo A2. Reporte de resultados de datos químicos analizados en laboratorio. Junio 2019

No. Pozo	ID Muestras	Li mg/L	Be mg/L	Na mg/L	Mg mg/L	K mg/L	Ca mg/L	Al mg/L	As mg/L	B mg/L	Ba mg/L	Cd mg/L	Co mg/L	Cr mg/L	Cu mg/L	Fe mg/L	Mn mg/L	Mo mg/L	Ni mg/L
1	SJR-01	0.02	<l.c.	32.86	5.01	6.45	17.95	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.01	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.01	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.
2	SJR-02	0.03	<l.c.	34.84	5.70	8.64	21.24	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.03	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.01	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.
3	SJR-03	0.03	<l.c.	32.76	4.16	8.51	18.29	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.01	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.01	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.
4	SJR-04	0.03	<l.c.	31.71	8.02	8.40	20.13	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.01	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.01	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.
5	SJR-05	0.01	<l.c.	28.40	8.83	10.03	26.70	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.06	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.01	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.
6	SJR-06	0.05	<l.c.	63.49	15.49	8.35	29.36	<l.c.	0.02	<l.c.	0.02	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.02	0.01	<l.c.	<l.c.	<l.c.
7	SJR-07	0.22	<l.c.	65.02	1.42	5.07	19.55	<l.c.	0.04	<l.c.	<l.c.	0.00	<l.c.	<l.c.	0.01	0.02	0.00	<l.c.	<l.c.
8	SJR-08	0.04	<l.c.	52.33	7.59	12.39	23.05	<l.c.	<l.c.	0.01	0.01	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.01	0.01	<l.c.	<l.c.	<l.c.
9	SJR-09	0.04	<l.c.	41.16	6.73	10.34	28.84	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.01	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.01	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.
10	SJR-10	0.08	<l.c.	54.65	6.72	12.08	35.33	<l.c.	<l.c.	0.01	0.05	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.01	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.
11	SJR-11	0.03	<l.c.	37.66	7.79	9.20	20.96	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.01	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.01	0.01	<l.c.	<l.c.	<l.c.
12	SJR-12	0.04	<l.c.	45.67	5.80	15.81	26.11	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.01	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.01	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.
13	SJR-13	0.03	<l.c.	39.96	6.26	9.28	19.47	<l.c.	<l.c.	0.01	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.01	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.
14	SJR-14	0.02	<l.c.	39.85	13.21	5.81	20.93	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.01	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.01	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.
15	SJR-15	0.10	<l.c.	71.13	1.64	1.35	7.21	<l.c.	0.10	0.91	<l.c.	0.00	<l.c.	<l.c.	0.01	<l.c.	<l.c.	0.01	<l.c.
16	SJR-16	0.23	<l.c.	89.92	2.19	2.11	9.76	<l.c.	0.07	1.07	<l.c.	0.00	<l.c.	<l.c.	0.01	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.
17	SJR-17	0.08	<l.c.	47.49	0.56	2.11	8.23	<l.c.	0.03	0.06	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.01	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.
18	SJR-18	0.03	<l.c.	34.27	7.06	8.20	20.86	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.01	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.01	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.
19	SJR-19	0.02	<l.c.	27.07	5.02	7.66	18.84	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.04	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.01	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.
20	SJR-20	0.01	<l.c.	6.73	0.95	5.60	2.55	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.03	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.01	0.09	0.00	<l.c.	<l.c.
	I.d.	0.00	0.00	0.03	0.00	0.12	0.03	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	I.c.	0.00	0.00	0.10	0.01	0.40	0.11	0.03	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01

Nota: I.d.- límite de detección; I.c.- límite de cuantificación

Anexo A2. Reporte de resultados de datos químicos analizados en laboratorio. Junio 2019 (continuación)

No. Pozo	ID Muestras	P mg/L	Pb mg/L	Sb mg/L	Se mg/L	Si mg/L	Sn mg/L	Sr mg/L	Tl mg/L	V mg/L	Zn mg/L	S mg/L	Bi mg/L
1	SJR-01	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	37.62	<l.c.	0.11	<l.c.	0.05	<l.c.	2.32	<l.c.
2	SJR-02	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	40.27	<l.c.	0.16	<l.c.	0.05	0.01	4.18	<l.c.
3	SJR-03	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	41.71	<l.c.	0.10	<l.c.	0.05	0.01	1.85	<l.c.
4	SJR-04	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	40.32	<l.c.	0.11	<l.c.	0.07	<l.c.	2.52	<l.c.
5	SJR-05	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	45.81	<l.c.	0.23	<l.c.	0.04	0.01	4.26	<l.c.
6	SJR-06	<l.c.	0.01	<l.c.	<l.c.	30.84	<l.c.	0.36	<l.c.	0.05	0.06	2.63	<l.c.
7	SJR-07	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	27.80	<l.c.	0.01	<l.c.	0.02	0.01	9.25	<l.c.
8	SJR-08	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	42.70	<l.c.	0.14	<l.c.	0.06	0.01	3.69	<l.c.
9	SJR-09	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	40.10	<l.c.	0.18	<l.c.	0.05	0.01	9.01	<l.c.
10	SJR-10	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	41.88	<l.c.	0.27	<l.c.	0.05	0.06	16.42	<l.c.
11	SJR-11	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	42.28	<l.c.	0.12	<l.c.	0.06	0.01	4.78	<l.c.
12	SJR-12	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	45.65	<l.c.	0.17	<l.c.	0.04	0.04	6.57	<l.c.
13	SJR-13	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	22.83	<l.c.	0.12	<l.c.	0.05	0.01	16.20	<l.c.
14	SJR-14	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	29.36	<l.c.	0.26	<l.c.	0.05	0.01	4.52	<l.c.
15	SJR-15	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	21.12	<l.c.	0.05	<l.c.	0.04	0.01	9.48	<l.c.
16	SJR-16	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	23.73	<l.c.	0.04	<l.c.	0.03	0.03	7.46	<l.c.
17	SJR-17	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	19.12	<l.c.	0.03	<l.c.	0.02	0.04	7.52	<l.c.
18	SJR-18	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	32.01	<l.c.	0.14	<l.c.	0.04	0.01	7.02	<l.c.
19	SJR-19	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	32.09	<l.c.	0.15	<l.c.	0.04	0.01	1.50	<l.c.
20	SJR-20	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	33.19	<l.c.	0.02	<l.c.	0.02	0.02	2.38	<l.c.
	I.d.	0.01	0.00	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00	0.03	0.00	0.00	0.02	0.00
	I.c.	0.04	0.01	0.02	0.05	0.04	0.02	0.00	0.11	0.01	0.01	0.06	0.01

Nota: I.d.- límite de detección; I.c.- límite de cuantificación

Anexo A3. Reporte de resultados de los datos químicos analizados en laboratorio. Diciembre 2019

No. Pozo	ID Muestras	Na	Mg	K	Ca	S	Bi	Li	Be	Al	As	B	Ba	Cd	Co	Cr
		mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
1	SJR-01	31.50	4.76	7.37	15.89	2.17	<l.c.	0.02	<l.c.	0.01	<l.c.	<l.c.	0.01	<l.c.	<l.c.	<l.c.
2	SJR-02	37.87	6.06	10.56	21.96	3.57	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.07	<l.c.	<l.c.	0.03	<l.c.	<l.c.	<l.c.
3	SJR-03	35.22	4.30	10.18	18.78	1.69	<l.c.	0.03	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.01	<l.c.	<l.c.	<l.c.
4	SJR-04	28.17	6.88	8.43	16.40	2.42	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.01	<l.c.	<l.c.	<l.c.
5	SJR-05	29.41	10.22	12.24	27.16	5.08	<l.c.	0.03	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.07	<l.c.	<l.c.	<l.c.
6	SJR-06	63.71	14.39	9.37	26.09	2.08	<l.c.	0.04	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.02	<l.c.	<l.c.	<l.c.
7	SJR-07	68.53	1.42	6.65	19.36	7.52	<l.c.	0.15	<l.c.	0.01	0.04	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.
8	SJR-08	48.92	6.31	12.27	19.24	3.11	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.01	<l.c.	0.03	0.01	<l.c.	<l.c.	<l.c.
9	SJR-09	39.50	6.20	10.96	26.10	7.65	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.01	<l.c.	<l.c.	<l.c.
10	SJR-10	53.43	6.15	12.66	30.68	12.08	<l.c.	0.07	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.02	0.04	<l.c.	<l.c.	<l.c.
11	SJR-11	38.73	7.42	10.48	19.69	3.60	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.00	<l.c.	<l.c.	<l.c.
12	SJR-12	49.52	5.96	17.48	26.09	5.92	<l.c.	0.07	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.01	<l.c.	<l.c.	<l.c.
13	SJR-13	56.80	10.96	16.88	34.14	24.01	<l.c.	0.07	<l.c.	0.01	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.
14	SJR-14	46.47	14.43	7.42	22.07	5.32	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.01	<l.c.	<l.c.	<l.c.
15	SJR-15	122.86	2.38	4.17	10.61	9.22	<l.c.	0.26	<l.c.	0.01	0.09	1.51	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.
16	SJR-16	100.80	2.98	3.79	11.48	10.95	<l.c.	0.12	<l.c.	0.01	0.12	1.10	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.
17	SJR-17	64.44	0.75	4.28	9.95	8.31	<l.c.	0.07	<l.c.	0.01	0.03	0.08	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.
18	SJR-18	50.23	9.46	12.71	28.19	8.53	<l.c.	0.03	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.01	<l.c.	<l.c.	<l.c.
19	SJR-19	36.92	6.25	10.95	22.90	1.74	<l.c.	0.06	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.04	<l.c.	<l.c.	<l.c.
20	SJR-20	8.46	1.10	8.03	2.98	2.95	<l.c.	<l.c.	<l.c.	1.35	<l.c.	<l.c.	0.04	<l.c.	<l.c.	<l.c.
	I.d.	0.06	0.00	0.30	0.07	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	I.c.	0.20	0.02	0.99	0.24	0.06	0.04	0.02	0.00	0.00	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00

Nota: I.d.- límite de detección; I.c.- límite de cuantificación

Anexo A3. Reporte de resultados de datos químicos analizados en laboratorio. Diciembre 2019 (continuación)

No. Pozo	ID Muestras	Cu mg/L	Fe mg/L	Mn mg/L	Mo mg/L	Ni mg/L	P mg/L	Pb mg/L	Sb mg/L	Se mg/L	Si mg/L	Sn mg/L	Sr mg/L	Tl mg/L	V mg/L	Zn mg/L
1	SJR-01	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.03	<l.c.	<l.c.	38.13	<l.c.	0.10	<l.c.	0.03	0.01
2	SJR-02	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.03	<l.c.	<l.c.	38.44	<l.c.	0.14	<l.c.	0.03	0.05
3	SJR-03	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.02	<l.c.	<l.c.	38.47	<l.c.	0.09	<l.c.	0.03	0.01
4	SJR-04	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.03	<l.c.	<l.c.	41.56	<l.c.	0.10	<l.c.	0.05	0.05
5	SJR-05	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.03	<l.c.	<l.c.	44.52	<l.c.	0.26	<l.c.	0.02	0.01
6	SJR-06	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.02	<l.c.	<l.c.	27.06	<l.c.	0.28	<l.c.	0.02	0.03
7	SJR-07	<l.c.	0.01	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.02	<l.c.	<l.c.	24.28	<l.c.	0.01	<l.c.	<l.c.	0.01
8	SJR-08	0.01	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.03	<l.c.	<l.c.	39.30	<l.c.	0.11	<l.c.	0.04	0.05
9	SJR-09	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.03	<l.c.	<l.c.	36.92	<l.c.	0.15	<l.c.	0.02	0.06
10	SJR-10	<l.c.	<l.c.	0.00	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.03	<l.c.	<l.c.	38.06	<l.c.	0.21	<l.c.	0.02	0.06
11	SJR-11	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.03	<l.c.	<l.c.	36.83	<l.c.	0.09	<l.c.	0.03	0.02
12	SJR-12	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.03	<l.c.	<l.c.	43.78	<l.c.	0.15	<l.c.	0.02	0.05
13	SJR-13	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.02	<l.c.	<l.c.	32.42	<l.c.	0.20	<l.c.	0.02	0.07
14	SJR-14	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.02	<l.c.	<l.c.	36.26	<l.c.	0.30	<l.c.	0.04	0.02
15	SJR-15	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.02	<l.c.	<l.c.	30.44	<l.c.	0.04	<l.c.	0.01	0.07
16	SJR-16	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.02	<l.c.	<l.c.	25.48	<l.c.	0.07	<l.c.	0.02	0.01
17	SJR-17	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.02	<l.c.	<l.c.	22.34	<l.c.	0.03	<l.c.	0.00	0.03
18	SJR-18	<l.c.	0.01	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.03	<l.c.	<l.c.	38.34	<l.c.	0.16	<l.c.	0.03	0.02
19	SJR-19	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.03	<l.c.	<l.c.	39.21	<l.c.	0.17	<l.c.	0.02	0.04
20	SJR-20	<l.c.	0.48	0.00	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.03	<l.c.	<l.c.	44.90	<l.c.	0.03	<l.c.	<l.c.	0.24
	I.d.	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00
	I.c.	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.04	0.01	0.02	0.03	0.01	0.01	0.00	0.08	0.00	0.01

Nota: I.d.- límite de detección; I.c.- límite de cuantificación

ANEXO B

Anexo B1. Resultados de parámetros in situ determinados en el acuífero San Juan del Río. Diciembre 2011

Muestras de Agua	No. COTAS	Nombre	pH	CE	T° agua	STD
				μS/cm	° C	Mg/L
1	CSJR0082	Pozo 33 Granjas Banthi (JAPAM)	7.9	253	34.6	131
2	CSJR0151	Pozo 03 Pedro Escobedo (CEA)	7.8	247	28.4	127
3	CSJR0152	Pozo CEA El Sauz	7.33	306	24.7	159
4	CSJR0155	Pozo JAPAM 04 Jazmín	7.9	277	32.7	144
5	CSJR0163	Pozo A.P. La Rueda	7.43	194	27.1	100
6	CSJR0169	Pozo A.P. Paso de Mata (Viejo)	7.8	464	21.6	241
7	CSJR0221	Pozo 01 Rancho El Rocío	7.7	277	35.4	144
8	CSJR0256	Pozo Hotel Fiesta Americana Galindo	7.49	404	30.1	204
9	CSJR0325	Pozo 04 Ejido Guadalupe Septién	7.94	367	30.6	190
10	CSJR0355	Pozo Poliducto S.A.	7.3	567	27.6	294
11	CSJR0379	Pozo Granjas El Huesito Grupo Abrego	7.9	350	26.8	181
12	CSJR0438	Pozo Rancho El Profeta	7.9	320	30.3	165
13	CSJR0617	Pozo A.P. El Blanco 2 (CEA)	8.2	374	26.8	194
14	CSJR0620	Pozo A.P. Viborillas (CEA)	7.8	467	25.4	242
15	CSJR0701	Pozo A.P. Cimatarío IV (CEA)	7.8	461	29.6	238
16	CSJR0726	Pozo A.P. Saldarriaga 03 (CEA)	8.8	476	36.1	248
17	CSJR0734	Pozo A.P. Navajas (CEA)	8.3	323	31.5	167
18	CSJR0737	Pozo A.P. El Colorado (CEA)	7.9	405	29.5	208
19	CSJR0750	Pozo Rancho Ex Hacienda San Germán	7.8	320	26.3	166
20	CSJR0774	Pozo Alameda del Rincón (CEA)	6.5	81	21.9	42

Anexo B2. Resultados de los análisis químicos realizados en laboratorio. Acuífero Valle de San Juan del Río. Diciembre 2011

Muestras de Agua	No. COTAS	Nombre	Ca	Mg	K	Na	HCO3	Cl	F	SO42	NO3	Al
			mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
1	CSJR0082	Pozo 33 Granjas Banthi (JAPAM)	21.29	6.07	7.069	31.89	103.16	2.794	0.389	6.121	7.762	0.018
2	CSJR0151	Pozo 03 Pedro Escobedo (CEA)	31.31	7.555	9.431	30.69	88.426	5.155	0.366	7.289	18.967	0.007
3	CSJR0152	Pozo CEA El Sauz	21.97	8.201	9.26	29.97	99.479	2.35	0.406	6.785	11.465	0.004
4	CSJR0155	Pozo JAPAM 04 Jazmín	30.06	10.14	12.3	29.92	95.794	10.941	0.335	21.387	23.878	0.01
5	CSJR0163	Pozo A.P. La Rueda	29.12	12.56	9.122	61.43	180.54	4.167	0.734	6.502	12.72	0.01
6	CSJR0169	Pozo A.P. Paso de Mata (Viejo)	13.35	1.121	3.811	49.96	92.11	5.313	3.34	28.279	3.532	0.006
7	CSJR0221	Pozo 01 Rancho El Rocío	28.23	8.758	13.49	46.82	125.27	12.482	0.525	10.229	46.995	0.009
8	CSJR0256	Pozo Hotel Fiesta Americana Galindo	31.76	7.082	11.53	38.5	117.9	14.762	0.371	24.839	22.442	0.009
9	CSJR0325	Pozo 04 Ejido Guadalupe Septién	53.4	9.453	15.63	62.34	106.85	48.956	0.429	74.435	17.905	0.012
10	CSJR0355	Pozo Poliducto S.A.	29.87	9.679	12.74	35.91	125.27	5.299	0.659	11.124	13.912	0.009
11	CSJR0379	Pozo Granjas El Huesito Grupo Abrego	26.79	8.195	10.23	35.09	77.372	4.962	0.362	18.413	9.234	0.025
12	CSJR0438	Pozo Rancho El Profeta	20.71	4.79	7.658	27.18	92.11	2.744	0.425	3.828	7.792	0.01
13	CSJR0617	Pozo A.P. El Blanco 2 (CEA)	28.93	5.809	19.52	48.31	117.9	6.818	0.607	21.448	25.376	0.01
14	CSJR0620	Pozo A.P. Viborillas (CEA)	33.34	8.942	15.67	50.23	84.741	46.19	0.516	48.767	15.695	0.005
15	CSJR0701	Pozo A.P. Cimatarío IV (CEA)	30.72	13.8	7.738	47.26	169.48	4.769	0.515	16.144	13.931	0.006
16	CSJR0726	Pozo A.P. Saldarriaga 03 (CEA)	10.39	2.62	1.329	86.25	77.372	65.988	6.046	37.513	17.262	0.012
17	CSJR0734	Pozo A.P. Navajas (CEA)	11.54	0.96	2.341	55.03	106.85	11.633	2.909	27.384	7.171	0.01
18	CSJR0737	Pozo A.P. El Colorado (CEA)	29.02	8.4	10.52	39.81	117.9	11.718	0.387	23.633	51.742	0.004
19	CSJR0750	Pozo Rancho Ex Hacienda San Germán	29.14	6.859	11.14	30.84	117.9	3.085	0.404	5.607	12.973	0.005
20	CSJR0774	Pozo Alameda del Rincón (CEA)	3.488	1.268	7.431	7.661	18.422	2.552	0.192	8.645	3.76	0.067

Nota: l.c.- límite de cuantificación

Anexo B2. Resultados de los análisis químicos realizados en laboratorio. Acuífero Valle de San Juan del Río. Diciembre 2011 (continuación)

Muestras de agua	No. COTAS	Nombre	As mg/L	B mg/L	Ba mg/L	Be mg/L	Bi mg/L	Hg mg/L	Li mg/L	Mn mg/L	Mo mg/L	Pb mg/L
1	CSJR0082	Pozo 33 Granjas Banthi (JAPAM)	<l.c.	0.021	0.006	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.003	<l.c.	<l.c.
2	CSJR0151	Pozo 03 Pedro Escobedo (CEA)	<l.c.	0.013	0.065	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.011	<l.c.	<l.c.
3	CSJR0152	Pozo CEA El Sauz	<l.c.	0.014	0.005	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.003	<l.c.	<l.c.
4	CSJR0155	Pozo JAPAM 04 Jazmín	<l.c.	0.011	0.057	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.005	<l.c.	<l.c.
5	CSJR0163	Pozo A.P. La Rueda	0.02	0.023	0.019	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.002	<l.c.	<l.c.
6	CSJR0169	Pozo A.P. Paso de Mata (Viejo)	0.05	0.043	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.106	0.003	<l.c.	<l.c.
7	CSJR0221	Pozo 01 Rancho El Rocío	<l.c.	0.054	0.013	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.001	<l.c.	<l.c.
8	CSJR0256	Pozo Hotel Fiesta Americana Galindo	<l.c.	0.017	0.014	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.002	<l.c.	<l.c.
9	CSJR0325	Pozo 04 Ejido Guadalupe Septién	<l.c.	0.072	0.07	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.069	0.013	<l.c.	<l.c.
10	CSJR0355	Pozo Poliducto S.A.	<l.c.	0.03	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.002	<l.c.	<l.c.
11	CSJR0379	Pozo Granjas El Huesito Grupo Abrego	<l.c.	0.016	0.016	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.024	<l.c.	<l.c.
12	CSJR0438	Pozo Rancho El Profeta	<l.c.	0.018	0.008	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.002	<l.c.	<l.c.
13	CSJR0617	Pozo A.P. El Blanco 2 (CEA)	0.01	0.032	0.005	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.002	<l.c.	<l.c.
14	CSJR0620	Pozo A.P. Viborillas (CEA)	<l.c.	0.039	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.004	<l.c.	<l.c.
15	CSJR0701	Pozo A.P. Cimatarío IV (CEA)	<l.c.	<l.c.	0.006	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.002	<l.c.	<l.c.
16	CSJR0726	Pozo A.P. Saldarriaga 03 (CEA)	0.11	1.059	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.07	0.002	0.006	<l.c.
17	CSJR0734	Pozo A.P. Navajas (CEA)	0.03	0.1	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.002	<l.c.	<l.c.
18	CSJR0737	Pozo A.P. El Colorado (CEA)	<l.c.	0.02	0.007	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.001	<l.c.	<l.c.
19	CSJR0750	Pozo Rancho Ex Hacienda San Germán	<l.c.	0.014	0.057	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.001	<l.c.	<l.c.
20	CSJR0774	Pozo Alameda del Rincón (CEA)	<l.c.	<l.c.	0.026	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.003	<l.c.	<l.c.

Nota: l.c.- límite de cuantificación

Anexo B2. Resultados de los análisis químicos realizados en laboratorio. Acuífero Valle de San Juan del Río. Diciembre 2011 (continuación)

Muestras de Agua	No. COTAS	Nombre	PO4	S	Sb	Se	Si	Sr	Zn	Ni	NO2
			mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
1	CSJR0082	Pozo 33 Granjas Banthi (JAPAM)	<l.c.	2.924	<l.c.	<l.c.	39.26	0.107	0.033	<l.c.	<l.c.
2	CSJR0151	Pozo 03 Pedro Escobedo (CEA)	<l.c.	3.004	<l.c.	<l.c.	39.63	0.23	0.019	<l.c.	<l.c.
3	CSJR0152	Pozo CEA El Sauz	<l.c.	2.841	<l.c.	<l.c.	40.11	0.107	0.007	<l.c.	<l.c.
4	CSJR0155	Pozo JAPAM 04 Jazmín	<l.c.	7.797	<l.c.	<l.c.	44.19	0.3	0.013	<l.c.	<l.c.
5	CSJR0163	Pozo A.P. La Rueda	<l.c.	2.38	<l.c.	<l.c.	27.6	0.325	0.021	<l.c.	<l.c.
6	CSJR0169	Pozo A.P. Paso de Mata (Viejo)	<l.c.	10.45	<l.c.	<l.c.	26.94	0.008	0.007	<l.c.	<l.c.
7	CSJR0221	Pozo 01 Rancho El Rocío	<l.c.	3.989	<l.c.	<l.c.	39.74	0.146	0.01	<l.c.	<l.c.
8	CSJR0256	Pozo Hotel Fiesta Americana Galindo	<l.c.	9.112	<l.c.	<l.c.	38.2	0.17	0.015	<l.c.	<l.c.
9	CSJR0325	Pozo 04 Ejido Guadalupe Septién	<l.c.	29.64	<l.c.	<l.c.	39.55	0.378	0.018	<l.c.	<l.c.
10	CSJR0355	Pozo Poliducto S.A.	<l.c.	4.534	<l.c.	<l.c.	37.45	0.187	0.051	<l.c.	<l.c.
11	CSJR0379	Pozo Granjas El Huesito Grupo Abrego	<l.c.	7.704	<l.c.	<l.c.	40.75	0.123	0.042	<l.c.	<l.c.
12	CSJR0438	Pozo Rancho El Profeta	<l.c.	1.77	<l.c.	<l.c.	42.21	0.087	0.016	<l.c.	<l.c.
13	CSJR0617	Pozo A.P. El Blanco 2 (CEA)	<l.c.	8.845	<l.c.	<l.c.	42.23	0.172	0.004	<l.c.	<l.c.
14	CSJR0620	Pozo A.P. Viborillas (CEA)	<l.c.	19.28	<l.c.	<l.c.	28.24	0.18	0.003	<l.c.	<l.c.
15	CSJR0701	Pozo A.P. Cimatario IV (CEA)	<l.c.	6.147	<l.c.	<l.c.	33.23	0.329	0.007	<l.c.	<l.c.
16	CSJR0726	Pozo A.P. Saldarriaga 03 (CEA)	<l.c.	13.37	<l.c.	<l.c.	23.52	0.062	<l.c.	<l.c.	<l.c.
17	CSJR0734	Pozo A.P. Navajas (CEA)	<l.c.	9.757	<l.c.	<l.c.	20.97	0.032	<l.c.	<l.c.	<l.c.
18	CSJR0737	Pozo A.P. El Colorado (CEA)	<l.c.	8.449	<l.c.	<l.c.	35.55	0.171	<l.c.	<l.c.	<l.c.
19	CSJR0750	Pozo Rancho Ex Hacienda San Germán	<l.c.	2.199	<l.c.	<l.c.	36.66	0.224	0.003	<l.c.	<l.c.
20	CSJR0774	Pozo Alameda del Rincón (CEA)	<l.c.	3.24	<l.c.	<l.c.	36.06	0.027	0.014	<l.c.	<l.c.

Nota: l.c.- límite de cuantificación

Anexo C

Anexo C1. Columna estratigráfica del acuífero Valle San Juan del Río (Fuente, SGM, 2010)

