

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA

FACULTAD DE INGENIERÍA

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO



**ASPECTOS GEOLÓGICOS DEL ARSÉNICO Y SU EVOLUCIÓN EN
EL ACUÍFERO
MEOQUI-DELICIAS, CHIHUAHUA**

POR:

I.G RENÉ ALEJANDRO BAEZA GALVÁN

**TESIS PRESENTADA COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO
EN INGENIERÍA EN HIDROLOGÍA**

CHIHUAHUA, CHIH., MÉXICO

MARZO 2023



“Aspectos geológicos del arsénico y su evolución en el acuífero Meoqui-Delicias, Chihuahua”. Tesis presentada por Rene Alejandro Baeza Galván como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Ingeniería en Hidrología, ha sido aprobado y aceptado por:

M.I. Fabián Vinicio Hernández Martínez
Director de la Facultad de Ingeniería

Dr. Fernando Martínez Reyes
Secretario de Investigación y Posgrado

M.I Miguel Ángel González Núñez
Coordinador Académico

Dra. María Socorro Espino Valdez
Directora de Tesis

Mayo 2023

Fecha

COMITÉ
Dra. María Socorro Espino Valdés
M.I Rodrigo de la Garza Aguilar
Dr. Humberto Silva Hidalgo
Dra. Mélida Gutiérrez Quiroz



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

20 de abril de 2023.

ING. RENÉ ALEJANDRO BAEZA GALVÁN
Presente. -

En atención a su solicitud relativa al trabajo de tesis para obtener el grado de Maestro en Ingeniería en Hidrología, nos es grato transcribirle el tema aprobado por esta Dirección, propuesto y dirigido por la directora **Dra. María Socorro Espino Valdés** para que lo desarrolle como tesis, con el título **“ASPECTOS GEOLÓGICOS DEL ARSÉNICO Y SU EVOLUCIÓN EN EL ACUÍFERO”**.

Índice de Contenido

Dedicatoria

Agradecimientos

Resumen

Índice de Contenido

Índice de Tablas

Índice de Figuras

Capítulo 1: Generalidades

- 1.1 Introducción
- 1.2 Antecedentes
- 1.3 Justificación
- 1.4 Objetivos
- 1.5 Hipótesis

Capítulo 2: Marco teórico

- 2.1 Composición de las aguas subterráneas
- 2.2 Arsénico
- 2.3 Química del arsénico
- 2.4 Movilidad del arsénico
- 2.5 Efectos del arsénico en la salud
- 2.6 Problemática del arsénico en aguas subterráneas a nivel mundial
- 2.7 Normativa de agua potable



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

Capítulo 3: Área de estudio

- 3.1 Localización de la zona de estudio
- 3.2 Clima
- 3.3 Hidrología superficial
- 3.4 Geomorfología
- 3.5 Edafología
- 3.6 Geología
- 3.7 Hidrogeología
- 3.8 Calidad del agua

Capítulo 4: Metodología

- 4.1 Recopilación de información relativa al acuífero Meoqui-Delicias
- 4.2 Búsqueda de información relativa a los aspectos geológicos del arsénico
- 4.3 Muestreo de agua en pozos seleccionados
- 4.4 Realización de piezometría
- 4.5 Muestreo de rocas en zonas seleccionadas
- 4.6 Análisis de Laboratorio
- 4.7 Obtención de resultados
- 4.8 Análisis estadístico

Capítulo 5: Resultados y discusión

- 5.1 Resultados de parámetros de campo
- 5.2 Resultados de los análisis y evolución espacial del arsénico en el acuífero
- 5.3 Resultados y discusión de los análisis del muestreo de rocas en el acuífero
- 5.4 Análisis de la relación entre profundidad del nivel dinámico y las concentraciones de arsénico.
- 5.5 Comparación de la litología de los pozos con la concentración de arsénico en el agua
- 5.6 Análisis de tendencias en el tiempo de la concentración de arsénico en los pozos
- 5.7 Histogramas de frecuencia



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

Capítulo 6: Conclusiones y recomendaciones

Referencias

Curriculum Vitae

ATENTAMENTE

"naturam subiecit aliis"

EL DIRECTOR

**SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN
Y POSGRADO**

**M.I. FABIÁN VINICIO HERNÁNDEZ
MARTÍNEZ**

FACULTAD DE
INGENIERÍA
U.A.CH.



DR. FERNANDO MARTÍNEZ REYES

DIRECCIÓN

Dedicatoria

A mis padres, hermanas, tías y abuelos por su apoyo incondicional y ser mi motivación para seguir adelante.

Agradecimientos

A mi directora de Tesis, Dra. María Socorro Espino Valdés, mi más profundo agradecimiento por su apoyo, dirección, paciencia y amistad durante todo el trabajo de tesis, además de brindarme su experiencia y conocimiento que sin duda fueron fundamentales para lograr esta investigación.

A mis sinodales y revisores la Dra. Mélida Gutiérrez, el Dr. Humberto Silva y el M.I Rodrigo de la Garza por brindarme sus conocimientos y apoyo durante la investigación, y siempre muy presentes ante cualquier duda o aclaración.

A mi compañero de brigada Daniel Rodríguez, por su disposición y apoyo en la recolección de muestras y trabajo de campo.

A mi novia Natalia Soria por su apoyo, paciencia y comprensión durante todo el transcurso de la maestría.

A mis compañeros de maestría Fernanda Espino, Viridiana Izaguirre, Shugey Rodríguez por su apoyo y valiosa amistad.

A mi gran colega Carlos Castellanos por brindarme su amistad, conocimientos y compañerismo que fueron claves durante la maestría.

Por último, a mis maestros, y al coordinador de la maestría por brindarme las herramientas y conocimientos necesarios para tener este logro.

Resumen

El acuífero Meoqui-Delicias se encuentra ubicado en la parte centro-sur del estado de Chihuahua. A lo largo de los años, algunos pozos del acuífero han presentado concentraciones de arsénico por encima del límite permisible para agua potable. La Organización Mundial de la Salud establece que el consumo prolongado de arsénico ocasiona varias afectaciones a la salud, principalmente el desarrollo de cáncer, problemas en la piel, abortos, daños cognitivos en niños y el aumento de padecimientos como enfermedades cardiovasculares, diabetes entre otras. La principal fuente de intoxicación por arsénico es la ingesta de agua, por lo que un monitoreo constante de estas fuentes es de vital importancia para la salud pública.

Para realizar este estudio se tomaron y analizaron 40 muestras en pozos de agua potable en los que previamente fue detectada la presencia de arsénico, mismos que están distribuidos ampliamente por todo el acuífero. Los resultados se compararon con los registros históricos de estudios anteriores para hacer una correlación de la evolución del arsénico en el acuífero.

Con base a los resultados obtenidos se clasificaron las muestras en 3 categorías dependiendo de la tendencia que tuvo la concentración de arsénico respecto al tiempo en cada uno de los pozos. Se encontró que el 55 % de las muestras no presentan cambios significativos, mientras que algunos de los pozos mostraron una tendencia al alza. Éstos se encuentran en la parte norte del acuífero que corresponde a los municipios de Meoqui, Julimes y Rosales, en donde se concentran los materiales finos y arcillas provenientes de las sierras colindantes.

Basándose en las isolíneas de concentración se observó que zona con más problemas de arsénico persiste en la zona norte del acuífero, por lo que se analizaron cortes litológicos de varios de los pozos estudiados en búsqueda de alguna correlación entre los estratos de arenas y arcillas depositados en el valle con el contenido de arsénico en cada uno de los aprovechamientos.

El acuífero Meoqui-Delicias se encuentra ubicado en una zona compuesta por un valle delimitado por sierras de origen ígneo, principalmente tobas riolíticas de composición félsica. Se colectaron algunas muestras de roca en la Sierra Humboldt, al noreste de la zona más afectada del acuífero, las cuales al ser analizadas en el laboratorio presentaron niveles de arsénico por encima del promedio para las rocas ígneas.

Lo anterior sugiere que dichos afloramientos son fuentes importantes de arsénico que, al momento de ser intemperizados, transportan sedimentos que son depositados en la zona del valle donde forman lentes de arcilla, principalmente en la zona norte del acuífero donde se presentaron los valores más altos de dicho elemento.

Índice de Contenido

Dedicatoria	iv
Agradecimientos.....	v
Resumen	vi
Índice de Contenido.....	viii
Índice de Tablas	xi
Índice de Figuras	xii
Capítulo 1: Generalidades	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Antecedentes.....	3
1.3 Justificación	5
1.4 Objetivos.....	6
1.4.1 Objetivo General	6
1.4.2 Objetivos específicos	7
1.5 Hipótesis.....	7
Capítulo 2: Marco teórico	8
2.1 Composición de las aguas subterráneas	8
2.2 Arsénico	8
2.3 Química del arsénico.....	9
2.4 Movilidad del arsénico	10
2.5 Efectos del arsénico en la salud.....	11
2.5.1 Efectos en niños.....	13
2.6 Problemática del arsénico en aguas subterráneas a nivel mundial.....	13
2.7 Normativa de agua potable	16
Capítulo 3: Área de estudio.....	18

3.1 Localización de la zona de estudio	18
3.2 Clima	18
3.3 Hidrología superficial	21
3.4 Geomorfología	21
3.5 Edafología.....	23
3.6 Geología	23
3.6.1 Estratigrafía.....	25
3.6.2 Geología estructural.....	26
3.6.3 Geología del subsuelo	26
3.7 Hidrogeología	30
3.8 Calidad del agua	31
Capítulo 4: Metodología	33
4.1 Recopilación de información relativa al acuífero Meoqui-Delicias	33
4.2 Búsqueda de información relativa a los aspectos geológicos del arsénico	33
4.3 Muestreo de agua en pozos seleccionados	37
4.4 Realización de piezometría.....	38
4.5 Muestreo de rocas en zonas seleccionadas	39
4.6 Análisis de Laboratorio	40
4.7 Obtención de resultados	40
4.8 Análisis estadístico	41
Capítulo 5: Resultados y discusión	42
5.1 Resultados de parámetros de campo	42
5.2 Resultados de los análisis y evolución espacial del arsénico en el acuífero	44
5.3 Resultados y discusión de los análisis del muestreo de rocas en el acuífero	52
5.4 Análisis de la relación entre profundidad del nivel dinámico y las concentraciones de arsénico.....	58

5.5 Comparación de la litología de los pozos con la concentración de arsénico en el agua	59
5.6 Análisis de tendencias en el tiempo de la concentración de arsénico en los pozos	69
5.7 Histogramas de frecuencia	74
Capítulo 6: Conclusiones y recomendaciones	77
Referencias	79
Anexo 1	83
Anexo 2	84
Anexo 3	85
Anexo 4	88
Curriculum Vitae	95

Índice de Tablas

Tabla 1. Lista de pozos muestreados	34
Tabla 2. Resultados de parámetros de campo del muestreo 2020-2021	43
Tabla 3. Resultados de análisis de muestras de roca para arsénico	53
Tabla 4. Pozos seleccionados para el análisis comparativo de contenido de arenas y arcillas (espesor) con la concentración de arsénico en el agua	60
Tabla 5. Resultados del análisis de tendencia de cada pozo	70

Índice de Figuras

Figura 1 Hiperqueratosis, Kumar (2008).....	12
Figura 2 Cáncer de piel debido a la ingesta de Arsénico, Lillo (2008)	13
Figura 3 Distribución de acuíferos con problemas de arsénico (Smedley y Kiniburgh, 2002)	14
Figura 4 Áreas con presencia de arsénico en las aguas subterráneas en México (Cortés, 2011)	15
Figura 5 Mapa de ubicación del acuífero Meoqui-Delicias. (Elaboración propia)	19
Figura 6 Mapa de climas en el acuífero Meoqui-Delicias. Elaborado a partir de información de INEGI.	20
Figura 7 Hidrología superficial. (Elaboración propia).....	22
Figura 8 Mapa de Edafología, generado a partir de información del INEGI	24
Figura 9. Mapa de geología (elaborado a partir de las cartas geológicas H13-11 y G13-2 del SGM)	28
Figura 10. Columna Geológica. Carta H13	29
Figura 11. Corte litológico provisto por la JCAS, correspondiente a la Col. 10 de mayo, Meoqui.	34
Figura 12. Ubicación de pozos muestreados	36
Figura 13. Sonda multiparamétricas HANNA HI 9828.....	37
Figura 14. Realización de piezometría.	38
Figura 15. Punto de muestreo de rocas.	39
Figura 16. Muestra número 1.....	40
Figura 17. Isoconcentraciones de arsénico para el año 2003.....	46
Figura 18. Isoconcentraciones de arsénico para el año 2006.....	48
Figura 19. Isoconcentraciones de arsénico para el año 2021.....	51
Figura 20. Ubicación del punto para muestreo de roca	54
Figura 21. Muestra numero 1.....	55
Figura 22. Muestra numero 5.....	55
Figura 23. Petrografía de lámina delgada de la muestra 3(1)	56
Figura 24. Petrografía de lámina delgada de la muestra 3(2)	56
Figura 25. Petrografía de lámina delgada de la muestra 3(3)	57
Figura 26. Grafica de dispersión de ND vs concentración de As.....	58
Figura 27. Ubicación de pozos seleccionados para el análisis litológico.	61
Figura 28. Perfil litológico del pozo de La Regina.....	63
Figura 29. Perfil litológico del pozo de Potrero de Llano.	64
Figura 30. Perfil litológico del pozo de Colonia Santa Fe.....	65
Figura 31. Grafica de espesor de arcillas vs concentración de arsénico.....	66
Figura 32. Grafica de espesor de arenas vs concentración de arsénico.	66
Figura 33. Comportamiento de la erosión y depositación de material.	68
Figura 34. Comportamiento de la erosión y depositación de material (CONAGUA, 2020).....	69
Figura 35. Clasificación de muestra por análisis de tendencia.....	73
Figura 36. Histograma de frecuencia 2003.....	74
Figura 37. Histograma de frecuencias 2006.	75
Figura 38. Histograma de frecuencias 2021.	75



Capítulo 1: Generalidades

1.1 Introducción

Debido a la creciente demanda del recurso hídrico en los últimos años los temas referentes al agua se perciben con mayor relevancia, ya que ésta es fundamental para la permanencia y continuidad de los distintos sectores como son el agrícola, que es el principal consumidor del recurso, seguido por el industrial y en última instancia el doméstico.

Más del 97 % del agua del planeta se encuentra en los océanos, pero al tener un alto contenido de sal, no es viable usarla para el consumo humano, por lo que el 3% que resta corresponde al agua dulce, y se encuentra distribuida en los casquetes polares, en fuentes subterráneas y en menor porcentaje en el agua superficial. Por lo anterior, no toda el agua dulce es accesible a los grupos humanos, aunque la principal fuente para consumo corresponde a la proveniente del subsuelo.

Debido al aumento de la población y a la incorporación de nuevos materiales en prácticamente todas las actividades humanas, es frecuente el uso insostenible del recurso hídrico; por eso la extracción intensiva y extensiva del agua subterránea está provocando que los niveles freáticos se encuentren en condiciones alarmantes.

Adicionalmente, la contaminación causada por el ser humano ha reducido los volúmenes de agua dulce disponible a nivel global. Con relación a esto, la Organización Mundial de la Salud [OMS] estima que cerca de 220 millones de personas se ven afectadas por enfermedades causadas por el consumo de agua contaminada y no apta para uso potable, por lo que para el 2025 la mitad de la población vivirá en zonas con estrés hídrico (OMS, 2021).

Por lo anterior se han establecido normas para el agua suministrada para consumo humano y el posterior monitoreo de su calidad, tanto si procede de fuentes subterráneas como superficiales, entre las que destacan aquellos elementos o parámetros con efectos tóxicos,



cancerígenos y mutágenos. Un elemento importante por sus efectos en la salud es el arsénico (As) debido a su alta solubilidad y abundancia en el medio geológico, lo cual facilita su distribución y alto contenido en las aguas subterráneas. La OMS (2021) establece que la exposición prolongada al arsénico debido al consumo de agua contaminada, o debido a la ingesta de alimentos preparados o cultivados con la misma, puede llegar a causar intoxicación crónica y algunos efectos más severos, como lesiones en la piel que pueden llegar a convertirse en cáncer.

Se tienen indicios de que al usar agua contaminada con arsénico para riego agrícola se ocasiona la acumulación de dicho elemento en los suelos, lo que repercute en las cosechas y plantas comestibles al estar en constante contacto con el suelo y el agua que las contiene (Hermosillo et al., 2018).

El origen del arsénico en las aguas subterráneas se asocia a varios factores; uno de ellos es el ambiente en el que se encuentran los acuíferos, como son los ambientes áridos y oxidantes, en donde el arsénico es liberado de los sulfuros y los sedimentos de vidrio volcánico (Smedley y Kinniburgh, 2002; Nicolli et al., 2012; Murray et al., 2016) y una vez como ion libre, se adsorbe fuertemente a óxidos de hierro, arcillas y material orgánico. Además de las principales condiciones de movilidad del arsénico (oxidantes y reductoras), se ha encontrado que las concentraciones de arsénico son mayores en cuencas cerradas, regiones con actividad geotermal y, en algunos casos, en distritos mineros donde los minerales sulfurosos de los desechos se oxidaron, ocasionando la lixiviación del arsénico en el suelo y las aguas subterráneas (Welch et al., 2000; Smedley y Kinniburgh, 2002; Biswas et al., 2016; Murray et al., 2016).

La presencia de arsénico en el agua subterránea está ampliamente documentada en muchos lugares del mundo (Smedley y Kinniburgh, 2002) En México se tiene noticia de presencia de arsénico en el agua de consumo, donde se han identificado tres ambientes hidrogeológicos asociados al mismo. Estos ambientes corresponden a los acuíferos aluviales en el centro y norte de México, áreas de actividad minera en el norte y centro de México, así



como también en aguas geotérmicas en el centro de México (Arreguin et al., 2011). Dentro del estado de Chihuahua, el arsénico se encuentra presente en muchas fuentes de agua subterránea en concentraciones por arriba del límite permisible para agua de consumo humano que establece la Modificación a la NOM-127-SSA1-1994. Entre los municipios más afectados se encuentran Jiménez, Villa Ahumada, Aldama, Julimes, Meoqui y Rosales, en los cuales se han detectado valores de hasta 0.4 mg/l (Gutiérrez et al., 2021); este valor corresponde a casi 20 veces el establecido en la norma para agua potable.

1.2 Antecedentes

Numerosas investigaciones realizadas en ambientes geológicos de origen volcánico han documentado la presencia de arsénico en el agua subterránea. En el estudio efectuado en el Condado de Orange, en Carolina del Norte, Dinwiddie y Ming Liu (2018) mencionan que la presencia de arsénico en las aguas subterráneas se debe a que al oxidarse los minerales sulfurosos que contienen arsénico lo liberan. Además, se piensa que esto podría estar relacionado con los incrementos en fluoruro, pH y alcalinidad de las aguas subterráneas.

Jakariya (2007), en estudio realizado en algunas localidades de Bangladesh, indica que la distribución del arsénico en las aguas subterráneas podría deberse a su liberación de los acuíferos de carácter aluvial debido a los mecanismos de reducción y disolución de óxidos e hidróxidos de hierro en los sedimentos. Además de la conocida procedencia del arsénico a partir de la oxidación de la pirita en las aguas subterráneas, se demostró que también estaba presente en ambientes reductores donde la pirita era estable. En tal caso, la movilización de As es causada principalmente debido a la disolución y reducción de óxidos e hidróxidos de Fe de donde el As se desorbe y no por la oxidación de la pirita (Jakariya, 2007).

Nicolli et al. (2012) analizaron la presencia de arsénico en el agua subterránea en la llanura pampeana del Chaco en Argentina, y observaron que dicho elemento se encontraba asociado al boro y al flúor en zonas volcánicas y de actividad geotermal; en estas zonas las



concentraciones de arsénico en el agua subterránea variaban desde 0.47 mg/l a 0.77 mg/l y de 0.050 mg/l a casi 9.9 mg/l en las fuentes geotermales. La principal fuente de arsénico y otros elementos traza mencionados anteriormente en las aguas subterráneas se debe a los sedimentos tipo *loess* del Cuaternario que fueron re TRABAJADOS por procesos eólicos y fluviales para después pasar a llenar la cuenca donde se encuentra la llanura; los principales sedimentos corresponden a arcillas limosas o limos arcillosos (Nicolli et al., 1989, 2010).

Rivera (2016) estudió la presencia de arsénico en la Comarca Lagunera, ubicada en el suroeste de Coahuila y noreste de Durango, en la república mexicana. El ambiente geológico de la Sierra Madre Oriental y la Sierra Madre Occidental se encuentra formado por rocas ígneas volcánicas del Cenozoico y rocas sedimentarias del Mesozoico. Las unidades predominantes en la zona de la Sierra Madre Oriental son las lutitas, calizas, yesos y areniscas, donde el yeso y las calizas contienen arsénico. Los muestreos realizados para el año 2015 por parte del Servicio Geológico Mexicano (SGM) en la región comprendida entre los estados de Coahuila y Durango arrojaron valores de entre 5 y 25 g/t de arsénico. En el caso de la Sierra Madre Occidental, donde predominan las rocas ígneas como basaltos, riolitas y andesitas, las cuales se asocian a yacimientos minerales en Durango y Chihuahua y se caracterizan por tener altos niveles de arsénico, los muestreos realizados por parte del SGM arrojaron valores de entre 10 y 600 g/t, los cuales aumentaron hasta 900 g/t en zonas mineralizadas (Rivera, 2016).

El acuífero Meoqui-Delicias es una de las principales fuentes de abastecimiento de agua en la zona comprendida parcialmente por los municipios de Rosales, Julimes, Saucillo, La Cruz, San Francisco de Conchos, así como casi en su totalidad los municipios de Delicias y Meoqui; éstos dependen del agua extraída para consumo de agua potable y otras actividades de la región (CONAGUA, 2020).

En estudios anteriores en el acuífero se han encontrado altos niveles de arsénico presente en algunas fuentes para el suministro de agua potable, como es el caso de los municipios de Julimes, Delicias, Rosales y Meoqui (Barrera, 2008; Espino-Valdés et al.,



2009; Rascón, 2011; Domínguez, 2013). Los niveles de este elemento superan en muchas fuentes al límite establecido en la Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, que es de 0.025 mg/l a partir del año 2005. Dicho valor límite será sustituido gradualmente hasta 0.01 mg/L de acuerdo a la NOM-127-SSA1-2021 que entrará en vigor con fecha 27 de abril de 2023.

En el estudio realizado por Barrera (2008) se estableció que en dicho acuífero, los valores de arsénico en el 72 % de un total de 96 muestras analizadas, excedían el límite permisible por la norma mexicana para agua destinada a consumo humano. El 18% superaba a los 0.100 mg/l, como es el caso de algunos pozos en Julimes cuyas concentraciones alcanzaron niveles de 0.376 mg/l, 0.316 mg/l y 0.277 mg/l. Aunque en todas las localidades afectadas por la presencia de arsénico se han implementado medidas para eliminar éste y otros elementos indeseables en el agua de consumo, mediante su tratamiento a través de membranas de ósmosis inversa, es importante contar con evidencias sobre su posible origen y la evolución en este acuífero.

Se estima que la presencia de arsénico en la zona está ligada a sus características geológicas, ya que el acuífero se alimenta de escurrimientos laterales de las zonas montañosas circundantes, las cuales están compuestas por formaciones de rocas ígneas como riolitas, basaltos y andesitas que se asocian a la arsenopirita, una de las principales fuentes de As en el ambiente; además, la sobreexplotación del acuífero puede ocasionar que estratos más profundos se disuelvan, situación que incrementaría las concentraciones de arsénico en el agua subterránea (Barrera, 2008).

1.3 Justificación

Contar con la mayor información posible sobre la presencia de arsénico en el acuífero Meoqui-Delicias es fundamental debido a la importancia económica y social que tiene el suministro de agua potable para la región. Además el acuífero coincide con la mayor parte



del distrito de riego DR-005, que es una zona de agricultura importante y depende en buena medida del suministro de agua subterránea para mantener sus actividades; por lo que si se irriga con agua que contiene arsénico, podría ocasionar que los cultivos y suelos regados con la misma se vieran afectados a largo plazo.

El origen del arsénico en el acuífero no se ha definido específicamente ya que en estudios previos (Barrera, 2008; Rascón, 2011; Galarza, 2011; Domínguez, 2013; Hernández, 2019) se le asocia a la sobreexplotación y al abatimiento del nivel freático que está ocasionando que los estratos más profundos formados por rocas ígneas que contienen arsénico se estén disolviendo. Por otra parte, en vista que el acuífero es un valle formado por material aluvial rodeado de sierras de origen volcánico, se podría establecer si estas características geológicas también juegan un papel importante en el origen de dicho elemento.

Por otra parte, resulta de gran interés conocer la evolución histórica de las concentraciones de arsénico en el agua de consumo humano, ya que es importante evaluar si el incremento en la población y la sobreexplotación del acuífero han tenido impacto en los niveles y distribución de este elemento a lo largo del tiempo, significando un riesgo vigente para la población expuesta en la actualidad.

En vista de los antecedentes mencionados, se considera de vital importancia actualizar los datos de calidad del agua de los pozos que se encuentra en la zona del acuífero Meoqui-Delicias, así como también definir el origen de dicho elemento. Esta información sería de gran interés y utilidad para los organismos encargados de la gestión de los recursos hídricos en la zona, así como el sector académico y científico, la cual puede coadyuvar para implementar soluciones a esta problemática.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General



Analizar la concentración de arsénico en pozos de agua potable ubicados en el acuífero Meoqui-Delicias, con el fin de determinar su evolución espacial y temporal mediante la comparación de dichos valores con los registros históricos existentes de los años 2003 y 2006 relativos a la presencia de dicho elemento en el acuífero.

1.4.2 Objetivos específicos

- Actualizar la información sobre las concentraciones de arsénico, a través de la toma y análisis de un número de muestras representativas en el área del acuífero Meoqui-Delicias.
- Realizar un análisis comparativo entre los resultados de las concentraciones de arsénico reportadas anteriormente y los obtenidos recientemente.
- Realizar la interpretación de los resultados a partir de la elaboración de tablas, gráficas y mapas de isoconcentraciones.
- Realizar análisis estadístico empleando las bases de datos de concentración de arsénico para observar tendencias y anomalías que han seguido los pozos a través del tiempo.
- Correlacionar las concentraciones de arsénico con la geología de la zona.

1.5 Hipótesis

Las concentraciones de arsénico en el acuífero Meoqui-Delicias han presentado cambios en su distribución espacial y con respecto al tiempo durante el período 2003- 2021, lo que puede estar relacionado con las características geológicas de la zona y la explotación de agua subterránea realizada en dicho acuífero.



Capítulo 2: Marco teórico

2.1 Composición de las aguas subterráneas

La calidad del agua subterránea se encuentra ligada al ambiente hidrogeológico en el que se ubica. De acuerdo con Sánchez (2012) “la etapa de infiltración a través del suelo es muy importante para la composición geoquímica de un agua subterránea, ya que con frecuencia gran parte de la personalidad geoquímica del agua se adquiere en los primeros metros”. El agua en contacto con las primeras capas del suelo es de carácter ligeramente ácido debido a la reacción con el CO_2 ; esto le confiere un comportamiento agresivo ante varios minerales hasta que llega a la zona saturada, donde pierde su acidez y su capacidad de disolver algunos componentes tales como carbonatos y silicatos (Sánchez, 2012).

Desde el momento en que el agua llega a la superficie freática más cercana, hasta que sale a la superficie en forma de ríos, manantiales o captaciones, pueden pasar días o miles de años y su recorrido puede alcanzar desde unos cuantos metros hasta miles de kilómetros. De acuerdo a lo anterior, su evolución química depende de los minerales con los cuales tuvo contacto, la duración del mismo durante su trayecto, así como de la velocidad del flujo subterráneo (Sánchez, 2012).

Los procesos químicos y las reacciones que ocurren en las aguas subterráneas suelen ser muy variados, pero como normal general se observa que las aguas con menos tiempo de residencia suelen ser bicarbonatadas, seguidas de las sulfatadas y en última instancia las cloruradas (Sánchez, 2012).

2.2 Arsénico

El arsénico es considerado un componente traza dentro de las aguas subterráneas, pero es importante vigilar sus concentraciones debido a sus implicaciones que puede tener en la salud pública.



Se encuentra ampliamente distribuido en el ambiente, y su concentración dentro de la corteza terrestre es de 2 mg/kg en las rocas ígneas y sedimentarias, aunque se tienen registros de concentraciones de hasta 6000 mg/kg en algunas rocas sedimentarias como las lutitas negras (Paikaray, 2012; citado en Domínguez, 2013).

Los principales depósitos de As se encuentran en forma de pirita (FeS_2), galena (PbS), calcopirita (CuFeS_2), esfalerita (ZnS), rejalgar (As_4S_4), oropimente (As_2S_3). Existen altas concentraciones en depósitos de azufre, como es el caso de la arsenopirita (FeAsS) que es el mineral más abundante de arsénico en la naturaleza (Mandal y Suzuki, 2002; citado en Domínguez, 2013).

El arsénico se puede incorporar también gracias a la desorción o escape en forma de gas de rocas y ciertos materiales debido a procesos reductivos y oxidantes, ocasionando que pase de arsénico (III) a arsénico (IV) (Rivera, 2016).

Las aguas subterráneas que llegan a ser ricas en As están presentes también en zonas geotérmicas, y en menor medida dentro de áreas de riego donde el uso de fertilizantes es excesivo (Rivera, 2016).

Los acuíferos que presentan altas concentraciones de As generalmente se ubican en cuencas cerradas de zonas áridas y semiáridas, las cuales se encuentran rellenas por materiales aluviales en posición horizontal. Debido a que el agua circula lentamente, se facilita que se lleven a cabo las reacciones químicas que dan origen al As en el agua subterránea. Además, la presencia de zonas geotérmicas y mineras dan como resultados aguas ricas en arsénico (Leeser y Lara, 2006).

2.3 Química del arsénico

El arsénico según la tabla periódica es considerado un metaloide, ya que tiene las propiedades tanto de los metales como de los no metales, pertenece al grupo VA de la tabla periódica con un número atómico de 33 y una masa atómica de 74.92160. Representa



aproximadamente el 0.0005 % de la corteza terrestre y es considerado como el elemento décimo primero más abundante; además constituye alrededor de 300 minerales dentro de la corteza terrestre (Onishi, 1969).

Podemos encontrar el arsénico con valencias de -3, 0, +3, +5; los iones más comunes encontrados en las aguas subterráneas son el arsenito (AsO_2^{-1}) y arseniato (AsO_4^{-3}) (Baes y Mesmer, 1985).

El arsénico tiene la capacidad de reaccionar rápidamente, ya sea con metales para de esta manera formar complejos insolubles, o formar enlaces covalentes con carbono, hidrogeno y oxígeno. Los ácidos más característicos son el H_2AsO_4 , H_2AsO_4^- y el HAsO_4^{2-} con la sal de arseniato o As (V), así como también el ácido H_3AsO_4 con la sal de arsenito o As (III) y por último en ambientes reductores el HAsO_2 (Mortimer, 1987).

Varios de los metales más tóxicos dentro del planeta tierra se producen en disolución en forma de cationes como es el caso del Pb^{+2} , Cu^{+2} , Cd^{+2} , Co^{+2} etc. Pero estos van perdiendo su capacidad de solubilidad conforme al pH aumente. Dentro de las aguas subterráneas la solubilidad de estos metales se ve drásticamente reducida debido a la precipitación o coprecipitación de estos como minerales de oxido, hidróxido, carbonatos o fosfatos, o debido a su fuerte adsorción a óxidos metálicos hidratados, arcillas o materia orgánica. En cambio, la mayoría de los oxianiones su adsorción tiende a disminuir al aumentar el pH (Dzombak y Morel, 1990; citado en Domínguez, 2013).

2.4 Movilidad del arsénico

El comportamiento que presenta el arsénico en el ambiente depende de las condiciones redox y el pH de las aguas subterráneas donde se encuentre (Dinwiddie y Ming Liu, 2018). En este caso si el arsénico se encuentra en condiciones oxidantes el arsénico estaría en su mayoría disuelto en forma de As (V) y el pH se encontraría en forma neutra o tendiendo a la alcalinidad, siendo la especie dominante HAsO_4 para pH menores a 6.9 y



HAsO_4^{2-} para condiciones con pH más elevado. El ambiente geoquímico oxidante tiende a favorecer que existan especies disueltas de B, F, Mo, Se y U, mientras que los elementos como Fe y Mn son propensos a formar especies minerales en forma de óxidos. El transporte de arsénico en este tipo de ambiente suele ser en forma de especies disueltas, o también mediante la adsorción a óxidos minerales de Fe, Mn y arcillas que son arrastrados por el agua (Galindo et al., 2005).

En caso contrario, en las aguas subterráneas que presentan condiciones reductoras, el pH suele estar cercano a la neutralidad, y el arsénico se encuentra en su forma más peligrosa As (III), siendo la especie disuelta más predominante el H_3AsO_3 donde el pH es menor a 9.2. La movilidad dentro de este ambiente varía debido a la competencia con otras especies existentes dentro del agua. La naturaleza de algunos elementos minoritarios y traza como el P, B y el V hace que puedan presentarse algunas especies con comportamientos similares al As, por ejemplo, el fosfato podría ocupar posiciones de adsorción que limitan la fijación del As. Caso contrario, el arseniato podría tener consecuencias sobre la salud ya que ocasionaría que el As sustituya al P en procesos metabólicos. Esto se puede acomplejar más al considerar aniones mayoritarios, los cuales también compiten en las reacciones dentro de estos ambientes como es el caso de HCO_3^- y SO_4^{2-} (Galindo et al., 2005).

La evaporación en zonas áridas o semiáridas tiende a favorecer el aumento de la salinidad y la alcalinidad (Galindo et al., 2005).

El tiempo de residencia del arsénico en los sistemas acuáticos ronda en promedio los 60000 años, en los lagos 45 años (Nriagu, 1994). Emsley (1992) indica que el arsénico puede residir en el mar alrededor de 90000 años.

2.5 Efectos del arsénico en la salud

Varios estudios han demostrado la toxicidad del As y sus efectos en la salud del ser humano. Los diversos compuestos inorgánicos del As se han catalogado como cancerígenos



por la Agencia Internacional de Investigación sobre el cáncer. La principal fuente de intoxicación por As se encuentra en el agua que se consume, aunque también se debe a la ingesta de alimentos producidos en zonas donde el agua tiene un alto contenido de As, o debido a la exposición dentro de ciertas actividades laborales como son la actividad minera, fundiciones, uso de insecticidas, desecantes, preservantes de madera, y por tratamientos farmacológico (Lombardo et al., 2020).

Los diversos compuestos orgánicos del As pueden ocasionar una intoxicación aguda o crónica, la cual dependerá de la dosis ingerida y el periodo de exposición. Por lo general, la intoxicación aguda genera náuseas, problemas intestinales y cardiovasculares. En el caso de la exposición crónica, los efectos son más severos y se le denomina como “arsenicosis” la cual es producto de una exposición prolongada al As, y consiste en severos daños dermatológicos como la hiperpigmentación y la queratosis (*Figuras 1 y 2*). La exposición constante aumenta el riesgo de padecer enfermedades cardiovasculares, diabetes, alteraciones genéticas, epigenéticas y estrés oxidativo, además del riesgo de desarrollar cáncer en varios órganos. El ganado también puede estar sujeto a padecer arsenicosis en zonas con un elevado contenido de As en el agua (Lombardo et al., 2020).



Figura 1 Hiperqueratosis, Kumar (2008)



Figura 2 Cáncer de piel debido a la ingesta de Arsénico, Lillo (2008)

2.5.1 Efectos en niños

Los niños son más vulnerables a los efectos causados por la ingesta de As. Las enfermedades dermatológicas aparecen con más rapidez en esta población. Diversos estudios han demostrado que los niños expuestos durante la etapa prenatal y postnatal llegan a padecer un desempeño neurológico menor a comparación de los niños que no han sido expuestos al As. Además, se tiene evidencia de residuos de arsénico en la leche materna y efectos dañinos durante el embarazo, lo que indica que las mujeres embarazadas y los niños constituyen un grupo de alto riesgo (Lombardo et al., 2020).

2.6 Problemática del arsénico en aguas subterráneas a nivel mundial

El arsénico puede estar presente en el aire, el agua y el suelo debido varios factores como tormentas de polvo y aguas de escorrentía, por lo cual la contaminación por arsénico está ampliamente extendida gracias a su fácil movilidad en el ambiente. Si existe una gran presencia natural del arsénico debido a la geología es muy común que los acuíferos cuenten con altos niveles de arsénico, como es el caso de Bangladesh. India, China, Taiwán,



Mongolia, Chile, Argentina, México y varias partes de Estados Unidos como se observa en la **Figura 3** (Rangel, 2015).



Figura 3 Distribución de acuíferos con problemas de arsénico (Smedley y Kiniburgh, 2002)

Existen lugares donde el alto contenido de arsénico no está ligado a la mineralización o a la actividad geotérmica, como pueden ser acuíferos muy extensos cuya función es abastecer grandes poblaciones; tal es el caso de México, Argentina, EE. UU, China, Bangladesh, Rumania, India, Nepal, Camboya, Pakistán, Vietnam y Chile, donde la presencia de arsénico se detecta mediante casos de problemas de salud relacionados con el arsénico, o mediante programas de pruebas aleatorias (Domínguez, 2013).

Las zonas cuya presencia de arsénico se encuentra asociada a la mineralización o actividad geotérmica tienden a ser de carácter local a comparación de las zonas donde se debe a causa de procesos geoquímicos naturales en zonas más amplias. Las altas concentraciones dentro de las aguas subterráneas no se restringen a un solo tipo de condiciones o factores, ya que la presencia de arsénico en los acuíferos se tiene tanto en condiciones oxidantes debido



al alto pH como en condiciones reductoras, circulación geotermal o debido a la acción del hombre, por lo que no se cuenta con un modelo para explicar lo que pasa en estas zonas. Aunque se han encontrado similitudes entre algunos como la presencia de sedimentos jóvenes menores a 12000 años, además de ubicarse en cuencas endorreicas en zonas áridas o semiáridas (Domínguez, 2013).

En Bangladesh el arsénico cobró mucha relevancia desde que se descubrió en los años noventa, ya que estaba ampliamente distribuido dentro de los pozos de agua potable, pero se han logrado varios avances y se ha reducido el número de personas expuestas en un 40 %. Pero se estima que el número de personas con riesgo de ser expuesta a altas concentraciones arriba de la norma nacional es aún de entre 20 y 45 millones de personas (OMS, 2021b).

En México se han detectado tres ambientes hidrogeológicos relacionados con la presencia de arsénico en el país, los cuales se identifican como acuíferos aluviales en la zona norte y centro, áreas de actividad minera en la zona norte y centro y, por último, zonas de actividad geotérmica relacionadas con rocas volcánicas jóvenes en el centro del país. Los acuíferos aluviales son de mayor relevancia ya que la mayoría de la población vive en estas zonas y dependen ampliamente del abastecimiento de agua subterránea (Cortés, 2011).



Figura 4 Áreas con presencia de arsénico en las aguas subterráneas en México (Cortés, 2011)



De acuerdo con la Red Nacional de Medición de Calidad del Agua (RENAMECA) (2020) para el año 2012 la presencia de altos niveles de arsénico se apreciaba en alrededor de 17 de estados, pero para el año 2018 ya eran más de 24 los estados afectados. En México más de 12 millones de personas están expuestas a elementos tóxicos, pero no lo saben. Algunos investigadores estiman que alrededor de 8.81 millones de personas están expuestas a concentraciones de arsénico por encima del límite permisible (Curiel y Mena, 2021).

2.7 Normativa de agua potable

La Organización Mundial de la Salud (OMS) es el organismo encargado de establecer las bases para las normativas de calidad de agua cuyo objetivo es lograr la seguridad del agua potable.

Por otro lado, la Agencia para la Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA, por sus siglas en inglés) divide en dos categorías las normas para el agua potable que son:

- 1) Estándares primarios. Son todos aquellos contaminantes que tienen un impacto en la salud; algunos ejemplos pueden ser: patógenos, bacterias, hongos, virus, elementos radioactivos y químicos tóxicos. Suelen medirse en mg/l.
- 2) Estándares secundarios. Son aquellos contaminantes que no tienen ninguna afectación a la salud, pero pueden presentar alguna molestia en los consumidores, como pueden ser el sabor, olor, agentes que causan corrosión y/o espuma, etc.

Por su parte, en México se utilizan las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) publicadas por la Secretaría de Salud en forma individual, o en conjunto con otras secretarías o dependencias públicas y privadas relacionadas con la salud, el agua y la educación, entre otras, para regular estos parámetros. Entre las más importantes se encuentran:

- NOM-179-SSA1-1998 Vigilancia y evaluación del control de calidad del agua para uso y consumo humano, distribuida por sistemas de abastecimiento público.



- NOM-230-SSA1-2002. Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Requisitos sanitarios que se deben cumplir en los sistemas de abastecimiento públicos y privados durante el manejo del agua. Procedimientos sanitarios para el muestreo.
- NOM-012-SSA1-1993. Requerimientos sanitarios que deben tener los sistemas de abastecimiento destinados al agua para consumo humano públicos y privados.
- NOM-014-SSA1-1993. Procedimientos sanitarios para la toma de muestras en el agua destinada a consumo humano en sistemas de abastecimiento de agua públicos y privados.
- Modificación a la NOM-127-SSA1-1994. Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites aceptables de calidad y tratamientos a los que debe ser sometida el agua para su consumo.

De ellas, la más importante es la Modificación a la NOM-127-SSA1-1994, ya que se encarga de establecer los límites para que el agua sea apta para ser utilizada para el consumo humano. En el caso del arsénico, el valor máximo permisible para este fin es de 0.025 mg/l.



Capítulo 3: Área de estudio

3.1 Localización de la zona de estudio

El acuífero Meoqui-Delicias cubre una superficie de 4830 km². Se encuentra ubicado en la porción centro-sur del estado de Chihuahua y está delimitado geográficamente por los paralelos 27° 31' a 28° 35' de latitud norte y los meridianos 105° 45' a 105° 00' al oeste de Greenwich. El acuífero abarca de manera parcial a los municipios de Rosales, Julimes, Saucillo, La Cruz, San Francisco de Conchos, así como casi en su totalidad los municipios de Delicias y Meoqui. Dentro de su extensión se encuentran varias localidades de los distintos municipios (CONAGUA, 2020). La ubicación del acuífero se puede apreciar en la *Figura 5*.

3.2 Clima

El clima principal en el acuífero, de acuerdo a la clasificación de Köppen es Muy seco semicálido ó BWh, como se puede observar en la *Figura 6*, con temperaturas que rondan entre 18° y 22° C, con presencia de lluvias en verano y un porcentaje del 5 al 10.2 % para las lluvias invernales. En la porción sur del acuífero predomina un clima seco semicálido ó BS0hw(w) con condiciones similares. La temperatura media anual captada en la estación climatológica de ciudad Delicias es de 20.1 °C, con una mínima de 6.4° y una máxima de 34° C, el promedio es de 18 °C. La precipitación media anual de la zona es de 284 mm a 300 mm (CONAGUA, 2020).

ACUÍFERO MEOQUI-DELICIAS

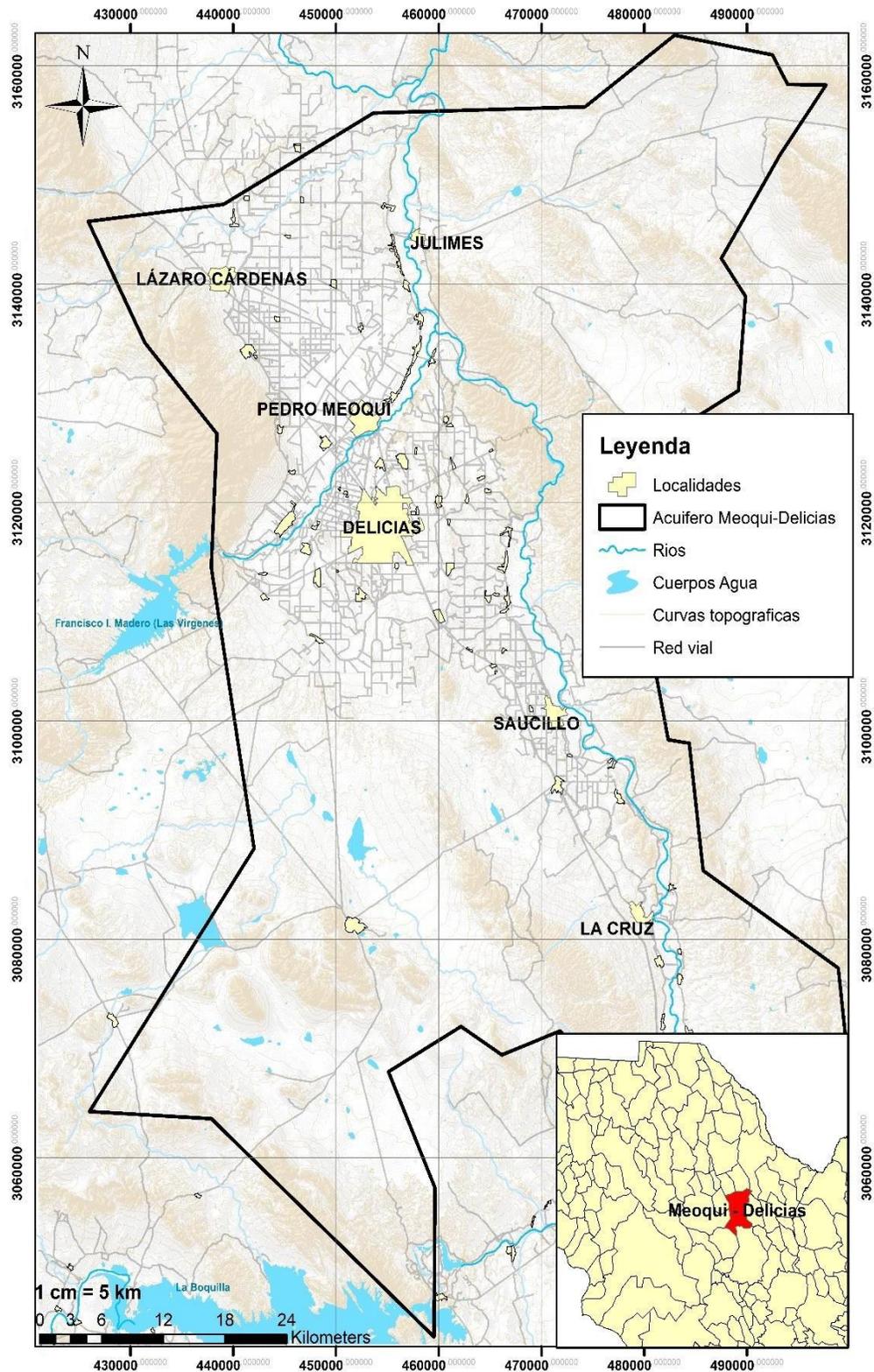


Figura 5 Mapa de ubicación del acuífero Meoqui-Delicias. (Elaboración propia).

ACUÍFERO MEOQUI-DELICIAS

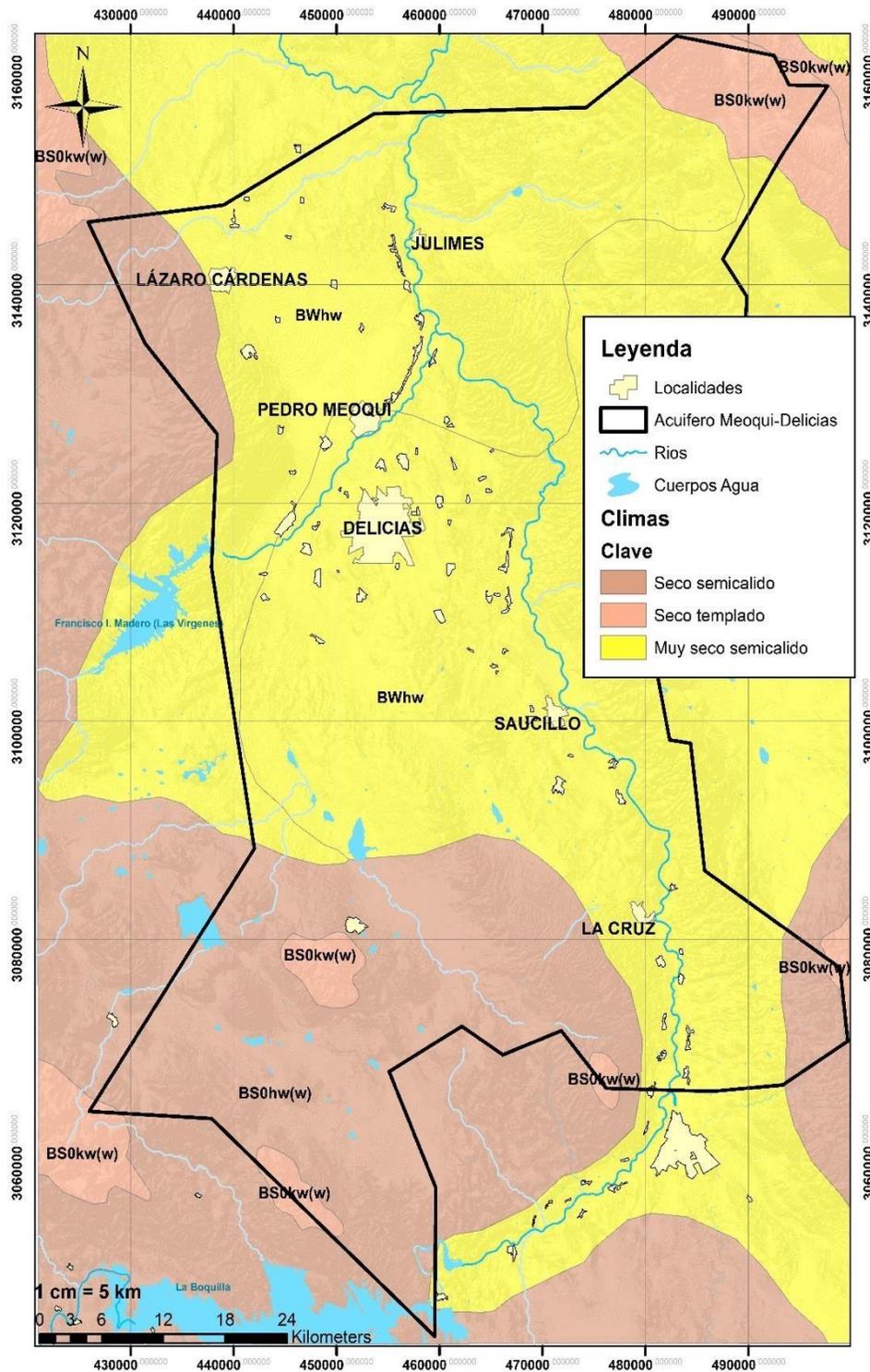


Figura 6 Mapa de climas en el acuífero Meoqui-Delicias. Elaborado a partir de información de INEGI.



3.3 Hidrología superficial

La zona principalmente es atravesada por el Río Conchos con una dirección de flujo de sur a norte. Este río tiene su origen en la Sierra Tarahumara. Mas adelante en Julimes se le une el Río San Pedro, el cual proviene del oeste con flujo hacia el noreste donde se junta con el río Conchos como se observa en la *Figura 7*.

Dentro de la zona tenemos la presencia de dos cuerpos de agua muy importantes para la región, como es la presa La Boquilla, que se encuentra ubicada en el municipio de Valle de Zaragoza y San Francisco de Conchos, a 1265 msnm. De igual manera la presa Francisco I. Madero, o presa Las Vírgenes, se localiza en el cauce del Río San Pedro, en el municipio de Rosales.

Estas presas son esenciales para la región, ya que regulan el agua proveniente del Conchos y sirven como sustento para la industria agrícola. También se tiene la presencia de una serie de arroyos intermitentes que solo son apreciables en temporadas de lluvia.

3.4 Geomorfología

En la zona se tiene presencia de cuatro unidades hidrogeomorfológicas, en las que destacan el valle, por su gran extensión, y la zona de transición hacia las sierras conocida como pie de monte. Éstas cuentan con una gran permeabilidad lo que resulta en acuíferos de buena calidad y gran capacidad de infiltración.

El pie de monte está constituido por depósitos conglomeráticos que se forman por clastos de granulometría diversa, que sirve como material de transición para el agua proveniente de los puntos más altos y abanicos aluviales.

Por último, el valle que constituye a la unidad más extensa dentro de la región, ocupando casi en su totalidad al acuífero, está formada por rellenos sedimentarios de origen continental en los cuales destacan materiales de tipo lacustre y aluvial. La topografía de la zona es muy suave, con pendientes ligeras y terreno poco accidentado (CONAGUA, 2020).



3.5 Edafología

Dentro del acuífero se cuenta con una gran variedad de tipos de suelo, como se observa en la **Figura 8**, donde se pueden destacar los suelos de tipo Chernozem (CH), Cambisol (CM), Calcisol (CL); en la parte central del acuífero tenemos aquellos tipos de suelo como el Luvisol, Cambisol (CM), Kastañozem (KS) y Vertisol (VR); en la parte sur del acuífero predominan los suelos de tipo Solonetz (SN) y Calcisol (CL), así como el Regosol (RG) y el Leptosol (LP) que también se encuentra en las zonas topográficamente altas.

La mayoría de estos tipos de suelo son de carácter aluvial, los cuales debido al intemperismo bajo las condiciones climáticas de regiones que son áridas, han sufrido pocas alteraciones. Estos suelos son ricos en carbonato de calcio y sales de sodio, además debido a que el drenaje de la región es deficiente, lo que dio como resultado a la acumulación de depósitos de materiales solubles dando origen a suelos salinos y/o sódicos. Lo anterior ocasiona que varias hectáreas se vean afectadas por la salinidad y sodicidad en diferentes grados dificultando el uso agrícola que predomina en la región (CNA, 2009).

3.6 Geología

En la zona de estudio podemos encontrar rocas ígneas distinguibles en las sierras adyacentes a los valles, de las cuales se pueden diferenciar las riolitas, tobas, riodacitas, traquitas, andesitas y basaltos. En la zona del valle predominan los depósitos sedimentarios donde se aprecian distintos tipos de aluvión, ya sea de río, de planicie u otros. En la parte sur del acuífero se tiene presencia de calizas, lutitas y areniscas del periodo cretácico, así como también areniscas y conglomerados de origen continental en casi todo el acuífero (Barrera, 2008) como se observa en la **Figura 9**.

ACUÍFERO MEOQUI-DELICIAS

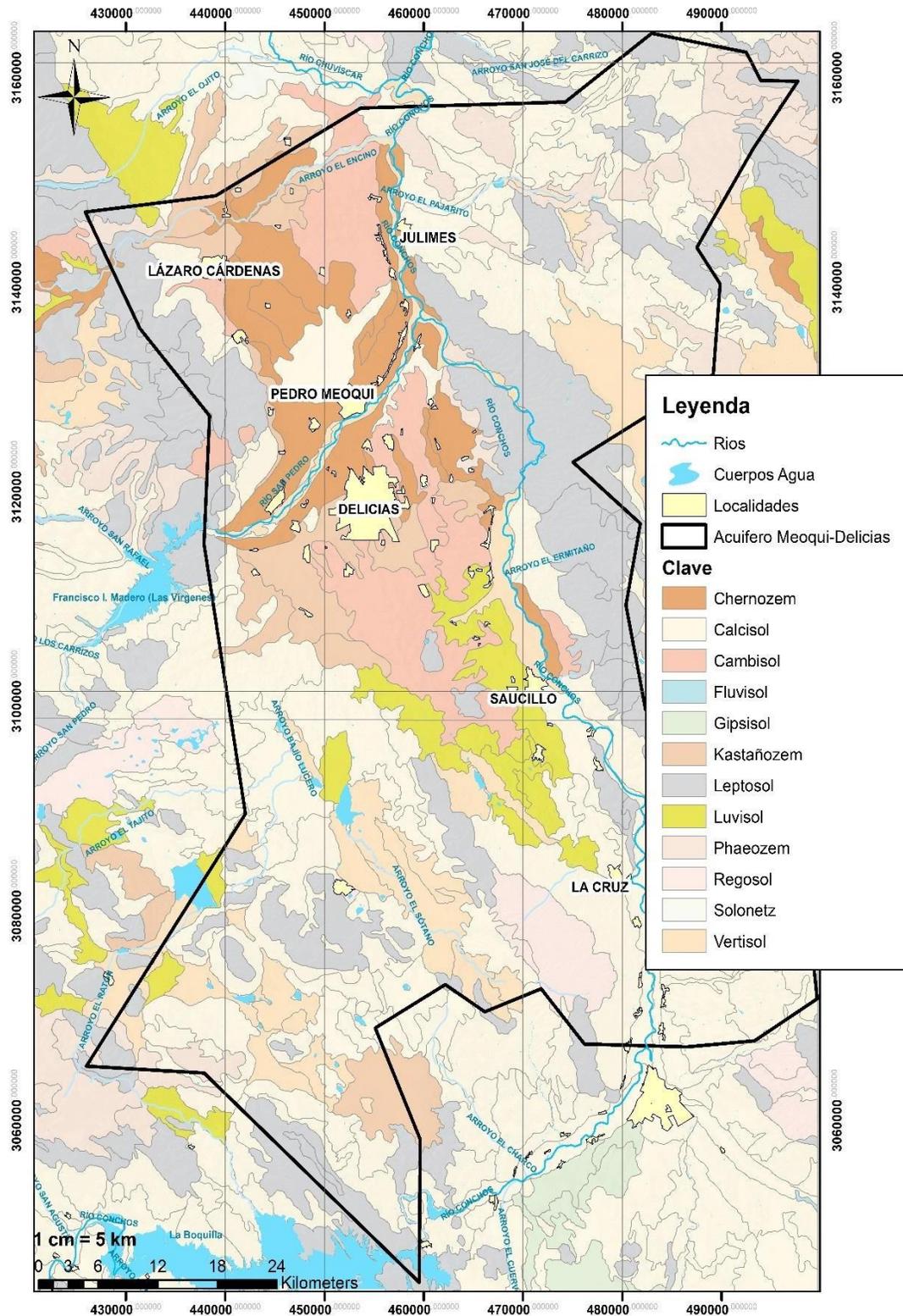


Figura 8 Mapa de Edafología, generado a partir de información del INEGI.



3.6.1 Estratigrafía

A continuación, se describirán las secuencias estratigráficas desde la más antigua a la actual y en la **Figura 10** se puede observar la columna estratigráfica.

Paleozoico

Está presente mediante un afloramiento de cuarcitas y arenisca no muy extenso, localizado en la Sierra del Cuervo; no tiene importancia geohidrológica, ya que es impermeable (CONAGUA, 2020).

Jurásico

Rocas presentes en la formación La Casita, son alternaciones de lutitas, areniscas y calizas, que por sus condiciones de granulometría y cementación son impermeables, además estas no se encuentran presentes en el área del acuífero (CONAGUA, 2020).

Cretácico Inferior

Se han identificado las formaciones Las Vigas, Cuchillo y Aurora. La formación Las Vigas está constituida por lutitas, areniscas y calizas, con una función impermeable. La formación Cuchillo es una alternación de yesos, calizas y areniscas que debido a su granulometría y cementación tampoco tienen interés hidrogeológico. Por último y más importante, la formación Aurora que está compuesta por caliza y nódulos de pedernal, se encuentra fracturada y presenta disolución, lo que le confiere excelentes condiciones hidrogeológicas, formando acuíferos confinados, libres y semiconfinados según sean las condiciones litológicas de las unidades adyacentes (CONAGUA, 2020).

Cretácico Superior

Podemos apreciar lutitas y areniscas calcáreas poco permeables, rocas sedimentarias de permeabilidad variable, así como también rocas ígneas con mucho fracturamiento y alta permeabilidad como pueden ser tobas, riolitas, andesitas y basaltos (CONAGUA, 2020)



Cuaternario

Predominan principalmente los abanicos aluviales en los márgenes del río Chuvíscar, depósitos de pie de monte, así como también distintos tipos de depósitos aluviales y lacustres. Esta unidad presenta permeabilidades irregulares que podrían funcionar como acuitardos, transmitiendo agua a unidades adyacentes con alta permeabilidad (CONAGUA, 2020).

3.6.2 Geología estructural

La zona que corresponde al acuífero Meoqui-Delicias se encuentra dentro de la provincia fisiográfica de Cuencas y Sierras, la cual se caracteriza por sus zonas desérticas en las cuales se levantan sierras plegadas y falladas, que se encuentran separada por grandes llanuras rellenas de depósitos aluviales y lacustres (CONAGUA, 2020).

El vulcanismo en esta provincia coincide con la etapa final de la Orogenia Laramide, la cual ocurrió hace más de 40 millones de años; durante este periodo se disminuyó el movimiento de la placa norteamericana, la cual era responsable de este proceso (CONAGUA, 2020).

Las sierras presentes dentro del acuífero, debido a su posición y alineación estructural, indican que las rocas ígneas surgieron debido a una primera etapa de vulcanismo posterior al evento de la Orogenia Laramide; inmediatamente después se inicia una segunda etapa de vulcanismo, la cual es representada por la expulsión de basaltos y andesitas, mientras las riolitas y las tobas riolíticas eran intrusionadas por diques andesíticos (CONAGUA, 2020).

3.6.3 Geología del subsuelo

De acuerdo con CONAGUA (2020) dentro del acuífero se realizó un estudio de prospección geofísica consistente de varios sondeos, en el cual uno de estos perfiles alcanzó una profundidad de alrededor de 1500 m, donde se señala la presencia de la formación



Aurora. Además, en estudios posteriores se contó con la aportación de cortes geológicos de los pozos perforados a profundidades de hasta 400 m, donde se realizaron varios perfiles geológicos, en los que se observa que el acuífero se encuentra alojado dentro de material clástico que alcanza espesores de hasta 500 m en la porción central del valle. Las rocas ígneas, principalmente las ignimbritas y tobas riolíticas, fungen como barreras para el flujo subterráneo y constituyen los límites laterales y el basamento para el acuífero (CONAGUA, 2020).

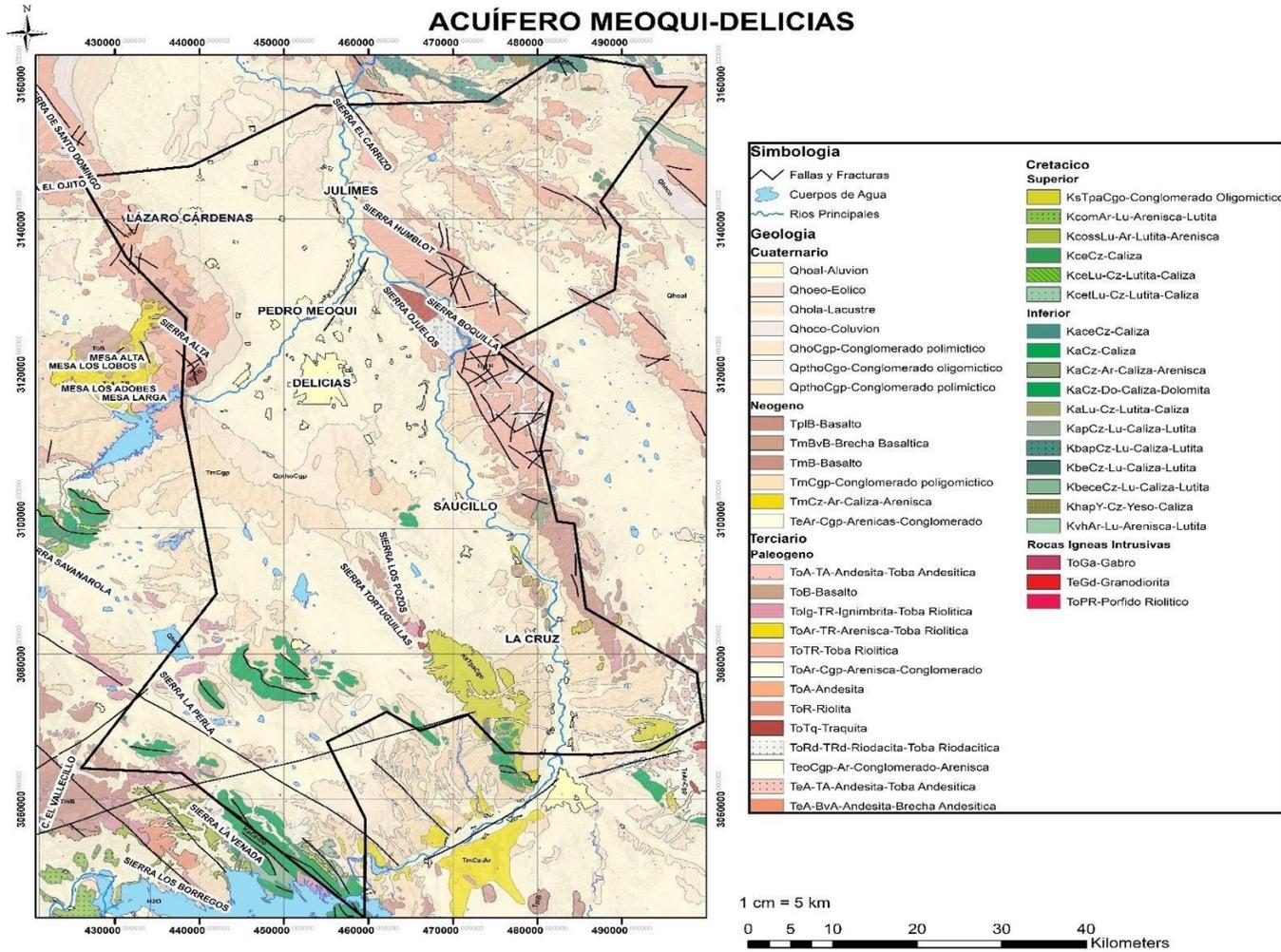


Figura 9. Mapa de geología (elaborado a partir de las cartas geológicas H13-11 y G13-2 del SGM)

COLUMNA GEOLÓGICA

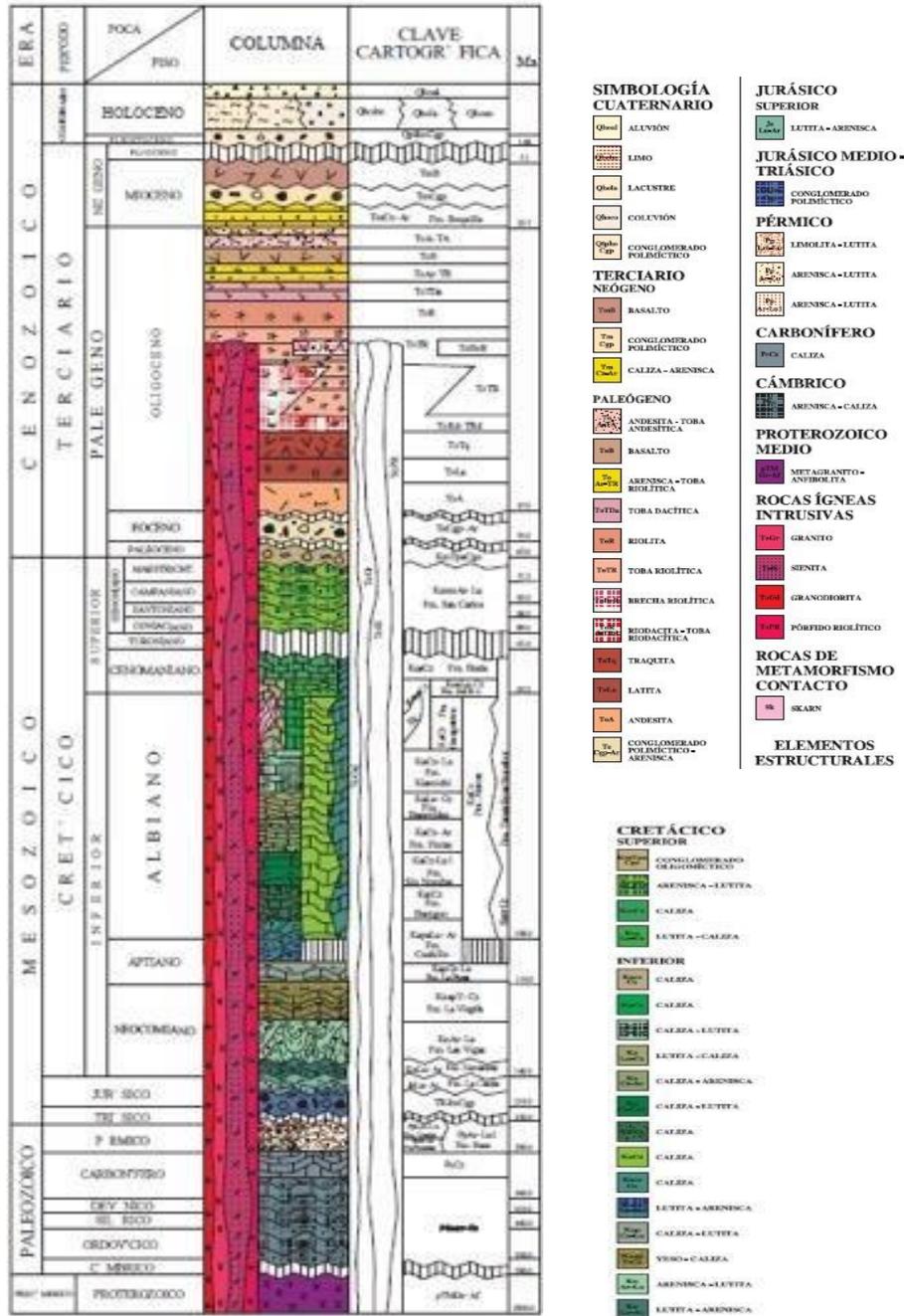


Figura 10. Columna Geológica. Carta H13



3.7 Hidrogeología

El acuífero Meoqui-Delicias se considera como acuífero libre, con algunas condiciones semiconfinantes debido a que existen lentes de arcilla o roca volcánica compactada. El acuífero está formado por sedimentos clásticos con granulometría variable, que alcanza espesores de hasta 600 metros en la zona sur y norte. Además, se estima que las rocas carbonatadas cercanas a los depósitos clásticos corresponden a otro acuífero aun sin explorar, pero que se conocen debido a las obras mineras en la región (CONAGUA, 2020).

De acuerdo con información estratigráfica se consideraron tres unidades hidrogeológicas, la primera formada por rellenos sedimentarios, la segunda por rocas ígneas y la tercera por calizas en la parte sur del acuífero, originarias de la formación Aurora que se cree llega hasta profundidades de 1500 m (CONAGUA, 2020).

Las tres unidades se conforman de la siguiente manera según su nivel de permeabilidad:

Unidad 1 Alta permeabilidad

Materiales con gran permeabilidad como pueden ser los depósitos aluviales y de pie de monte del Cuaternario, así como también las calizas provenientes de la formación Aurora. El acuífero actualmente explotado se encuentra dentro de los dos primeros materiales, pero se tiene conocimiento de un acuífero aun sin explotar alojado en la formación Aurora con espesores de hasta 500 m (CONAGUA, 2020).

Unidad 2 Media permeabilidad

Formada principalmente por tobas, riolitas, andesitas y basaltos que presentan una permeabilidad considerable y se encuentra en su mayoría cubiertas por el relleno sedimentario. En caso de que afloren en la superficie son puntos importantes de recarga debido a su fracturamiento (CONAGUA, 2020).



Unidad 3 Baja permeabilidad

La última unidad está formada por las rocas del Paleozoico, Jurásico y las formaciones Cuchillo y La Vigas del Cretácico. Estas unidades se encuentran en conjuntos por lo que forman el basamento hidrogeológico del acuífero (CONAGUA, 2020).

3.8 Calidad del agua

Las familias de agua predominantes dentro del acuífero Meoqui-Delicias fueron clasificadas y descritas por Barrera (2008) y por Rascón (2011). En dichos estudios se concluyó que el agua proveniente del municipio de Rosales era de la familia sulfatada-bicarbonatada sódica, caso similar a la proveniente del municipio de Meoqui; en el caso de Julimes el agua tiene una composición sulfatada sódica-cálcica, los municipios de Delicias y Meoqui ubicados en la zona centro del acuífero presentaron una composición sulfatada-bicarbonatada sódico-cálcica. Por último, los municipios de Saucillo y La Cruz ubicados al sur del acuífero, presentaron principalmente aguas de carácter bicarbonatada-sulfatada cálcica-sódica y bicarbonatada-sulfatada sódico-cálcica.

Con respecto a la calidad del agua proveniente del acuífero se tienen datos de dos estudios, uno correspondiente al 2003 y otro al realizado por Barrera (2008) y Rascón (2011). Los principales elementos tomados en cuenta son los sólidos disueltos totales (SDT), flúor y arsénico. Para el año 2003 se tenían alrededor de 11 comunidades con un valor de SDT por encima de los 1000 mg/l que es el valor establecido por la Mod. NOM 127 para agua de consumo humano. En el caso del flúor que es uno de los principales contaminantes y cuyo efecto puede ser dañino para la salud (fluorosis dental y ósea) se encontraron valores en los municipios de Meoqui y Julimes por encima del límite establecido por la NOM-127 que era de 1.5 mg/l. Por su parte el arsénico, uno de los principales contaminantes naturales de las aguas subterráneas debido a su alta movilidad y abundancia en el medio geológico y el cual



se asocia a los climas áridos y la actividad hidrotermal, y cuyos efectos crónicos en la salud a largo plazo pueden ser dañinos, presenta valores muy por encima de los establecidos por la NOM-127 que era de 0.025 mg/l, encontrándose valores de 0.325 en la Regina ubicada en Julimes y de 0.395 en la Colonia 10 de Mayo del municipio de Meoqui. Para el año 2006 se encontró que la problemática seguía vigente, aunque los valores de SDT habían disminuido, éstos aún sobrepasaban los establecidos por la NOM-127; tanto el arsénico como el flúor presentaban el mismo comportamiento, ya que se detectó un decremento en los niveles de estos dos elementos, los cuales están asociados en el medio geológico; sin embargo, estos valores estaban aún por arriba de los establecidos en la NOM-127 con un rango de entre 1.5-1.9 mg/l para el fluoruro y de 0.25-0.38 mg/l para el arsénico, siendo el principal punto de interés los municipios de Meoqui y Julimes.



Capítulo 4: Metodología

Para la elaboración de este trabajo se desarrolló la metodología descrita en los apartados subsecuentes.

4.1 Recopilación de información relativa al acuífero Meoqui-Delicias

Se recabó información general del acuífero, lo que incluye geología, edafología, fisiografía, clima, hidrología, hidrogeología, química, calidad del agua, la cual fue obtenida de varias fuentes, las cuales fueron la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), la Junta Central de Agua y Saneamiento del estado de Chihuahua (JCAS), el Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) y la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Chihuahua (UACH), todo con la finalidad de tener un panorama más amplio del área de estudio.

4.2 Búsqueda de información relativa a los aspectos geológicos del arsénico

Gracias a la información provista por la Junta Central de Agua y Saneamiento (JCAS) se pudieron obtener 54 cortes litológicos de pozos existentes dentro del acuífero, con lo cual se pudo definir los distintos tipos de rocas y suelos que se tienen en el subsuelo como se observa en la *Figura 11* y de esta manera correlacionarlo con los niveles de arsénico obtenidos en el muestro de agua y rocas realizados en esta investigación.

Se seleccionaron 40 puntos de muestreo de agua para análisis de arsénico (**Tabla 1**) considerando las bases de datos históricas referentes a las concentraciones de arsénico en muestreos anteriores; además se buscó que los puntos estuvieran bien distribuidos en todo el acuífero para de esta manera abarcar la mayor área posible, como se puede ver en la *Figura 12*.



CORTE LITOLÓGICO

LOCALIDAD : COL. 10 DE MAYO
MUNICIPIO : MEOQUI

Prof. (M)	Descripción corte litológico.
0 - 10	Arenas medianas a gruesas.
10 - 34	Arcilla con arenas finas a medianas.
34 - 36	Arenas finas a medianas.
36 - 40	Arcilla con arenas finas.
40 - 42	Arenas finas a medianas.
42 - 90	Arcilla con arenas finas.
90 - 96	Arenas fina a mediana con escasa arcilla.
96 - 114	Arenas finas a medianas.
114 - 120	Arenas finas a medianas con escasa arcilla.

Figura 11. Corte litológico provisto por la JCAS, correspondiente a la Col. 10 de mayo, Meoqui.



Tabla 1. Lista de pozos muestreados

ID	Día muestreo	Muestra	Localidad	X	Y
1	16/02/2021	D126	Fco. I. Madero	457660.1	3124407.2
2	16/02/2021	D130	Santa Fe	460935.6	3118092.5
3	08/03/2021	D136	Armendáriz	463059.1	3106487.1
4	02/12/2020	J9	San José	456779.6	3139556.4
5	02/12/2020	J10	La Regina	455787.0	3142937.0
6	02/12/2020	J11	Esperanza	455773.1	3147069.4
7	02/12/2020	J12	Labor Nueva	455193.6	3150201.5
8	02/12/2020	J13	La Boquilla	455670.2	3151383.5
9	02/12/2020	J14	El Carrizo	457939.3	3150462.6
10	04/12/2020	J15	Julimes	459415.6	3144253.4
11	04/12/2020	J16	ExHda. Humboldt	459617.9	3137550.3
12	04/12/2020	J17	El Gramal	461424.1	3135494.7
13	04/12/2020	J18	Las Arenillas	462504.4	3133098.4
14	17/02/2021	LC64	Panamericana	480703.9	3081709.4
15	17/02/2021	LC67	Est. La Cruz	481386.9	3077720.5
16	17/02/2021	LC69	Corraleño de Juarez	482862.9	3076832.2
17	01/12/2020	M5	Col. 10 de Mayo	445350.4	3144000.0
18	01/12/2020	M6	Potrero del Llano	446816.5	3147660.4
19	04/12/2020	M19	El Torreón	459170.0	3132699.5
20	02/12/2020	M21	Gpe. Victoria	457524.9	3133214.9
21	02/12/2020	M22	Los García	457125.1	3136517.7
22	02/12/2020	M23	Loreto	456753.6	3131378.7
23	02/12/2020	M24	Las Puentes	455775.0	3129609.0
24	02/12/2020	M25	Gran Morelos	455026.5	3129137.3
25	04/12/2020	M39	Buenavista	445040.6	3128946.0
26	04/12/2020	M40	Est. Consuelo	441138.5	3134093.8
27	01/12/2020	M42	Progreso	452458.1	3135981.6
28	01/12/2020	M43	Lomas Consuelo	454078.4	3131765.4
29	01/12/2020	R2	Barranco Bco.	440062.5	3146119.6
30	01/12/2020	R7	Salón de Actos	446443.0	3149458.0
31	04/12/2020	R38	Orinda	444426.8	3126688.5
32	16/02/2021	S44	Ampliación La Merced	465566.7	3124281.9
33	08/03/2021	S46	Santa Rosa	465241.5	3117048.9
34	08/03/2021	S47	Orranteño	466203.8	3117179.0
35	08/03/2021	S50	Altamirano	465559.3	3111542.2
36	08/03/2021	S52	Fco. I. Mad. (Gato N.)	466231.6	3106178.6
37	08/03/2021	S56-3	Saucillo P3-Panteon	470670.3	3101259.4
38	08/03/2021	S57	Col. Vicente Gro.	469087.7	3101208.0
39	17/02/2021	S58	Fco. Mezquital	472763.6	3096790.2
40	08/03/2021	S98	Est. Saucillo	468780.4	3100211.8

ACUÍFERO MEOQUI-DELICIAS

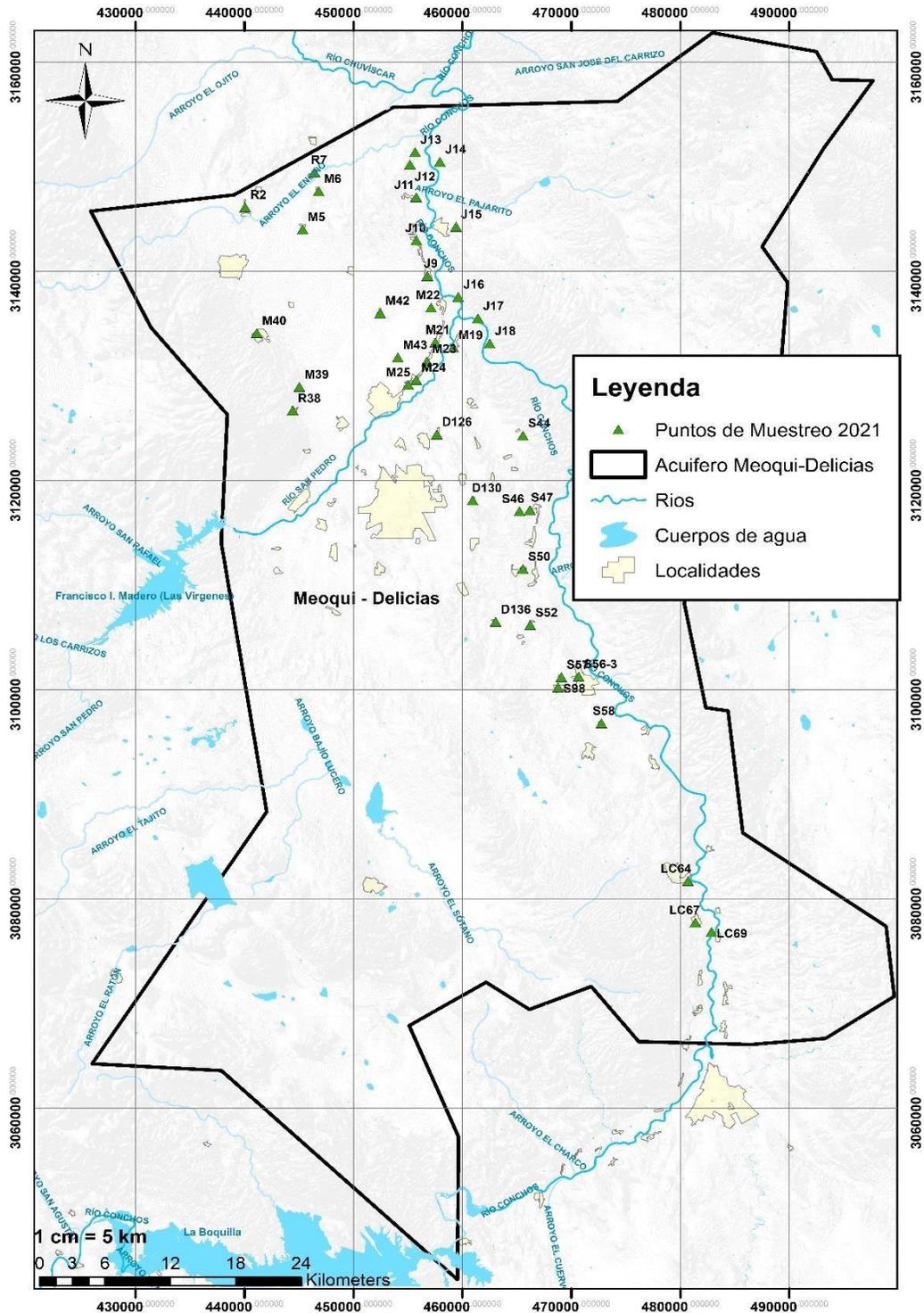


Figura 12. Ubicación de pozos muestreados

4.3 Muestreo de agua en pozos seleccionados

El muestreo realizado dentro del acuífero se hizo con base en las indicaciones de la NOM-014-SSA1-1993 la cual describe los procedimientos para el muestreo de agua para uso y consumo humanos en sistemas de abastecimiento públicos o privados. Las muestras recolectadas entre el mes diciembre del 2020 y el mes de marzo del 2021 fueron analizadas mediante un equipo multiparamétrico portátil HANNA HI 9828, el cual cuenta con una sonda con la que se midieron los parámetros de campo tales como pH, sólidos disueltos totales, conductividad eléctrica y temperatura (Figura 13).



Figura 13. Sonda multiparamétrica HANNA HI 9828.



4.4 Realización de piezometría

Se realizó la medición de niveles dinámicos, esto debido a que los pozos son de uso público y urbano, por lo que siempre están en funcionamiento, lo que no permite conocer un nivel estático. Para ello se definió una red de monitoreo piezométrico en los pozos seleccionados para muestreo de agua con la ayuda del Ing. Daniel Rodríguez (Rodríguez, 2022), donde se midieron alrededor de 30 pozos. Esta información sería utilizada para correlacionar la profundidad del nivel dinámico con la concentración de arsénico y otros factores.



Figura 14. Realización de piezometría.



Figura 16. Muestra número 1.

4.6 Análisis de Laboratorio

Los análisis realizados tanto a las muestras de agua como las muestras de roca fueron llevados a cabo en el laboratorio del Servicio Geológico Mexicano (SGM). El método utilizado para las muestras de agua fue el de Espectrómetro de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS) donde se obtuvieron valores de arsénico en mg/l. En el caso de las muestras de rocas se utilizó el método (ICP-MS) y digestión casi total con 4 ácidos (HCl, HNO₃, HClO₄ y HF), cuyos resultados fueron reportados en mg/kg.

4.7 Obtención de resultados

Se hizo la comparación de las bases de datos históricas de concentraciones de arsénico correspondiente a los años 2003, 2006 y 2021, a partir de los cuales se generaron tablas



comparativas, gráficas y mapas de isoconcentraciones de arsénico, así como también se correlacionaron los cortes litológicos de la JCAS con la información obtenida en este muestreo.

4.8 Análisis estadístico

Se realizó un análisis estadístico de las bases de datos históricas recopiladas, para de esta manera evaluar cómo se ha comportado dicho elemento dentro de los pozos del acuífero Meoqui-Delicias. Además, se realizaron análisis gráficos de la tendencia en el tiempo de la concentración de arsénico en cada uno de los pozos donde se obtuvo el coeficiente de correlación, así como la pendiente de cada gráfica para de esta manera observar la evolución en el tiempo de dicho elemento. A partir de estos resultados se clasificaron los pozos por grupos según el incremento o decremento de las concentraciones, así como una relación entre la profundidad del nivel dinámico y las concentraciones de arsénico. Además se analizaron cortes litológicos que correspondía con los de los pozos muestreados, donde se graficaron los metros de arcillas y arenas en todo el corte de cada uno de los pozos, para de esta manera encontrar una posible relación entre el espesor de estos materiales y el alto contenido de arsénico en los pozos.



Capítulo 5: Resultados y discusión

5.1 Resultados de parámetros de campo

Durante el periodo de diciembre 2020 y marzo 2021 se llevó a cabo la recolección de muestras de agua, así como la determinación de parámetros *in situ*, en 40 pozos destinados al abastecimiento de agua potable en localidades pertenecientes a los municipios de Delicias, Julimes, La Cruz, Meoqui, Rosales y Saucillo. Estos puntos de muestreo fueron seleccionados a partir de información de estudios previos en los que se indicaron altas concentraciones de arsénico. Todas las muestras fueron debidamente recolectadas siguiendo los lineamientos de la norma NOM-014-SSA1-1993, en la cual se describe el procedimiento a seguir para la toma de muestras de agua potable. Para la determinación de los parámetros de campo se utilizó una sonda multiparamétrica de la marca HANNA HI 9828, con la cual se obtuvieron los valores de temperatura (°C), pH, sólidos disueltos totales (mg/L) y conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) como se puede ver en la **Tabla 2**.

Los datos fisicoquímicos históricos de los puntos de muestreo se muestran en el Anexo 1.

El pH o potencial de hidrógeno es un parámetro que indica el grado de acidez o alcalinidad de una solución. En la Modificación a la NOM-127-SSA1-1994 se establecen los límites permisibles en un rango de 6.5 a 8.5. La comparación de los resultados de pH de las muestras con estos límites señaló el cumplimiento del total de ellas.

La concentración de sólidos disueltos totales representa el total de iones disueltos en el agua, por lo que se puede considerar un indicador del grado de mineralización; los altos valores de SDT dan como resultado un sabor no agradable para el consumo humano. El límite máximo permisible (LMP) establecido por la Modificación a la Norma Oficial Mexicana, es de 1000 mg/L. El 22.5 % de las muestras (9 de 40) exceden tal límite; su distribución es principalmente en el municipio de Julimes (7), al margen del río Conchos y aguas abajo de la confluencia de éste con el río San Pedro. Las altas concentraciones pueden estar vinculadas



al termalismo en la región; un ejemplo de ello es la zona del manantial El Pandeño, en este mismo municipio. Una elevada temperatura en el agua afecta el aporte de elementos disueltos y la mineralización (Galarza, 2011).

Tabla 2. Resultados de parámetros de campo del muestreo 2020-2021

Muestra	Localidad	CE	SDT	PH
D126	Fco. I. Madero	1107	775	7.26
D130	Santa Fe	2942	2059	7.3
D136	Armendáriz	1233	863	7.19
J9	San José	1510	1056	8.27
J10	La Regina	2265	1587	7.09
J11	Esperanza	1031	1031	7.46
J12	Labor Nueva	2043	1429	7.11
J13	La Boquilla	2043	1429	7.11
J14	El Carrizo	1741	1221	7.32
J15	Julimes	1704	1193	7.04
J16	ExHda. Humboldt	1271	890	7.43
J17	El Gramal	1029	720	7.51
J18	Las Arenillas	1200	840	7.19
LC64	Panamericana	1304	914	7.76
LC67	Est. La Cruz	1056	739	7.2
LC69	Corraleño de Juárez	1264	884	7.35
M5	Col. 10 de Mayo	670	469	8.25
M6	Potrero del Llano	1361	953	7.91
M19	El Torreón	1051	701	7.98
M21	Gpe. Victoria	1055	739	7.21
M22	Los García	1203	842	7.48
M23	Loreto	986	690	8.04
M24	Las Puentes	969	539	7.43
M25	Gran Morelos	863	604	7.29
M39	Buenavista	547	383	7.93
M40	Est. Consuelo	567	398	7.03
M42	Progreso	883	618	7.51
M43	Lomas Consuelo	1034	727	7.38
R2	Barranco Bco.	838	587	8.11
R7	Salón de Actos	644	490	7.58
R38	Orinda	471	330	7.55
S44	Ampliación La Merced	833	583	7.55
S46	Santa Rosa	1167	817	6.97
S47	Orranteño	1049	735	7.03
S50	Altamirano	833	581	7.48
S52	Fco. I. Mad. (Gato N.)	1029	755	7.56
S56-3	Saucillo P3-Panteon	1191	834	6.74
S57	Col. Vicente Gro.	651	456	7.58
S58	Fco. Mezquital	1457	1020	7.15
S98	Est. Saucillo	954	668	7.22



Las otras dos muestras que exceden el LMP de este parámetro, pertenecen a los municipios de Delicias y Saucillo. El valor máximo reportado (2059 mg/L) corresponde al pozo de la Colonia Santa Fe (D130), en el municipio de Delicias.

La concentración de SDT mantiene una relación con la conductividad eléctrica (CE), la cual es la capacidad conductora del agua a través de los iones disueltos presentes en la solución.

5.2 Resultados de los análisis y evolución espacial del arsénico en el acuífero

Las concentraciones de arsénico han sido evaluadas en diferentes periodos. En la tabla del Anexo 1, se enlistan los resultados obtenidos durante el periodo 2020-2021. En este mismo anexo es posible observar los datos históricos de los 40 pozos seleccionados para el presente estudio, obtenidos de la evaluación realizada en el 2003 por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA); así como de investigaciones de Barrera (2008) y Rascón (2011), con datos del 2006. La evolución y distribución de las concentraciones de arsénico fue determinada a través del cotejo de los datos adquiridos de los estudios anteriormente mencionados.

Los datos del año 2003, proporcionados por CONAGUA, exhiben que más del 90 % de las muestras (37 de 40) exceden el límite máximo permisible de arsénico de 0.025 mg/L, mencionado en la Modificación a la NOM-127-SSA1-1994 (Tabla 2). Por otro lado, los puntos correspondientes a La Boquilla (J13) y Saucillo P3 (S56-3), carecen de datos de arsénico para el año indicado.

La localización de los pozos muestreados, así como las isolíneas de concentración de arsénico (año 2003), se muestra en la **Figura 17**. La distribución de altas concentraciones de arsénico es predominante hacia la porción norte del acuífero, en las localidades de San José



(J9), en Julimes; Colonias 10 de mayo y Progreso (M5 y M42), en Meoqui, de concentraciones de 0.325, 0.394 y 0.404 mg/L, respectivamente.

El mayor número de muestras se establecen en un rango de concentración de 0.1 a 0.19 mg/L. Lo anterior agrupa muestras recolectadas en pozos de los municipios de Meoqui (Potrero del llano y Buenavista); Julimes (Julimes, El Carrizo, La Regina y La Esperanza); Rosales (Orinda y Salón de actos); Delicias (Santa Fe); y la Cruz (Estación La Cruz).

Las concentraciones en un rango de 0.015 a 0.94 mg/L se distribuyen principalmente en las porciones centro y sur del acuífero, sobre todo en el cruce de los ríos San Pedro y Conchos, y a lo largo de este último hasta llegar al municipio de La Cruz. También se dividen en las porciones norte y noroeste, dentro de los municipios de Rosales (Barranco Blanco); Meoqui (Estación Consuelo) y Julimes (Labor Nueva). En el agua recolectada del pozo de la Colonia Armendáriz, en el municipio de Delicias, se registró el valor mínimo de arsénico (0.015 mg/L), siendo el único punto que cumple con el límite máximo permisible establecido por la Norma Oficial Mexicana.

De acuerdo a lo anterior se establece que en el año 2003 el 94.74 % de las muestras analizadas excede el límite establecido por la Norma Oficial Mexicana. Las muestras con valores superiores a 0.1 mg/L, es decir, 84.62 % de éstas, se encuentran ubicadas en la parte noroeste del acuífero, en el valle ubicado entre las confluencias del arroyo el Encino y el río Conchos y los ríos San Pedro y Conchos; entre las sierras Alta, hacia el oeste y Humboldt, hacia el este.



Los resultados del año 2006, obtenidos de la recolección y análisis de muestras en estudios anteriores (Barrera, 2008; Rascón, 2011) (Anexo 1), exhiben cambios en las concentraciones de arsénico, según una comparación realizada contra los resultados correspondientes al año 2003, descrito anteriormente. Algunas de estas concentraciones se incrementaron, tal es el caso del municipio de Delicias (Colonia Armendáriz, de 0.015 a 0.071 mg/L); Saucillo (Vicente Guerrero, de 0.077 a 0.084 mg/L y Francisco Mezquital, de 0.069 a 0.70 mg/L); Julimes (La Regina, de 0.0136 a 0.277 mg/L y Las Arenillas, de 0.041 a 0.045 mg/L); y Meoqui (Guadalupe Victoria, de 0.057 a 0.65 mg/L). En la **Figura 18** se observa la distribución de estos puntos, principalmente en la porción centro y sur del acuífero, a excepción de la Regina (J10) ubicada en la parte norte.

El decremento en la concentración de arsénico se registró en las porciones norte, centro y sur, pero principalmente al noroeste del acuífero. En los pozos de San José (de 0.325 a 0.139 mg/L); Colonia 10 de mayo (de 0.395 a 0.316 mg/L); y El Progreso (de 0.404 a 0.376 mg/L). Casos similares se reportaron en la colonia Santa Fe (de 0.121 a 0.022 mg/L) y la Estación La Cruz (de 0.134 a 0.055 mg/L).

Algunos de los valores de arsénico registrados en el año 2006 se mantuvieron estables en comparación a los del 2003; la distribución de estos puntos es variable en todo el acuífero.

Con base en lo anterior se puede establecer que no presentaron cambios significativos, en el periodo 2003-2006. Las regiones denominadas de “alta concentración” permanecen estables dentro del valle entre las confluencias de los ríos y las sierras circundantes. Mientras que en las denominadas de “baja concentración” se apreció una disminución de los valores de arsénico en las porciones centro y sur.



Acuífero Meoqui-Delicias, Isolinias de concentración de As, año 2006

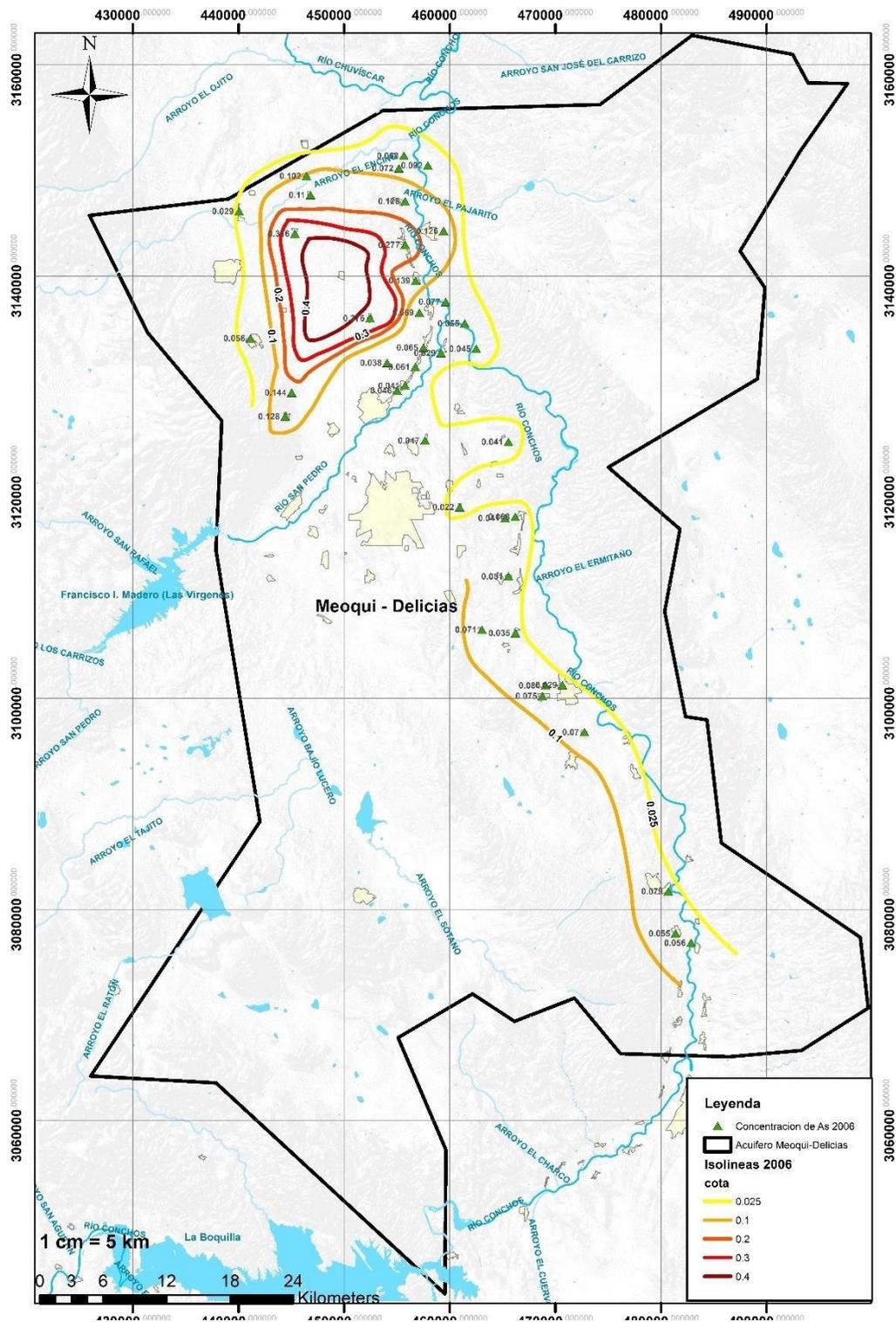


Figura 18. Isoconcentraciones de arsénico para el año 2006.



Del mismo modo que en los periodos anteriores, se llevó a cabo una evaluación de la distribución de las concentraciones de arsénico a partir de isólineas con los resultados obtenidos en el periodo 2020-2021, tal como se muestra en la **Figura 19**. La comparación de estos mismos resultados con la Normal Oficial Mexicana, determinó que 95 % de las muestras superaban los límites establecidos, significando 2.5 % menos que los resultados correspondientes al año 2006. Lo anterior indica que la concentración de arsénico se ha mantenido estable después de 15 años en las diferentes zonas dentro del acuífero.

Dentro de este periodo destacan las concentraciones reportadas en las muestras recolectadas en la Colonia 10 de mayo (M5), en el municipio de Meoqui, en donde la concentración se incrementó de 0.316 a 0.479 mg/L; y el pozo San José (J9), localizado en Julimes, registró un aumento en la concentración de 0.139 a 0.489 mg/L. Resaltando ambos sitios en los diferentes periodos analizados.

Otras localidades que también presentaron aumentos en sus concentraciones fueron Salón de Actos (R7) ubicado en Rosales, con un incremento de 0.102 a 0.146 mg/L; la Esperanza (J11), en Julimes, de 0.125 a 0.136 mg/L; y Los García (M22), en Meoqui, de 0.069 a 0.137 mg/L. Las muestras recolectadas en los pozos El Torreón y Los Puentes (M19 y M24), en el municipio de Meoqui, demostraron un ligero incremento en la concentración.

Las localidades en las que se presentó una reducción de la concentración de arsénico en el agua subterránea, se encuentran distribuidas uniformemente en toda el área de estudio. Además, 75 % de las muestras analizadas exhiben un decremento en la concentración de arsénico, en comparación con los resultados obtenidos en estudios realizados en el año 2006. Tal es el caso de las localidades pertenecientes a la porción norte del acuífero, como las colonias Progreso, Buenavista y Potrero de Llano (M42, M39, M6), en Meoqui; Orinda (R38), en Rosales; y El Carrizo (J14), en Julimes. Además de localidades en la zona centro, como Francisco Mezquital, Estación Saucillo, Col. Vicente Guerrero y Orranteño (S98, S58, S57, S47), todas ubicadas en el municipio de Saucillo. Perteneciente al municipio de Delicias se encuentra la colonia Armendáriz (D136); y por último, en la parte sur del acuífero, fueron



las localidades Panamericana y Estación La Cruz (LC64, LC67), localizadas en el municipio de La Cruz.

Correlacionando lo anterior podemos inferir que las áreas problemáticas dentro del acuífero Meoqui-Delicias no han presentado cambios importantes dentro del periodo 2003-2021, ya que la zona de mayor concentración se delimita dentro del valle anteriormente descrito.



Acuífero Meoqui-Delicias, Isolines de concentración de As, año 2021

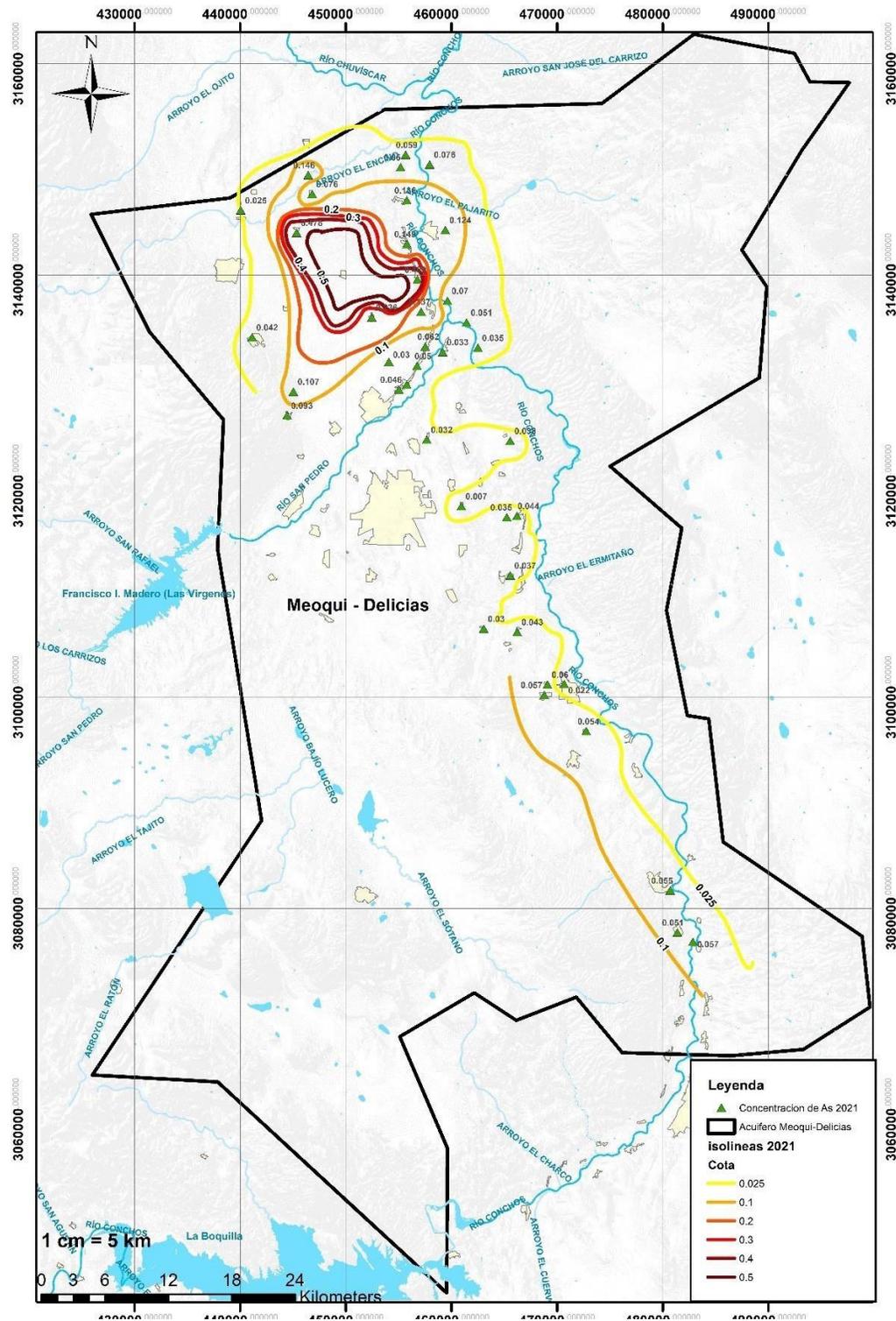


Figura 19. Isoconcentraciones de arsénico para el año 2021.



5.3 Resultados y discusión de los análisis del muestreo de rocas en el acuífero

Con el fin de corroborar la supuesta relación entre el tipo de material geológico y la calidad del agua subterránea se siguió la metodología propuesta para la toma de muestras de roca para determinar su contenido de arsénico. Se definió un lugar de muestreo con base a la geología y topografía de la zona como se muestra en la **Figura 20**. Considerando los datos obtenidos de las concentraciones de arsénico en el agua subterránea, la sierra de Humboldt fue seleccionada como el lugar más adecuado para la recolección de muestras, debido a su cercanía con la zona de “alta concentración” de arsénico y por su importancia geológica. Varias sierras dentro del área de estudio, como Las Palomas, La Boquilla, El Carrizo y La Sierra Alta, que son aledañas al valle donde se encuentran la mayoría de los aprovechamientos, están formadas principalmente por rocas ígneas denominadas como tobas riolíticas del Oligoceno. Este tipo de roca se destaca por su fracturamiento en la superficie que sirve como un punto de recarga hacia otras unidades más permeables gracias a su permeabilidad secundaria, pero a profundidad su comportamiento cambia a uno impermeable ya que no permite los flujos horizontales; esto se confirma gracias a varios cortes litológicos de pozos donde se encontró que el acuífero se encuentra alojado en materiales clásticos que alcanzan hasta los 500 metros de espesor en el centro del valle, donde las rocas ígneas sirven como barrera a los flujos subterráneos, definiendo los límites laterales y el basamento de dicho acuífero (CONAGUA, 2020).

Se recolectó un total de 5 muestras distribuidas en una zona de la sierra Humboldt; obtenidas directamente del afloramiento, como se observa en las **Figuras 21 y 22**. Desde una perspectiva macroscópica, las muestras presentan una capa de oxidación en las superficies que se encuentran expuestas al aire y a la precipitación. En las superficies que no presentan intemperismo, se observan pequeños cristales de cuarzo y algunos clastos grandes de roca.

Los análisis de roca se realizaron en el laboratorio del Servicio Geológico Mexicano, por medio de métodos de Espectrómetro de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente



(ICP-MS) y Digestión casi total con 4 ácidos (HCl, HNO₃, HClO₄ y HF), obteniendo los resultados que se muestran en la **Tabla 3**.

Tabla 3. Resultados de análisis de muestras de roca para arsénico

Límites de detección		1,0
Elemento/Compuesto		As
Unidades		mg/kg
Conlab,	Ident, Campo	
344215	MUESTRA-1	17
344216	MUESTRA-2	17
344217	MUESTRA-2-DPL	18
344218	MUESTRA-3	27
344219	MUESTRA-4	32
344220	MUESTRA-5	11

Las muestras de roca tienen una concentración de arsénico en un rango de 11 y 32 mg/kg con un promedio de 21 mg/kg, lo que exhibe el alto contenido de arsénico. Este valor se compara con la concentración promedio de arsénico en las rocas ígneas, que es inferior a 5 mg/kg (Bundschuh *et al.*, 2008). Materiales como cenizas volcánicas (tobas), poseen una naturaleza reactiva que permite liberar altos niveles de arsénico en el agua (Bundschuh *et al.*, 2008).

A partir de la muestra 3 se realizó una lámina delgada para analizar su petrografía como se muestra en las **Figuras 23, 24 y 25**, donde se identificaron minerales y materiales como cuarzo, calcita y fenocristales de feldespatos por medio de un microscopio óptico de luz translúcida; además, la matriz presenta afectaciones por óxidos metálicos y contenido de arcillas. Esta descripción se ha relacionado con lo descrito por Bundschuh *et al.* (2008), quienes han señalado que tanto el arsénico en su forma As (III) como el As (V) pueden adsorberse en la superficie de un gran número de óxidos metálicos como hierro, manganeso, aluminio, así como en materia orgánica y arcillas.

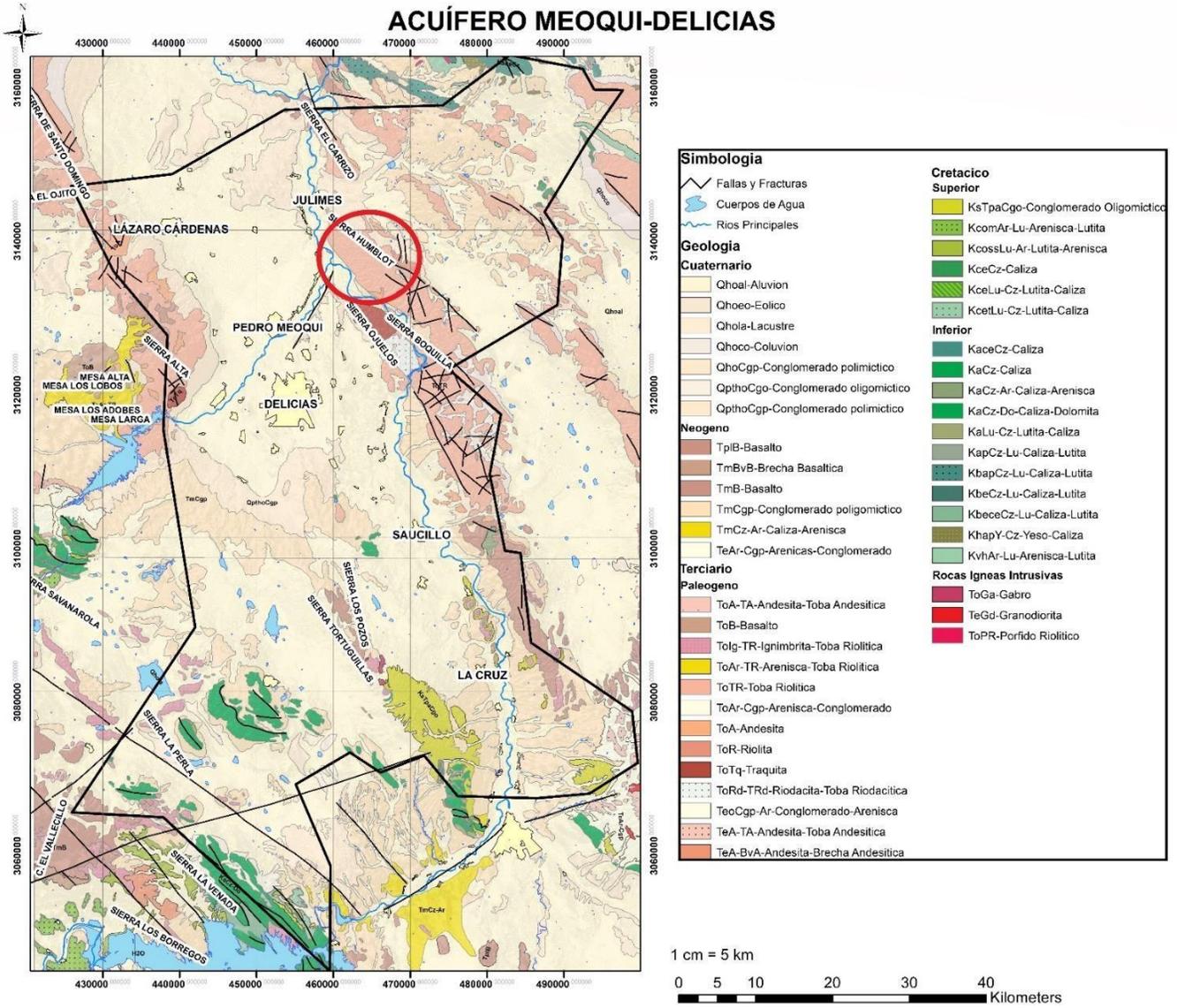


Figura 20. Ubicación del punto para muestreo de roca



Figura 21. Muestra numero 1



Figura 22. Muestra numero 5

Figura 23. Petrografía de lámina delgada de la muestra 3(1).



Figura 24. Petrografía de lámina delgada de la muestra 3(2).

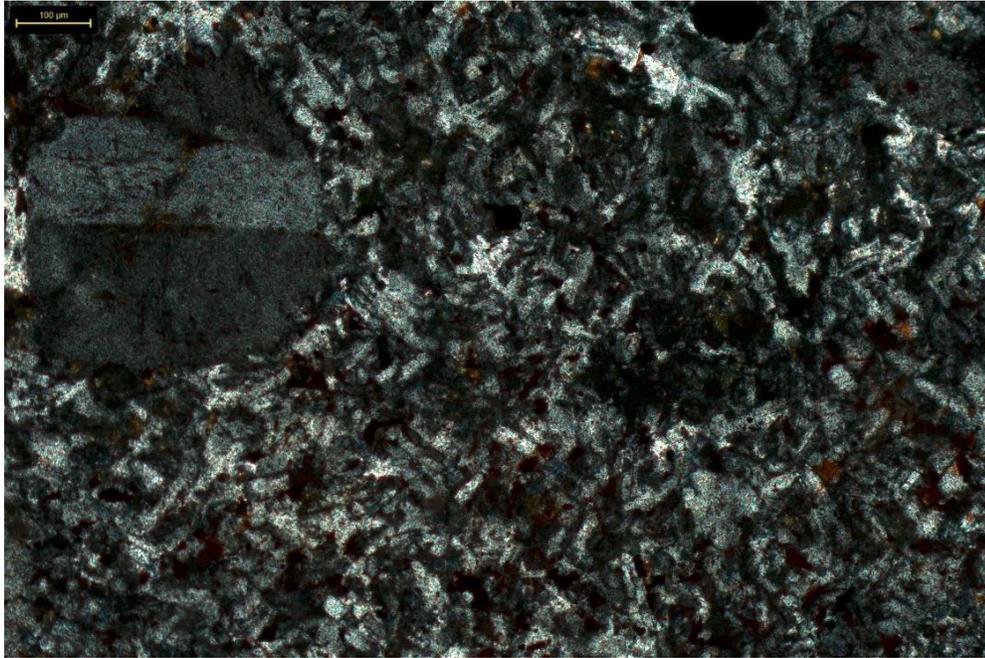


Figura 25. Petrografía de lámina delgada de la muestra 3(3).



5.4 Análisis de la relación entre profundidad del nivel dinámico y las concentraciones de arsénico.

Dentro de la misma área de estudio, Rodríguez (2022) realizó una evaluación de los niveles piezométricos en varios pozos de diferentes localidades. Lo anterior con la finalidad de esclarecer si existía o no una relación entre las concentraciones de fluoruro y la profundidad a la que se encuentra el nivel del agua subterránea (relacionada con la profundidad de extracción). Los datos obtenidos en dicha investigación e información de GoogleEarth, fueron utilizados en el presente estudio para la generación de tablas y gráficas, donde se busca explicar la posible relación entre la profundidad del agua subterránea y las concentraciones de arsénico.

La comparación entre el nivel dinámico y la concentración de arsénico en el agua subterránea se observa en la **Figura 26**. La tabla del análisis estadístico se encuentra en el Anexo 2.

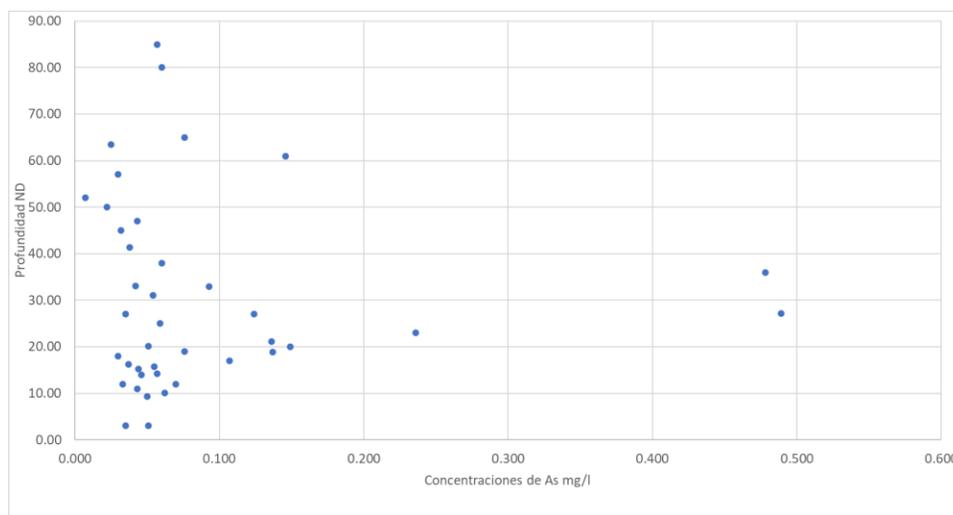


Figura 26. *Gráfica de dispersión de ND vs concentración de As.*



Como se puede observar, la mayoría de los datos se agrupan en la primera sección de la gráfica, debido a que la mayoría de las muestras no supera los 0.1 mg/L. También se puede observar que no se presenta ningún tipo de patrón en lo referente a que a mayor profundidad del nivel dinámico mayor será la concentración de arsénico. Como se ve en los pozos que contienen menores y mayores concentraciones de arsénico las profundidades de nivel dinámico son muy variables. Esto coincide con lo definido por Rodríguez (2022) el cual menciona que no existe una correlación directa entre la profundidad y las concentraciones de flúor, elemento que se comporta de manera similar que el arsénico y suele encontrarse juntos en ciertos ambientes.

5.5 Comparación de la litología de los pozos con la concentración de arsénico en el agua

Para establecer una correlación entre la concentración de arsénico y el tipo de material de relleno presente en los pozos de abastecimiento, se integró la información obtenida de los análisis de arsénico en las rocas y muestras de agua recolectadas, además de las descripciones de cortes litológicos de pozos (que coincidían con pozos muestreados), proporcionadas por la Junta Central de Agua y Saneamiento, así como los datos piezométricos mencionados en el apartado anterior.

A partir de la información de los cortes litológicos de algunos de los pozos cuya concentración de arsénico es conocida, se estableció la posible correlación entre dicha concentración y los diversos contenidos de material arcilloso y de arenas en cada uno de ellos. Estos parámetros se cuantificaron con base en el espesor total en centímetros de las diversas capas de arenas y de arcillas detectadas en los respectivos cortes litológicos analizados.

Para este análisis se escogieron 10 pozos del área, cuya información con relación a las propiedades antes mencionadas se presenta en la **Tabla 4**. En la **Figura 27** se muestra la ubicación de los pozos seleccionados.



Tabla 4. Pozos seleccionados para el análisis comparativo de contenido de arenas y arcillas (espesor) con la concentración de arsénico en el agua

Muestra	Localidad	Espesor de arcillas (m)	Espesor de arenas (m)	As 2021 (mg/L)	Profundidad ND (m)
D130	Santa Fe	30	88	0.007	52.00
D136	Armendáriz	12	108	0.030	57.00
M43	Lomas Consuelo	60	40	0.030	18.00
D126	Fco. I. Madero	50	50	0.032	45.00
J12	Labor Nueva	10	70	0.060	38.00
M6	Potrero del Llano	52	48	0.076	65.00
J11	Esperanza	75	25	0.136	21.20
M22	Los García	38	32	0.137	18.90
R7	Salón de Actos	98	2	0.146	61.00
J10	La Regina	58	22	0.149	20.00

ACUÍFERO MEOQUI-DELICIAS

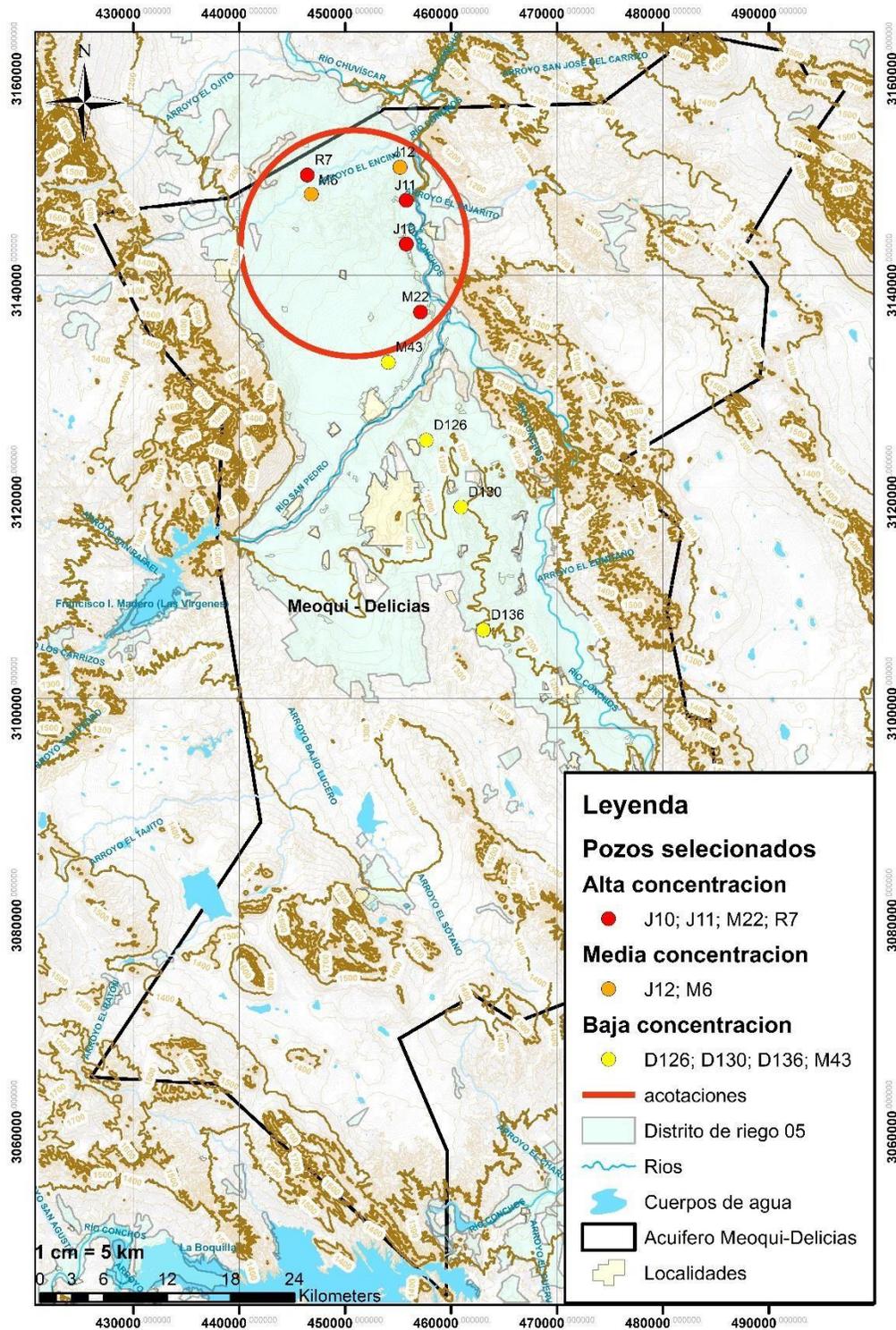


Figura 27. Ubicación de pozos seleccionados para el análisis litológico.



Bundschuh et al. (2008) mencionan que en acuíferos con alto contenido de arsénico que no venga de fuentes o procesos geotermales, depósitos minerales o por obra del hombre, los diversos materiales que forman el acuífero tienen un contenido de arsénico considerable como es el caso de las arenas (0.5-1 mg/kg), las arcillas (13 mg/kg) y los carbonatos (1-1.5 mg/kg). Además, los contenidos de arsénico en los sedimentos son similares a los que se encontrarían en las rocas, y con una tendencia a ser más elevados en los limos y arcillas.

Con base en lo anterior, a partir de los cortes litológicos y los datos de profundidad de nivel dinámico se generaron perfiles de distribución de las capas de diversos materiales de los 10 pozos seleccionados, identificando en cada caso los espesores de arcillas y arenas en cada sección del pozo. El área que constituye el acuífero Meoqui-Delicias coincide con un amplio distrito de riego en el que el agua proveniente tanto de fuentes superficiales como subterráneas representa una aportación importante de recarga para el mismo. El paso de dicho flujo descendente a través de los estratos arcillosos, supuestamente ricos en arsénico, puede ser un factor determinante de la alta concentración de dicho elemento en el agua subterránea.

Entre los perfiles de los pozos seleccionados destacan tres casos importantes que evidencian la relación de las concentraciones de arsénico con los diferentes espesores de arcillas y arenas en cada uno de ellos (Figuras 28, 29 y 30). Los demás perfiles se pueden encontrar en la sección de Anexos 3.

El primer ejemplo corresponde al perfil de La Regina (J10), ubicada en el municipio de Julimes en la zona noroeste del acuífero. En este punto se determinó una concentración de 0.149 mg/L de arsénico, que es una de las más altas reportadas. Su perfil se presenta en la **Figura 28**. El color café corresponde a los estratos de arcillas, y el color crema a los estratos arenosos.



LA REGINA		
Profundidad (m)	ND 20 m	As 0.149 mg/L
0-4.0		arenas
4-8.0		arcillas
8-14.0		arcillas
14-20		arenas
20-24		arcillas
24-30		arcillas
30-42		arenas
42-44		arcillas
44-80		arcillas

Figura 28. Perfil litológico del pozo de La Regina.

El pozo presenta una profundidad de perforación de 80 metros en su totalidad, de los cuales 22 metros corresponden a estratos arenosos y 58 metros a estratos arcillosos. Los estratos arcillosos representan el 72.5 % de todo el material, cuyo origen se da en las sierras circundantes. De esta manera se puede aproximar que entre los minerales encontrados en la matriz de las muestras tomadas de la Sierra de Humboldt se encuentran óxidos de fierro (hematitas) a partir de los cuales se libera y promueve la movilización del arsénico en el acuífero. Lo anterior también ha sido señalado en estudios anteriores, realizados por Biswas *et al.*, (2011) y Galindo *et al.*, (2005).

El siguiente perfil a analizar corresponde a la información litológica del pozo de la localidad de Potrero de Llano (M6) ubicado en el municipio de Meoqui, al noroeste del acuífero. El agua recolectada en este pozo presentó una concentración de 0.076 mg/L de arsénico. En la **Figura 29** se puede observar dicho perfil siguiendo la misma simbología de la figura anterior.



POTRERO DE LLANO		
Profundidad (m)	ND 65 m	AS 0.076 mg/L
0-18		arenas
18-24		arcillas
24-32		arenas
32-46		arcillas
46-50		arenas
50-65		arcillas
65-72		arcillas
72-74		arcillas
74-80		arenas
80-90		arcillas
90-96		arenas
96-100		arenas

Figura 29. Perfil litológico del pozo de Potrero de Llano.

El pozo de la localidad Potrero de Llano cuenta con una profundidad total de 100 metros, de los cuales 52 corresponden a arcillas y 48 a arenas. El estrato arcilloso corresponde a un 52 % del material y las arenas a un 48 %, lo cual indica una composición casi igualitaria de arenas y arcillas.

El último pozo corresponde a la colonia Santa Fe (D130), ubicada en la parte centro del acuífero, dentro del municipio de Delicias. Este pozo es uno de los dos que en el año 2021 exhibieron un bajo valor de arsénico (0.007 mg/L) en comparación con los registrados en los periodos de 2003 y 2006. El perfil correspondiente a este pozo se puede observar en la **Figura 30**.



SANTA FE		
Profundidad (m)	ND 52 M	AS 0.007 mg/L
0-4.0		arenas
4.0-6.0		arcillas
6-22.0		arenas
22-32		arenas
32-40		arenas
40-60		arcillas
60-66		arenas
66-96		arenas
96-98		arenas
98-104		arenas
104-110		arenas
110-118		arcillas
118-170		arenas
170-172		arcillas
172-178		arenas
178-186		arenas
186-200		arcillas

Figura 30. Perfil litológico del pozo de Colonia Santa Fe.

El pozo presenta una profundidad de 200 metros, casi el doble de los otros pozos analizados; sin embargo, partiendo de los datos de caudal y profundidad del nivel dinámico, se consideró que la zona principal de extracción de este aprovechamiento se limita principalmente entre los 60 y 118 metros de profundidad. Por lo anterior, la información posterior a los 118 metros de profundidad no fue tomada en cuenta en la correlación de la concentración de arsénico y el tipo de material captado por los pozos de abastecimiento. El pozo presenta 30 metros de arcillas y 88 metros de arenas que representan 26 % y 74 %, respectivamente, lo cual podría explicar su bajo contenido de arsénico al ser un pozo conformado principalmente por material arenoso.

Con base en la información obtenida de los 10 perfiles se realizaron 2 gráficos para correlacionar los espesores totales de arenas y arcillas vs las concentraciones de arsénico como se observa en las **Figuras 31 y 32.**

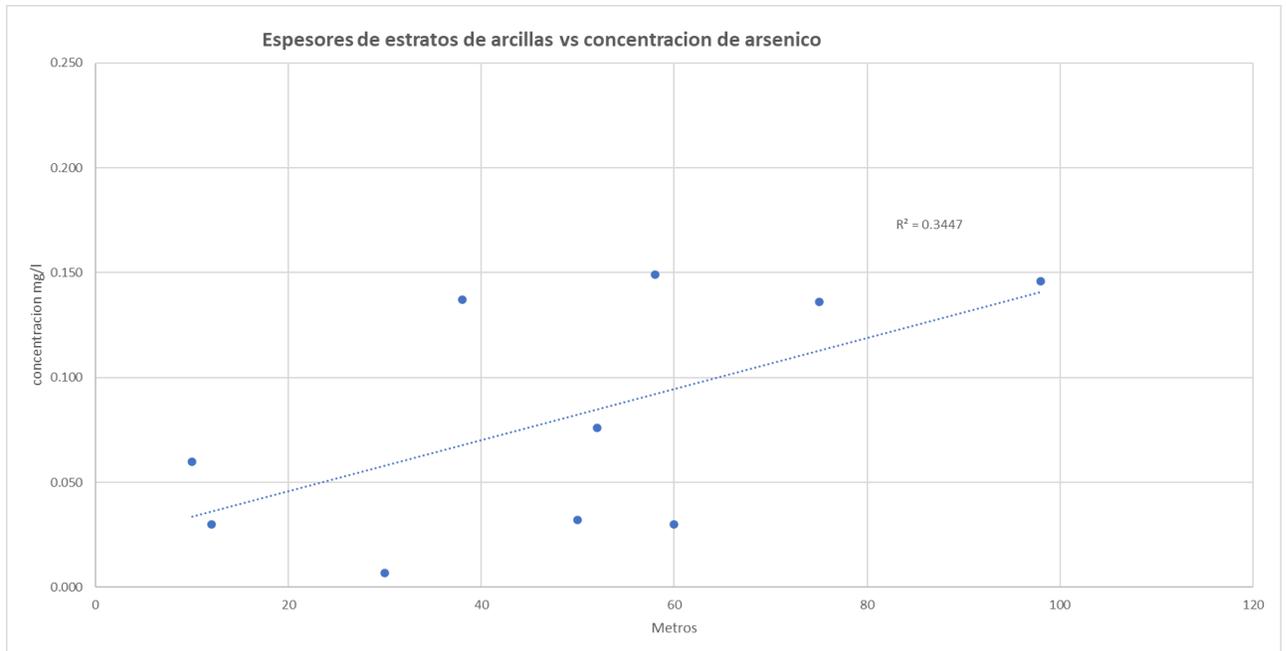


Figura 31. Grafica de espesor de arcillas vs concentración de arsénico.

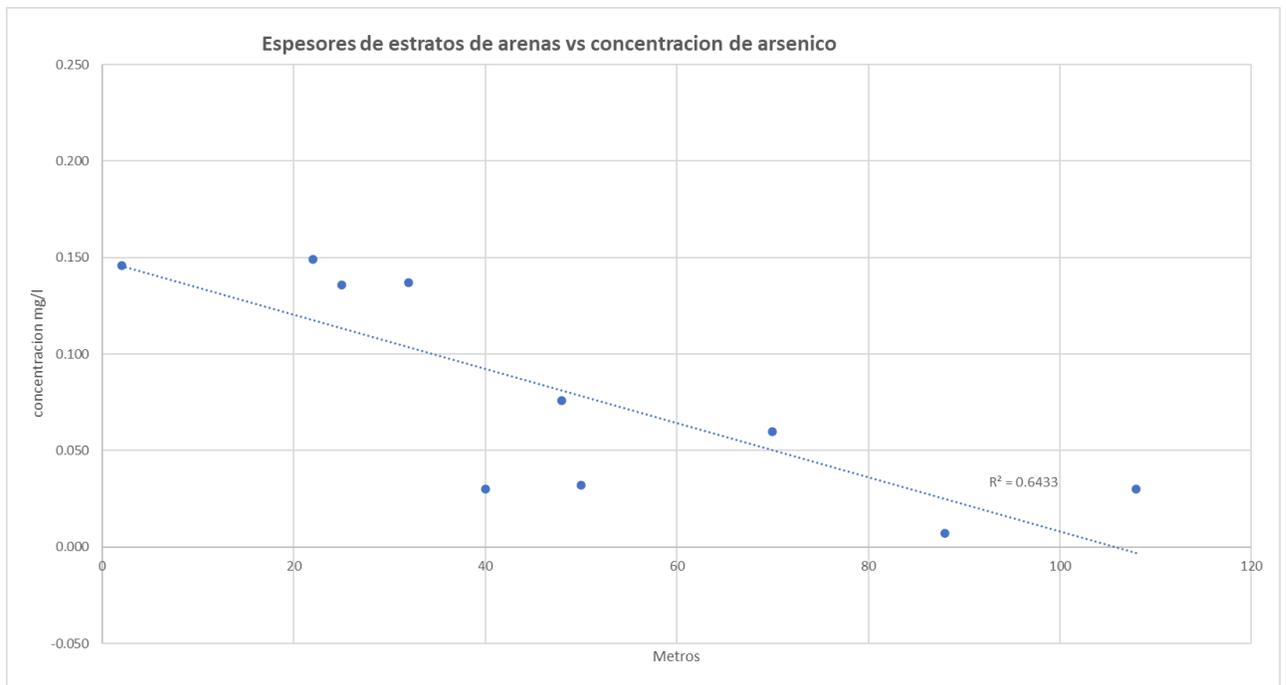


Figura 32. Grafica de espesor de arenas vs concentración de arsénico.



El análisis gráfico muestra un alto nivel de correlación de Pearson (r) en ambos gráficos, positivo con 0.58 para las arcillas y negativo con un 0.80 para las arenas. Lo anterior confirma que al incrementar las arcillas y disminuir las arenas aumentan las concentraciones de arsénico y viceversa, como se pudo ver en los 3 pozos cuyos perfiles litológicos fueron mostrados anteriormente.

Correlacionando todos los análisis anteriores podemos inferir que las sierras del acuífero Meoqui-Delicias son responsables del origen del arsénico en las aguas subterráneas, empezando por los afloramientos de rocas con alto contenido de arsénico que son erosionados y después depositados en la zona del valle de una manera específica como se observa en la **Figura 33**. Lo anterior dependería de la pendiente que se presenta en la zona de transición de la sierra al valle, como se observa en la Sierra Alta, en donde existen 2 tipos de pendiente. De un lado se tiene una zona con pendiente suave, lo que ocasionaría que el material se deposite no muy lejos de donde se origina; por otro lado, una pendiente más marcada ocasionaría que el material llegara más lejos de su zona de origen. Esto explicaría que la zona con altas concentraciones de arsénico se ubica muy cerca de la Sierra Alta, donde posiblemente se han ido acumulando lentes de arcillas durante años. Esto se confirma en la **Figura 34**, sustraída del documento CONAGUA (2020) donde se realizó una sección que corta este punto. Se observan espesores de materiales aluviales y fluviales de hasta 500 metros de espesor en la zona del valle, donde el material fino se encuentra en la capa superior, que es donde se localizan la mayoría de los pozos estudiados. En el caso de la zona centro y sur del acuífero el material depositado proveniente de la Sierra de Humboldt y de la sierra La Boquilla se deposita lejos de la zona del cauce del río Conchos, donde se encuentran la mayoría de los aprovechamientos.

ACUÍFERO MEOQUI-DELICIAS

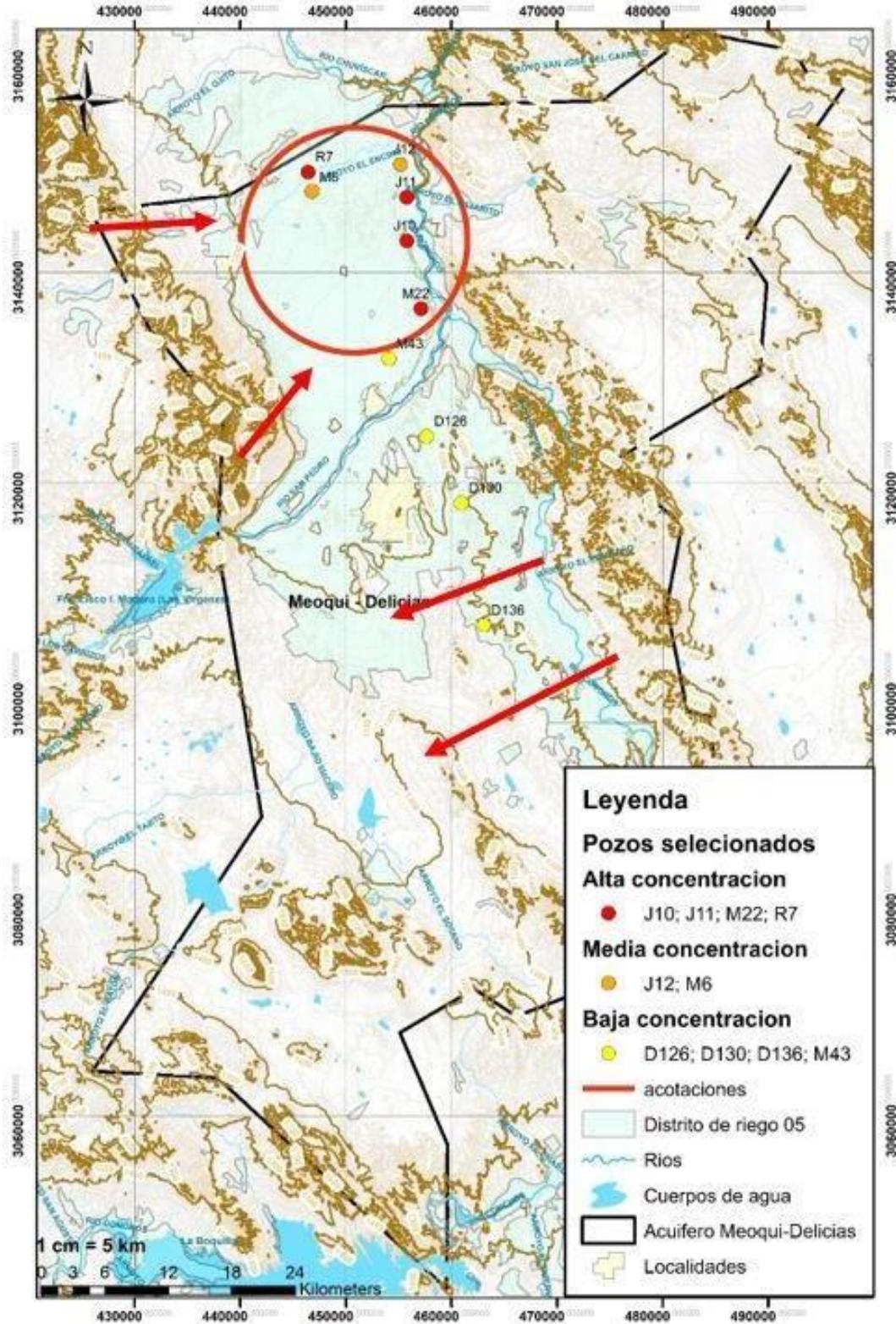


Figura 33. Comportamiento de la erosión y depositación de material.

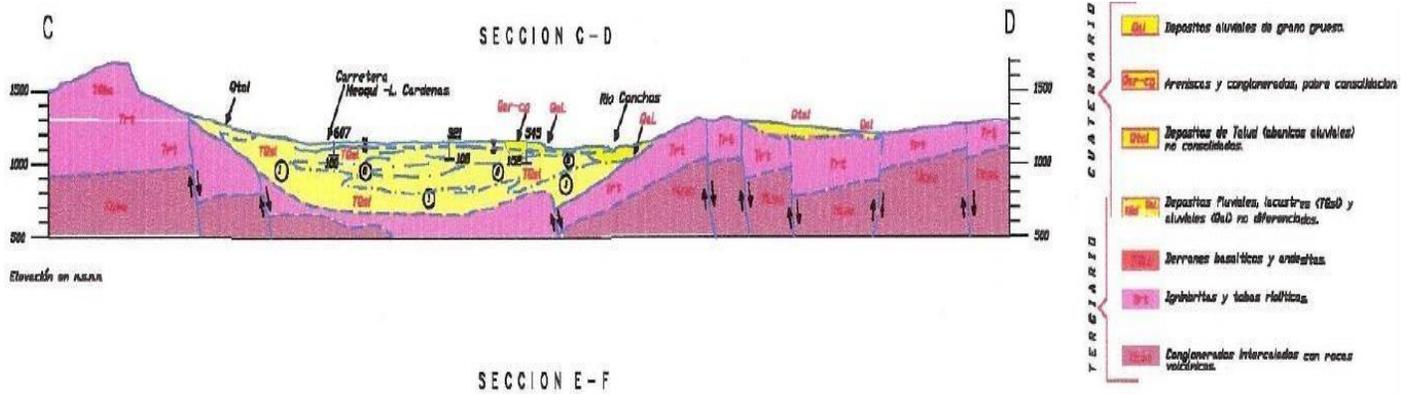


Figura 34. Comportamiento de la erosión y depositación de material (CONAGUA, 2020).

5.6 Análisis de tendencias en el tiempo de la concentración de arsénico en los pozos

En este apartado se explica el análisis de las tres bases de datos correspondientes a las concentraciones de arsénico para los años 2003, 2006 y 2021, donde se identifica el comportamiento de dicho elemento a lo largo de este periodo de casi 20 años en cada uno de los pozos analizados.

En el Anexo 4 se encuentran las gráficas realizadas para cada una de las localidades, en donde se comparan los niveles de As a través del tiempo. Se realizó el análisis de regresión lineal a los datos de cada pozo donde se obtuvo la pendiente de la línea tendencia como se muestra en la **Tabla 5**. Con base a dichos valores se clasificaron los pozos en tres categorías dependiendo del valor obtenido y la condición que presentan las concentraciones de arsénico. Estas tres categorías se definen como *al alza* (pendiente entre 0.0016-0.0137) que se identifica con un color naranja; incremento o decremento *nulo o casi cero* (-0.0009-0.0002) la cual se identifica con un color amarillo; y por último *a la baja* (entre -0.0093 y -0.0011) que se identifica con un color verde. Los resultados de la clasificación se pueden observar en la **Figura 35** con los colores ya mencionados.



Tabla 5. Resultados del análisis de tendencia de cada pozo

Muestra	Municipio	Localidad	Pendiente
M42	Meoqui	Progreso	-0.0093
D130	Delicias	Santa Fe	-0.0046
M39	Meoqui	Buenavista	-0.0038
LC67	La Cruz	Est. La Cruz	-0.0032
M6	Meoqui	Potrero del Llano	-0.0032
S47	Saucillo	Orranteño	-0.0024
J10	Julimes	La Regina	-0.0023
R38	Rosales	Orinda	-0.0023
LC64	La Cruz	Panamericana	-0.0020
J14	Julimes	El Carrizo	-0.0017
J15	Julimes	Julimes	-0.0014
D126	Delicias	Fco. I. Madero	-0.0012
S57	Saucillo	Col. Vicente Gro.	-0.0012
S98	Saucillo	Est. Saucillo	-0.0011
J12	Julimes	Labor Nueva	-0.0009
S50	Saucillo	Altamirano	-0.0009
S58	Saucillo	Fco. Mezquital	-0.0009
LC69	La Cruz	Corraleño de Juárez	-0.0008
M23	Meoqui	Loreto	-0.0008
M40	Meoqui	Est. Consuelo	-0.0008
J13	Julimes	La Boquilla	-0.0006
J16	Julimes	ExHda. Humboldt	-0.0006
J17	Julimes	El Gramal	-0.0006
S44	Saucillo	Ampliación la Merced	-0.0006
S46	Saucillo	Santa Rosa	-0.0006
M43	Meoqui	Lomas Consuelo	-0.0005
S56-3	Saucillo	Saucillo P3-Panteon	-0.0005
J18	Julimes	Las Arenillas	-0.0004
M25	Meoqui	Gran Morelos	-0.0004
D136	Delicias	Armendáriz	-0.0003
J11	Julimes	Esperanza	-0.0003
R2	Rosales	Barranco Bco.	-0.0002
S52	Saucillo	Fco. I. Madero. (Gato N.)	-0.0002
M24	Meoqui	Las Puentes	-0.0001
M21	Meoqui	Gpe. Victoria	0.0001
M19	Meoqui	El Torreón	0.0002
R7	Rosales	Salón de Actos	0.0016



M22	Meoqui	Los García	0.0040
M5	Meoqui	Col. 10 de mayo	0.0066
J9	Julimes	San José	0.0137

Los resultados de dicha clasificación se muestran a continuación:

a) Alza: el 10 % de las muestras fueron colocadas en esta categoría. Estas muestras presentan una pendiente entre 0.0016-0.0137, por lo que se establece que las concentraciones de arsénico conforme el tiempo va en aumento, tomando en cuenta que todos los pozos clasificados en este apartado se encuentran distribuidos en la parte norte del acuífero, es decir, en el valle delimitado por la confluencia de los ríos y cercanos a las sierras Humboldt y Alta. Las localidades que se encuentran en esta clasificación son Los García y la Col. 10 de mayo (M5, M22) ubicadas en el municipio de Meoqui, Salón de Actos (R7) en Rosales y San José (J9) en el municipio de Julimes. Relacionando los pozos que se encuentran a la alza con los espesores de arcilla visto en los perfiles podemos observar que dos de los perfiles realizado y que se pueden observar en la sección de Anexos corresponden a los García y a Salón de Actos se encuentran con un comportamiento al alza, además de encontrarse ubicados en la zona con mayor problema de arsénico como se vio en la figura 33, lo que explicaría su alto contenido de estratos arcillosos con alto contenido de arsénico por encontrarse en la principal zona de depositación de la sierra aledañas.

b) Incremento o decremento nulo o casi cero: el 55% de las muestras fueron clasificadas en este apartado. Presentan una pendiente entre -0.0009 y 0.0002, lo que indica tanto un incremento como decremento mínimo en las concentraciones de arsénico a lo largo del tiempo. Estas localidades, a diferencias de las que se encuentran al alza, están bien distribuidas en todo el acuífero y no muestran algún tipo de patrón o zona donde se concentren. En este caso se encuentran en la parte norte del acuífero y pertenecientes al municipio de Julimes la Esperanza, La Boquilla y Las Arenillas (J11, J13 Y J18); también las ubicadas en la parte central, así como Armendáriz (D136) y Altamirano (S50) ubicadas



en los municipios de Delicias y Saucillo. Por último, en la parte sur se tienen localidades pertenecientes al municipio de La Cruz como Corraleño de Juárez (LC69).

c) Baja: El 35 % restante de las muestras se encuentra clasificada en esta categoría; presentan una pendiente entre -0.0093 y -0.0011, lo que indica un ligero decremento en las concentraciones de arsénico con respecto al tiempo. De igual manera que la clasificación anterior, las localidades de esta categoría se encuentran muy distribuidas dentro del acuífero. En la parte norte se encuentran Potrero del Llano (M6) en Meoqui, la Regina, El Carrizo y Julimes (J10, J14, J15) en Julimes y Orinda (R38) en Rosales. En la región central se encuentran Santa Fe, Francisco I. Madero (D126 Y D130) de Delicias, y Orranteño (S47) en Saucillo. Por último, en la parte sur están Estación La Cruz y Panamericana (LC64 y LC69) del municipio La Cruz.

Con base en lo anterior se concluye que la mayoría de los pozos (55 %) no presentaron cambios significativos a lo largo del tiempo, es decir, su concentración de arsénico se mantiene. Los pozos que presentaron una tendencia a la baja (35 %) presentaron ligeros decrementos en la mayoría de los casos, salvo algunas excepciones como El Progreso y Santa Fe (M42, D130) que sí presentaron decrementos considerables. En la ubicación de estos pozos tampoco se detectó algún patrón ya que se encuentran distribuidas por todo el acuífero. Por último, en las localidades que presentaron un comportamiento de alza (10 %) los aumentos fueron considerables (entre 0.05 y 0.1 mg/L). Estas localidades son la Col.10 de Mayo y Los García, de Meoqui; San José, de Julimes; y Salón de Actos, de Rosales. Todos se ubican en la zona donde se han presentado mayores concentraciones de arsénico, que corresponde al valle ubicado al norte del acuífero, entre la Sierra Alta y Sierra de Humboldt, responsables de la depositación de lentes de arcillas ricas en arsénico.



5.7 Histogramas de frecuencia

Se realizaron histogramas de frecuencia para el análisis del comportamiento del arsénico en las tres fechas de muestreo (2003, 2006 y 2021). Para el año 2003 como se observa en la **Figura 36** la mayor frecuencia se encuentra en el rango de 0.05-0.1 mg/L, lo que corresponde a 18 de los 38 pozos. En segundo lugar, se encuentra el rango de 0.1 mg/L a 0.2 mg/L con 10 muestras, el rango de concentraciones más altas 0.2-0.5 mg/L presenta 3 muestras. El valor promedio de concentración en el área de estudio para esta fecha fue de 0.105 mg/L.

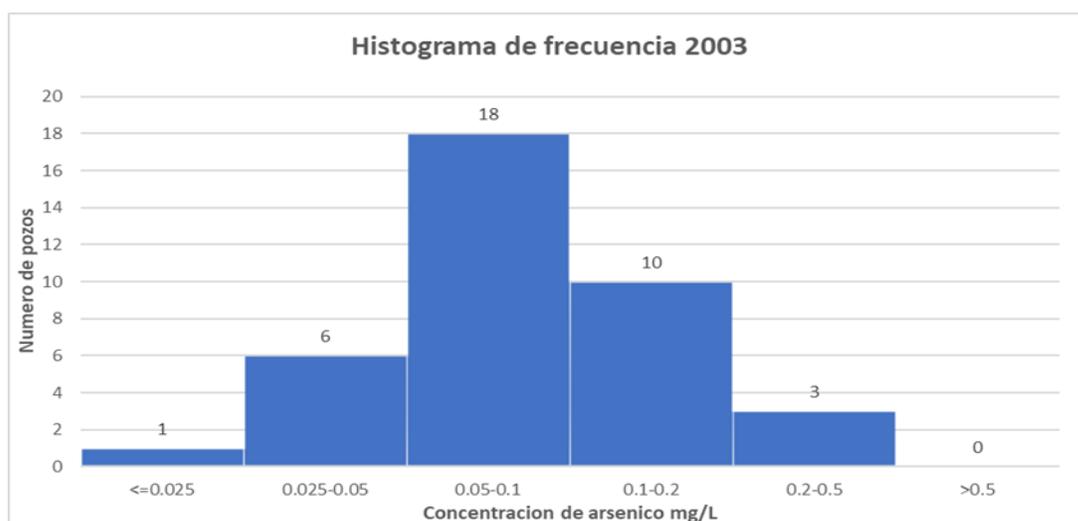


Figura 36. Histograma de frecuencia 2003.

Los datos correspondientes al 2006 presentan una ligera diferencia en comparación con los del 2003, ya que se cuenta con 2 pozos más para un total de 40. La mayor frecuencia continúa siendo para el intervalo de concentración de arsénico 0.05-0.1 mg/L con un total de 18 muestras; en segundo lugar, se encuentra el rango de 0.025-0.05 mg/L con 11 muestras, mientras que, para el rango más alto de concentraciones, que va de 0.2-0.5 mg/L, la frecuencia es similar al 2003, con un total de 3 muestras. Cabe resaltar que entre ambas fechas



la frecuencia de valores mayores a 0.1 mg/L disminuyó de 13 a sólo 10 (**Figura 37**). El valor promedio de concentración de arsénico en el área de estudio para 2006 fue de 0.088 mg/L.

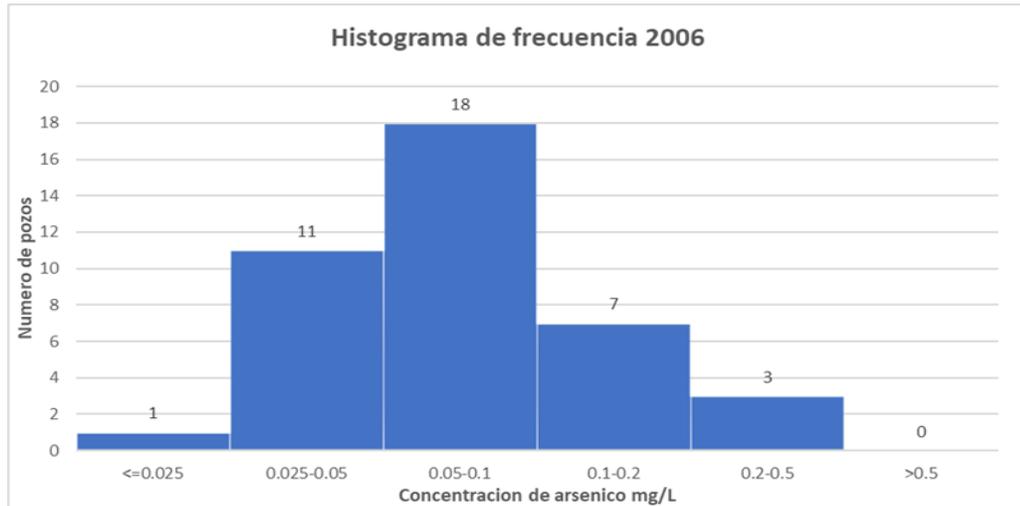


Figura 37. Histograma de frecuencias 2006.

Por último, los resultados obtenidos del muestreo 2021 muestran un comportamiento similar al del 2006, con las mayores frecuencias en los rangos de concentración 0.05-0.1 mg/L y 0.025-0.05 mg/L (**Figura 38**). En este caso, el valor promedio de concentración de arsénico en los 40 pozos analizados es de 0.087 mg/L.

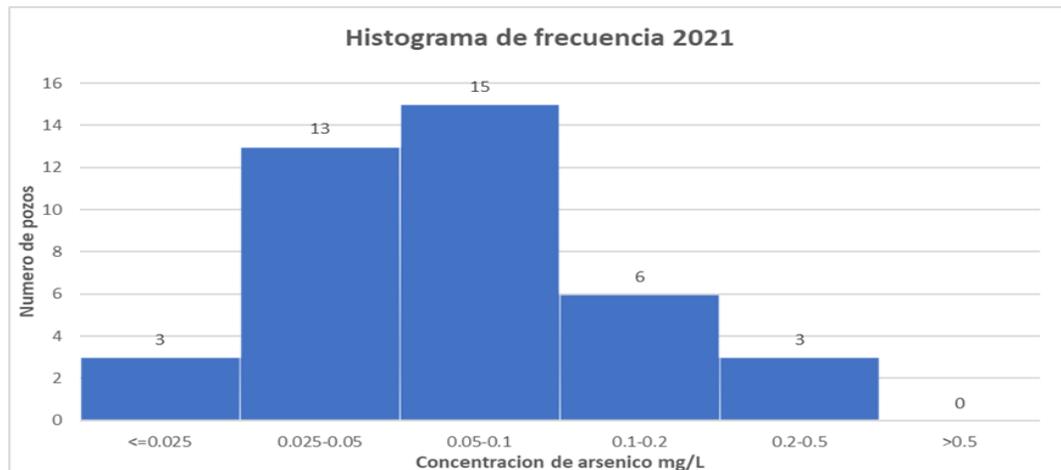


Figura 38. Histograma de frecuencias 2021.



Como se puede observar el valor promedio de arsénico en los pozos tuvo una disminución durante los primeros 3 años, pero se mantuvo prácticamente constante durante los últimos 15 años. Esto tiene sentido y se relaciona con el nulo o mínimo descenso de la concentración de arsénico en el 90 % de los pozos, de acuerdo al análisis presentado en el apartado 5.6 de este documento.



Capítulo 6: Conclusiones y recomendaciones

6.1 Conclusiones

A continuación, se presentan las conclusiones obtenidas del análisis de datos de campo y de las concentraciones de arsénico provenientes de 40 pozos de agua potable ubicados en el acuífero Meoqui-Delicias en el estado de Chihuahua, durante los años 2003, 2006 y 2021.

- A lo largo del tiempo las mayores concentraciones de arsénico en el acuífero se han presentado en la zona norte del mismo, aguas debajo de la confluencia de los ríos Conchos y San Pedro, principalmente en localidades de los municipios de Julimes y Meoqui. En algunos pozos de esta área se observaron incrementos en la concentración de dicho elemento.
- En la zona centro del acuífero durante el período 2003-2021 las concentraciones de arsénico mostraron cambios ligeros, salvo algunas excepciones en las que fue más notorio un decremento.
- En la zona sur se observó disminución en las concentraciones en algunos pozos de las localidades de los municipios de Saucillo y La Cruz.
- Se confirmó la presencia de arsénico en muestras de roca madre (toba riolítica) procedente de una de las sierras circundantes al acuífero, con valores de dicho elemento por encima del promedio típico en las rocas ígneas.
- El análisis petrográfico reveló la afectación de la matriz de la roca por óxidos metálicos derivados de la alteración de la roca por las condiciones atmosféricas, cuya presencia sugiere ser la posibilidad de liberación de arsénico al entrar en contacto con el agua subterránea.
- La carencia de cubierta vegetal en los afloramientos de roca ígnea favorece su intemperización, alteración en su composición original y desplazamiento hacia la zona de los valles que integran el acuífero.



- No se encontró una relación entre la profundidad del nivel dinámico y la concentración de arsénico.
- Existe una correlación directa entre la concentración de arsénico en el agua subterránea y los espesores de los estratos de arcillas en los pozos de extracción. La correlación con los estratos de arenas es inversa.
- Durante el periodo 2003-2021 la mayor frecuencia observada corresponde al rango de concentración de arsénico de 0.025-0.1 mg/L.
- Se observa una disminución en el valor promedio de arsénico en el acuífero durante el período 2003-2021.

6.2 Recomendaciones

Con base en las conclusiones obtenidas se generaron las siguientes recomendaciones para futuras investigaciones y acciones a ejecutar:

- Establecer una red de monitoreo de calidad de agua subterránea para realizar el análisis de arsénico y otros elementos de manera periódica, así como también de piezometría, con el fin de generar una base de datos consistente con la que se puedan realizar análisis estadísticos más rigurosos.
- Realizar un análisis fisicoquímico y de arsénico en los sedimentos y depósitos aluviales, principalmente en la zona norte del acuífero.
- Realizar análisis petrográficos más detallados de las rocas de las sierras circundantes para conocer las especies minerales de las cuales están formadas.
- Complementar los estudios de cortes litológicos existentes con información de un mayor número de pozos y corroborar la presencia de altas concentraciones de arsénico en estratos arcillosos, a fin de incorporar este conocimiento en la ubicación de posibles nuevas fuentes de abastecimiento.



Referencias

Arreguín F., Chávez R., Soto P. (2011). “Una revisión de la presencia de arsénico en el agua subterránea en México”, VIII Congreso Nacional de Aguas subterráneas, Querétaro, México

Barrera, Y. (2008). “*Estudio hidrogeoquímico y de vulnerabilidad a la contaminación del Acuífero Meoqui-Delicias del Estado de Chihuahua*”. Tesis de Maestría. Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de Chihuahua.

Baes, C. F., Mesmer, R.E. (1986). "The hydrolysis of cations". R.E. Krieger Publisher Co., Malabar, Florida.

Biswas, A., Hendry, M. J., and Essilfie-Dughan, J. (2016). Geochemistry of arsenic in low sulfide-high carbonate coal waste rock, Elk Valley, British Columbia, Canada. *Sci. Total Environ.* 579, 396–408.

Biswas, A., Majumder, S., Neidhardt, H., Halder, D., Bhowmick, S., Mukherjee, A., Kundu, A., Saha, D., Berner, Z., Chatterjee, D. (2011) “Groundwater chemistry and redox processes: Depth dependent arsenic release mechanism”. Department of Chemistry, University of Kalyani, Kalyani 741 235, West Bengal, India.

Bundschuh, J., Pérez, A., Litter, M.I. (2008). IBEROARSEN, Distribución del arsénico en las regiones ibérica e iberoamericana. CYTED.

Comisión Nacional del Agua (CNA). (2009). Actualización de la Disponibilidad Media Anual de Agua Subterránea Acuífero (0831) Meoqui-Delicias, Estado de Chihuahua.

Comisión Nacional del Agua. (2020). “*Actualización del Estudio Geohidrológico del Acuífero Meoqui-Delicias, Chihuahua*”. Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas.

Comisión Nacional del Agua. (2020). Subdirección General Técnica. Gerencia de Calidad del Agua, Red Nacional del Monitoreo de Calidad del Agua (RENAMECA) a partir de 2012.

Cortés, F., Chávez, R., Soto, P. (2011) “Una revisión a la presencia de arsénico en el agua subterránea en México”. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).

Curiel, P., Mena, G. (9 de marzo de 2022) “ Veneno en mi agua” Datacritica y 5° elemento recuperado de Veneno en mi agua (datacritica.org)

Dinwiddie, E., Ming Liu, X. (2018). “*Examining the Geologic Link of Arsenic Contamination in Groundwater in Orange County, North Carolina*”. Departamento de Ciencias Geológicas, Universidad de Carolina del Norte, Estados Unidos.



Domínguez, F. A. (2013). “*Presencia de arsénico en agua subterránea, suelos y cultivo de alfalfa del municipio de Julimes, Chihuahua*”. Tesis de Maestría. Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de Chihuahua.

Emsley, J. (1992): *The Elements*, 2nd edition. -Oxford University Press; New York.

Espino-Valdés, M. S., Barrera-Prieto, Y., Herrera-Peraza, E. (2009). Presencia de arsénico en la sección norte del acuífero Meoqui-Delicias del estado de Chihuahua, México. *TECNOCENCIA Chihuahua*, 3(1) 9-18.

Galarza, O. (2011). Caracterización Hidrogeoquímica y Geológica del área del manantial El Pandeño en el municipio de Julimes, Chihuahua. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma de Chihuahua (UACH).

Galindo, G., Fernández, J., Parada, M., Torrente, D. (2005) “Arsénico en aguas: Origen, movilidad y tratamiento”. Seminario hispano latinoamericana sobre temas de hidrología subterránea, IV congreso hidrogeológico argentino.

Gutiérrez, M., Espino Valdés, M. S., Alarcón Herrera, M. T., Pinales Munguía, A., & Silva Hidalgo, H. (2021). Arsénico y flúor en agua subterránea de Chihuahua: su origen, enriquecimiento, y tratamientos posibles: Arsenic and fluoride in groundwater from Chihuahua: origin, enrichment, and possible treatments. *TECNOCENCIA Chihuahua*, 15(2), 95-108.

Hermosillo, M. C., Valles, M. C., Ballinas, M. L., Rocha, B. A., Prieto, J. A. (2018). “*Trazabilidad de arsénico en agua de riego agrícola en el centro sur del estado de Chihuahua, México*”. Proyecto de investigación. Facultad de Ciencias Agrotecnológicas, Facultad de Ciencias Químicas, Facultad de Zootecnia y Ecología. Universidad Autónoma de Chihuahua.

Hernández, C. (2019). “*Desalinización de agua subterránea con alto contenido de arsénico mediante un sistema de destilación solar*.” Tesis de Maestría. Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de Chihuahua.

Jakariya, Md. (2007) “*Arsenic in tubewell water of Bangladesh and approaches for sustainable mitigation*” Tesis de doctorado. Royal Institute of Technology (KTH)

Lesser, J. M., Lara, F. (2006). “*La geología y el arsénico en el acuífero del Valle del Guadiana, Durango, México*”. Empresa Lesser y Asociados, S. A. de C.V.

Lombardo, Y., Reinheimer, J., Piacentini, R. (2020). “*Arsénico: Impactos sobre la salud y métodos para descontaminar*” Comisión de Ambiente y Salud de la Academia de Ciencias Médicas de Sant Fe.

Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994. Salud Ambiental. Agua para Uso y Consumo Humano. Límites Permisibles de Calidad y Tratamientos a que Debe Someterse el Agua para su Potabilización. Secretaría de Salud. México, D. F.



Mortimer, C. E. (1987). *Chemie*, 8. Aufl. - Georg Thieme Verlag; Stuttgart.

Murray, J., Nordstrom, D. K., Dold, B., and Kirschbaum, A. (2016). "Distinguishing potential sources for As in groundwater in Pozuelos Basin, Puna region Argentina," in *Arsenic Research and Global Sustainability*, Eds P. Bhattacharya, M. Vahter, J. Jarsjö, J. Kumpiene, A. Ahmad, C. Sparrenbom, G. Jacks, M. E. Donselaar, J. Bundschuh, and R. Naidu (London: Taylor and Francis Group), 94–96.

Nicolli, H. B., Bundschuh, J., Blanco, M. D. C., Tujchneider, O. C., Panarello, H. O., Dapeña, C., et al. (2012). Arsenic and associated trace-elements in groundwater from the Chaco-Pampean plain, Argentina: results from 100 years of research. *Sci. Total, Environ.* 429, 36–56.

Nriagu J. O. (1994): *Arsenic in the environment - Part II: Human Health and Ecosystem Effects*. - *Advances in Environmental Science and Technology*; Bd.27.- John Wiley and Sons Inc.; New York.

Organización Mundial de la Salud. (16 de marzo de 2021a). "Agua, datos y cifras". Recuperado de: [Agua \(who.int\)](http://agua.who.int).

Organización Mundial de la Salud. (11 de mayo de 2021b). "Arsénico" Recuperado de: [Arsénico \(who.int\)](http://arsenico.who.int).

Onishi, P. H. (1969). "Arsenic. Handbook of Geochemistry". Ed. By Wadepohl, K.H. Springer. Vol. 11.

Rascón, B. (2011). "*Estudio hidrogeoquímico y de vulnerabilidad a la contaminación de Porción Sur del Acuífero Meoqui-Delicias del Estado de Chihuahua*". Tesis de Maestría. Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de Chihuahua.

Rangel, E., Montañez, L., Luévano, M., Balagurusamy, N. (2015). "Impacto del arsénico en el ambiente y transformación por microorganismos". Universidad Autónoma de Coahuila

Rivera, E. (2016) "*Afectaciones a la salud por la presencia de arsénico (arsenicismo) en la Comarca Lagunera*". Servicio Geológico Mexicano, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

Rodríguez, D. (2022). Evolución espacial y temporal de la presencia de fluoruros en el acuífero Meoqui-Delicias, Chihuahua. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Chihuahua (UACH).

Sánchez, F. J. (2012). "*Evolución geoquímica de las aguas subterráneas*". Departamento de Geología, Universidad de Salamanca.

Smedley, P. L., Kinniburgh, D. G. (2002). "*A review of the source, behavior and distribution of arsenic in natural Waters*". Applied Geochemistry, British Geological Survey, Wallingford, Oxon.



Welch, A. B., Westjohn, D. B., Helsel, D. R., and Wanty, R. B. (2000). Arsenic in groundwater of the United States: occurrence and geochemistry. *Groundwater* 38, 589–604.



Anexo

Comparación entre el nivel dinámico y la concentración de arsénico para el 2021

Localidad	2021 (mg/L)	Profundidad ND (m)
Fco. I.Madero	0.032	45.00
Santa_Fe	0.007	52.00
Armendariz	0.030	57.00
Labor_Nueva	0.060	38.00
La_Boquilla	0.059	25.00
El_Carrizo	0.076	19.00
ExH_Humboldt	0.070	12.00
El_Gramal	0.051	3.00
Las_Arenillas	0.035	3.00
Panamericana	0.055	15.80
Est.la_Cruz	0.051	20.10
Corraleo_de_Juarez	0.057	14.20
El_Torreón	0.033	12.00
Gpe._Victoria	0.062	10.10
Loreto	0.050	9.30
Las_Puentes	0.043	11.00
Gran_Morelos	0.046	14.00
Est._Consuelo	0.042	33.10
Lomas_Consuelo	0.030	18.00
Barranco_Bco.	0.025	63.50
Ampliacion_la_Merced	0.038	41.30
Santa_Rosa	0.035	27.00
Orranteño	0.044	15.20
Altamirano	0.037	16.20
Fco. I. Mad. (Gato_N.)	0.043	47.00
Saucillo_P3-Panteon	0.022	50.00
Fco.Mezquital	0.054	31.00
La_Regina	0.149	20.00
Esperanza	0.136	21.20
Julimes	0.124	27.00
Los_García	0.137	18.90
Buenavista	0.107	17.00
Potrero_del_Llano	0.076	65.00
Orinda	0.093	33.00
Col._Vicente_Gro.	0.060	80.00
Est._Saucillo	0.057	85.00
Progreso	0.236	23.00
Salón_de_Actos	0.146	61.00
San_José	0.489	27.20
Col. 10 de Mayo	0.478	36.00



Anexo 3

Perfiles de pozos seleccionados

SALON DE ACTOS		
Profundidad (m)	ND 61 m	As 0.146 mg/L
0-2		arenas
2-4		arcillas
4-6		arcillas
6-10		arcillas
10-24		arcillas
24-26		arcillas
26-61		arcillas
61-100		arcillas

LOS GARCIA		
Profundidad (m)	ND 18.9 m	As 0.137 mg/L
0-6		arenas
6-8		arenas
8-18.9		arcillas
18.9-24		arcillas
24-42		arcillas
42-62		arenas
62-66		arenas
66-70		arcillas

LA ESPERANZA		
Profundidad (m)	ND 21.2 m	AS 0.136 mg/L
0-8		arcillas
8-21-2		arenas
21.2-60		arcillas
60-84		arcillas
84-92		arenas
92-96		arenas
96-100		arcillas



LABOR NUEVA		
Profundidad (m)	ND 38 m	As 0.060 mg/L
0-2.0		arcillas
2-10.0		arenas
10-38.0		arenas
38-46		arcillas
46-56		arenas
56-80		arenas

FCO I MADERO		
Profundidad (m)	ND 45 m	AS 0.032 mg/L
0-10.0		arenas
10-45.0		arcillas
45-50		arcillas
50-60		arcillas
60-74		arenas
74-85		arenas
85-88		arenas
88-92		arenas
92-100		arenas

LOMAS CONSUELO		
Profundidad (m)	ND 18 M	AS 0.030 mg/L
0-14		arenas
14-18		arcillas
18-50		arcillas
50-52		arenas
52-76		arcillas
76-100		arenas



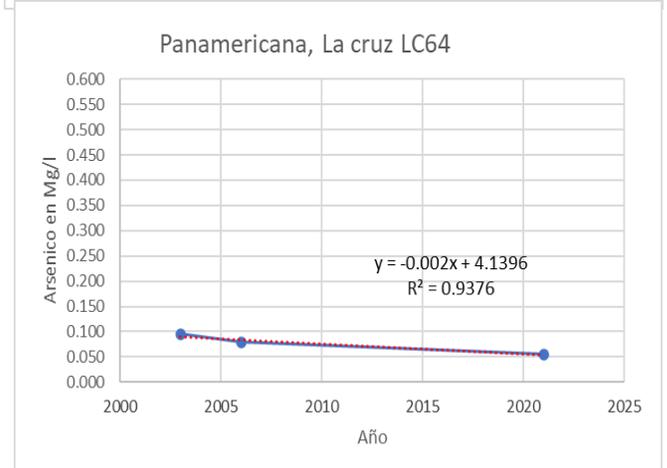
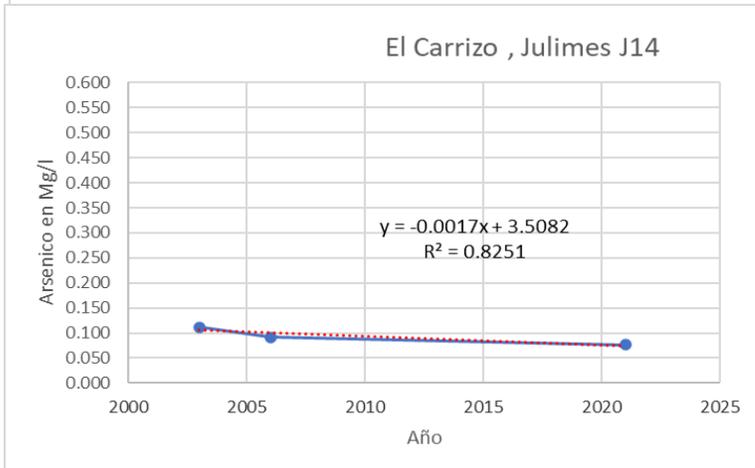
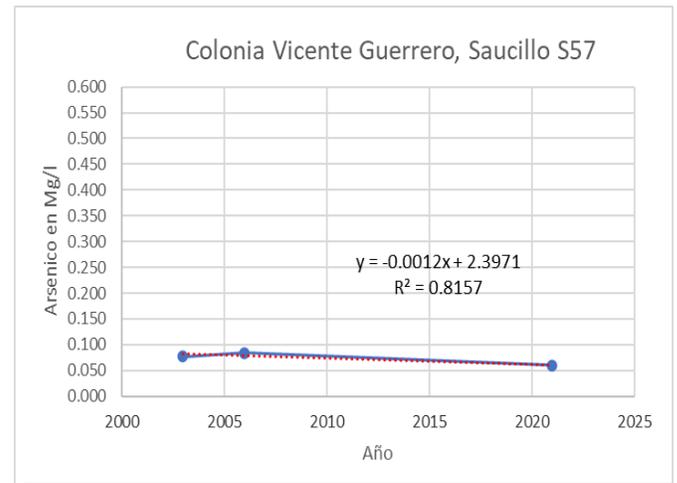
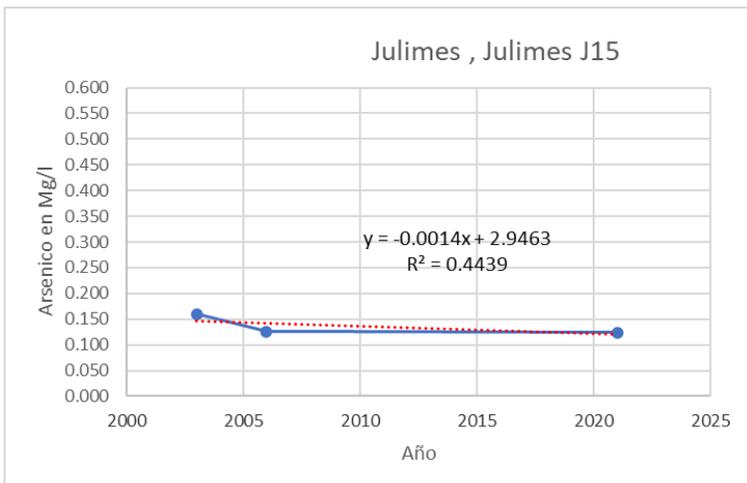
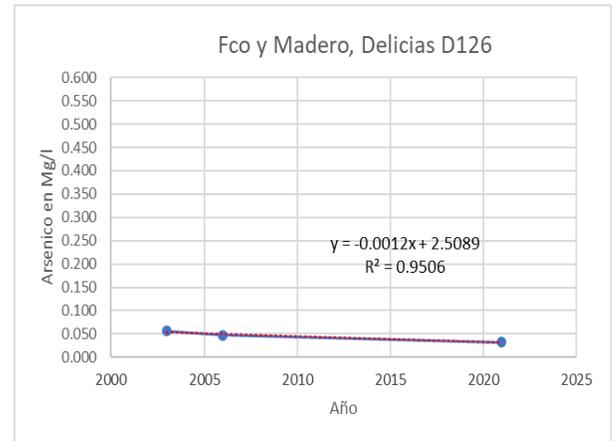
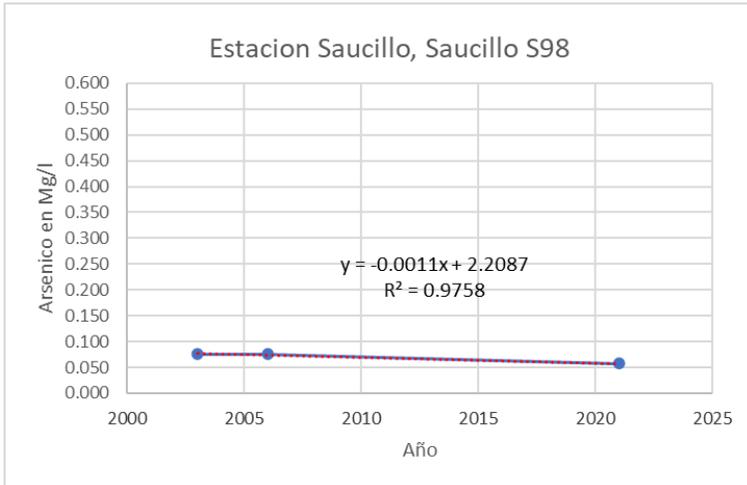
ARMENDARIZ		
Profundidad (m)	ND 57 M	AS 0.030 mg/L
0-30		arenas
30-34		arenas
34-38		arcillas
38-57		arenas
57-62		arenas
62-64		arcillas
64-76		arenas
76-92		arenas
92-96		arcillas
96-98		arcillas
98-110		arenas
110-120		arenas

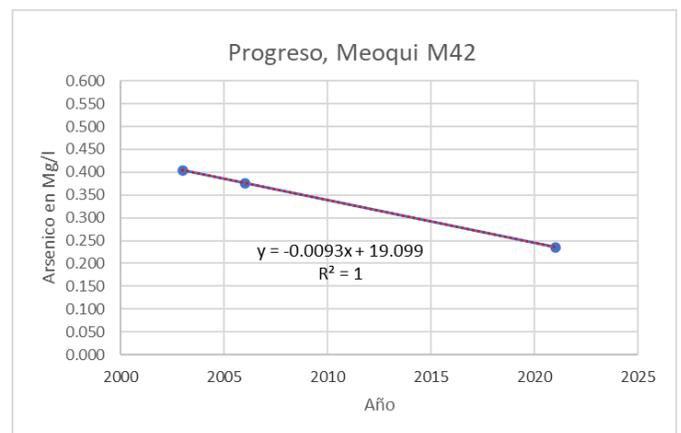
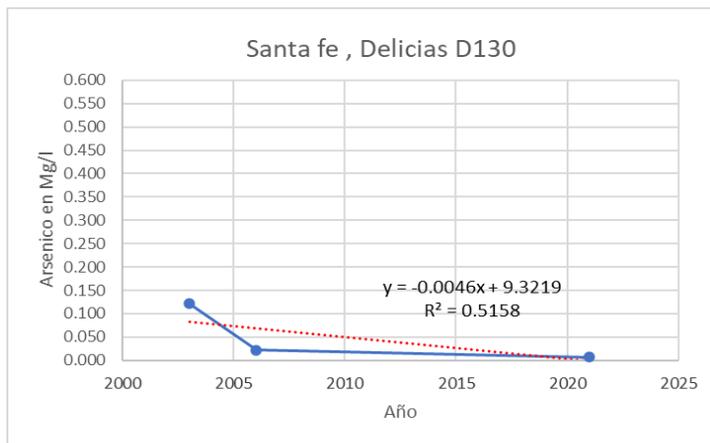
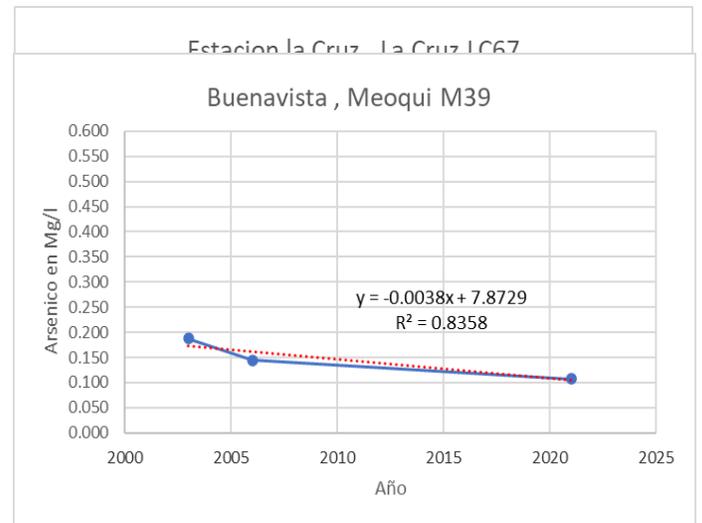
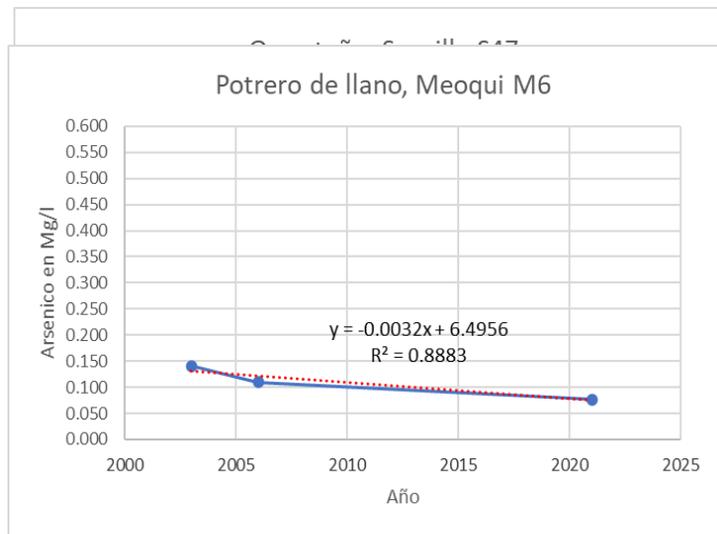
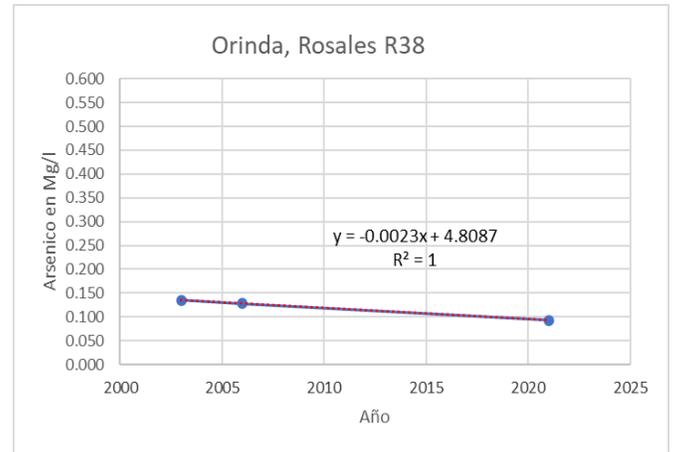
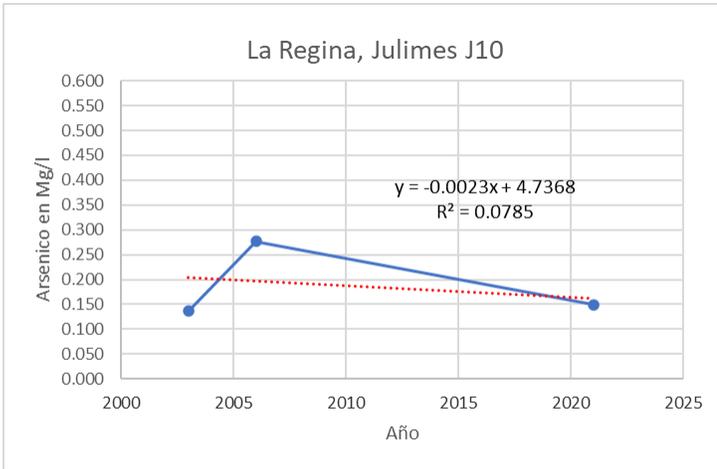


Anexo 4

Gráficas de tendencia de la concentración de arsénico en el tiempo de cada pozo.

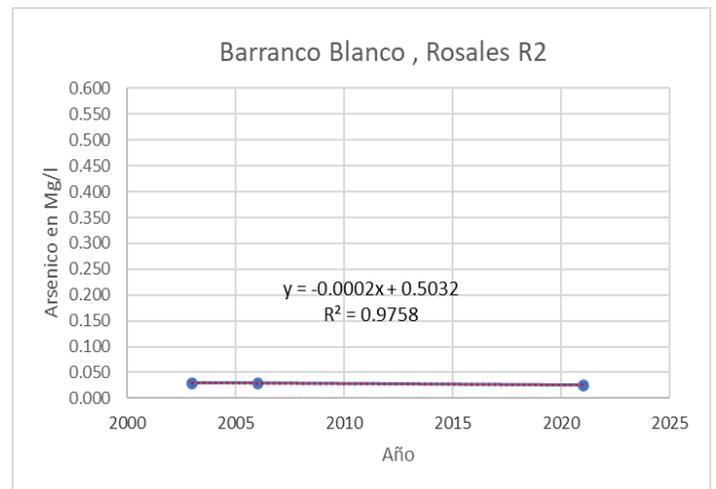
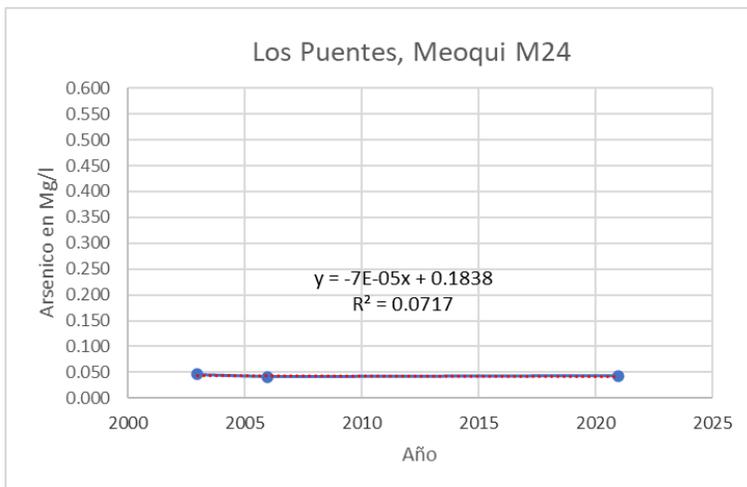
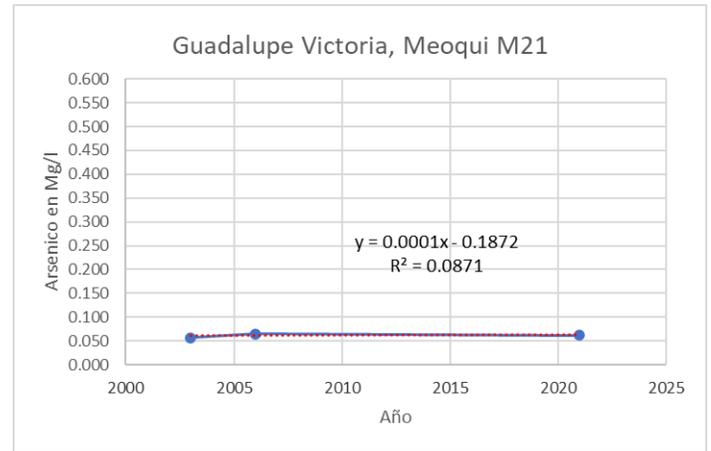
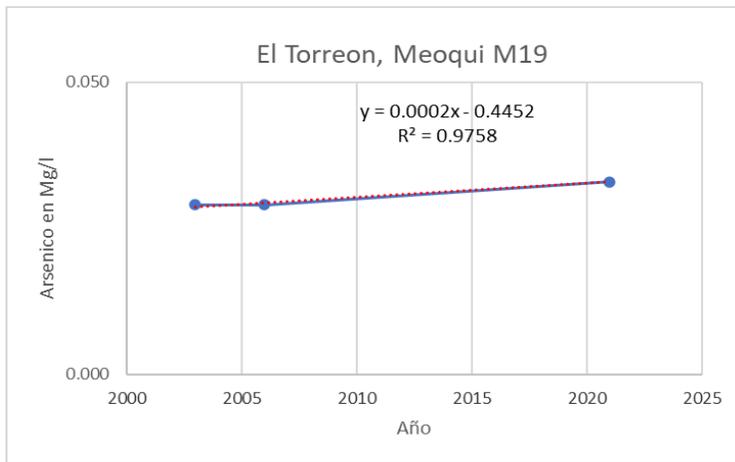
a) Pendiente negativa (baja)

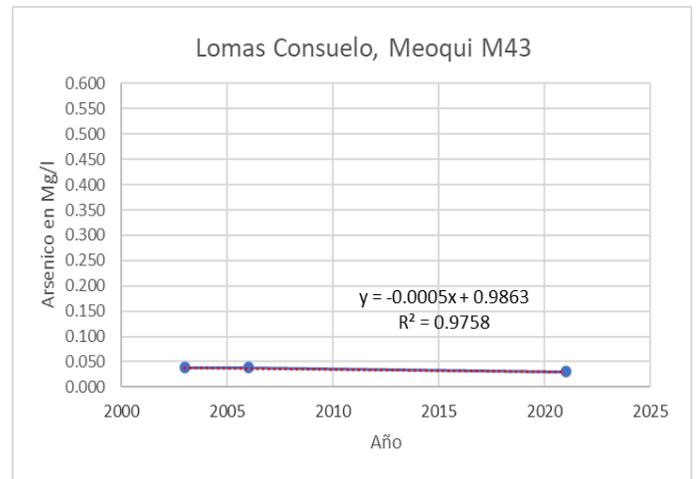
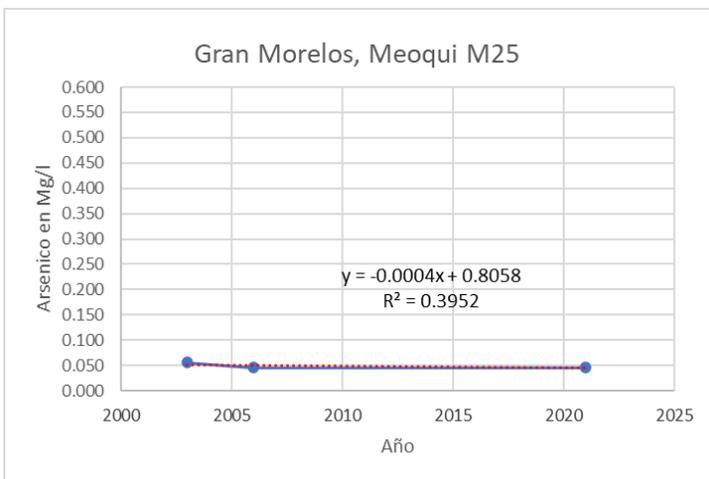
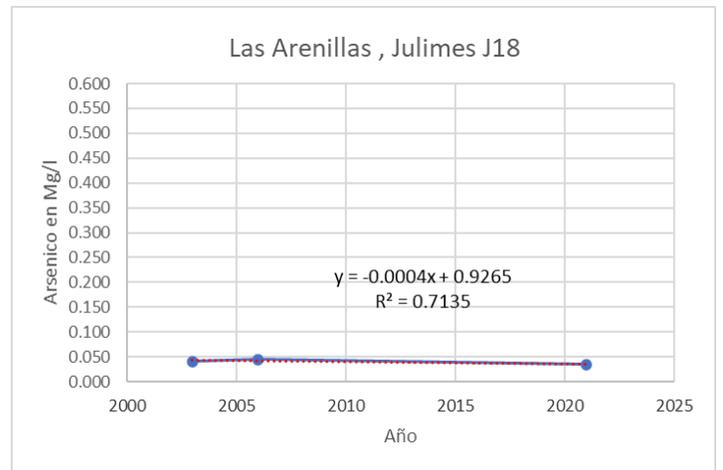
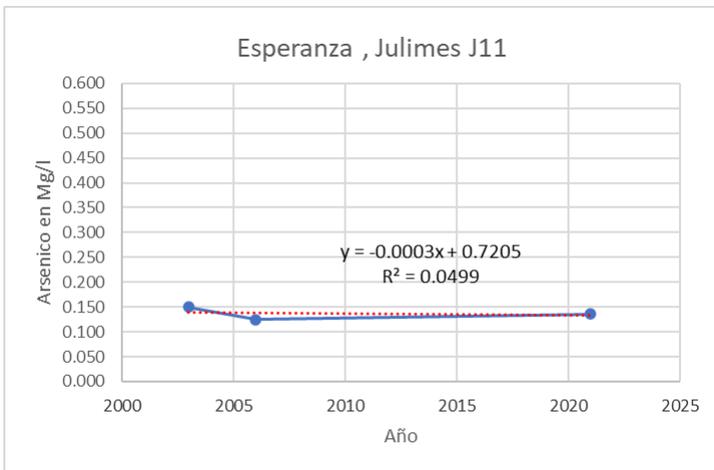
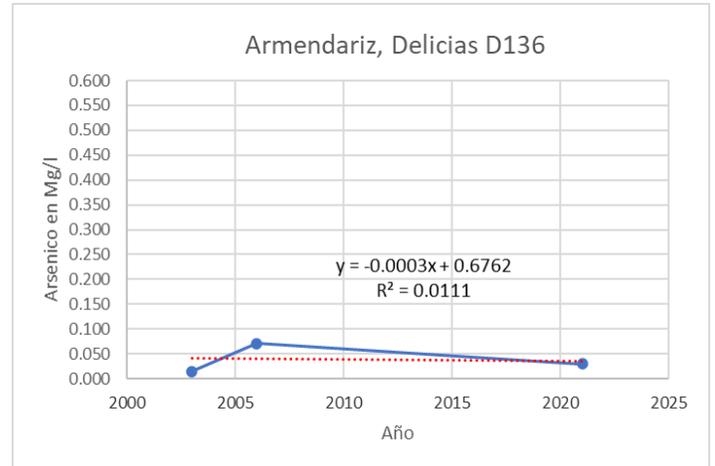
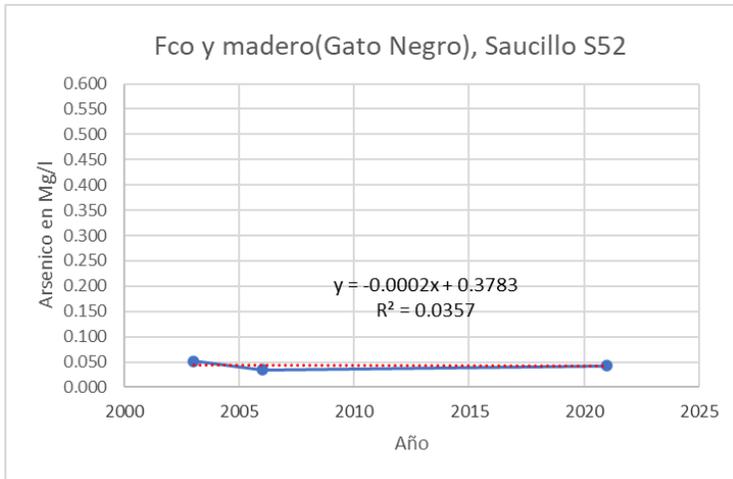


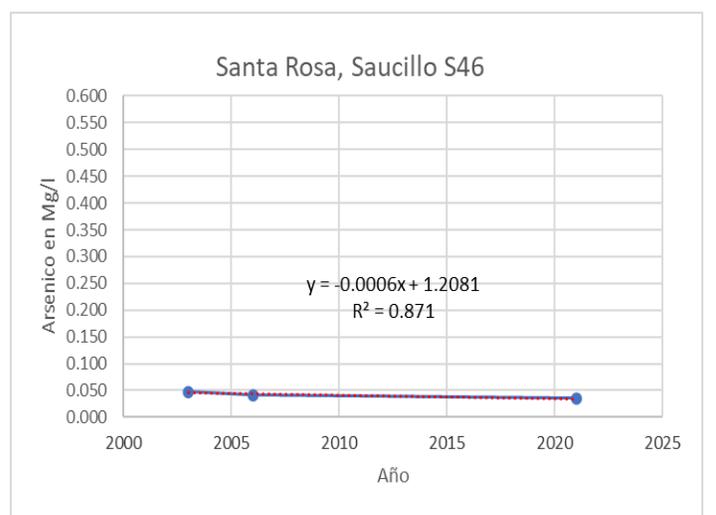
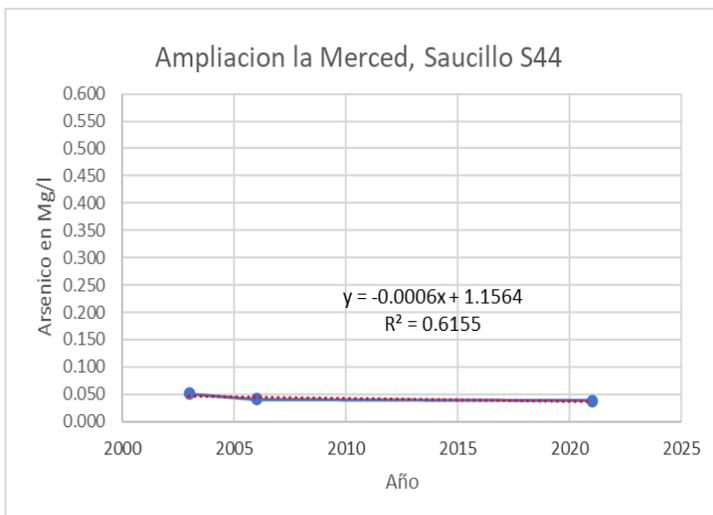
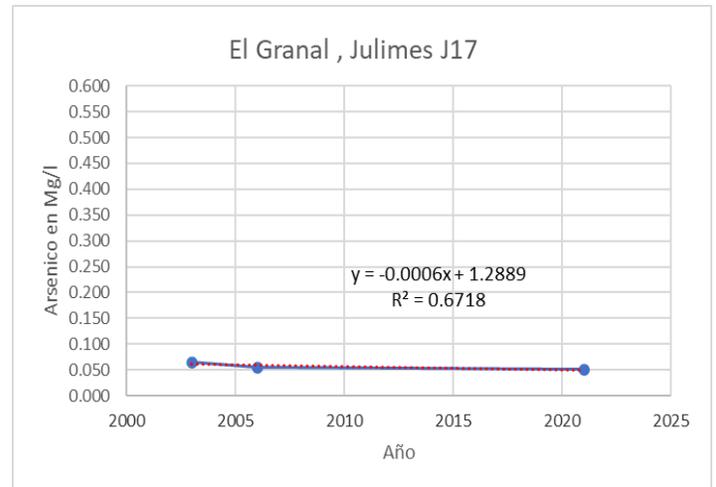
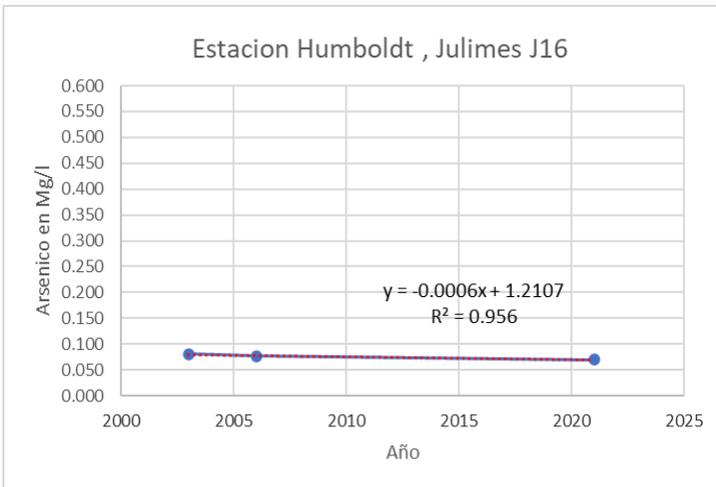
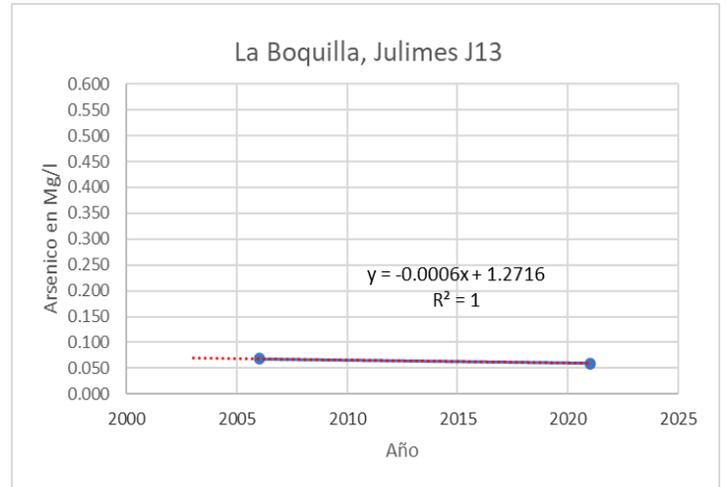
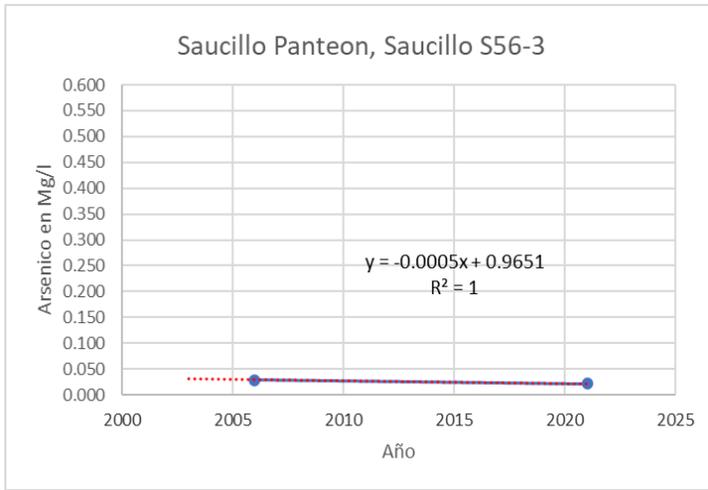


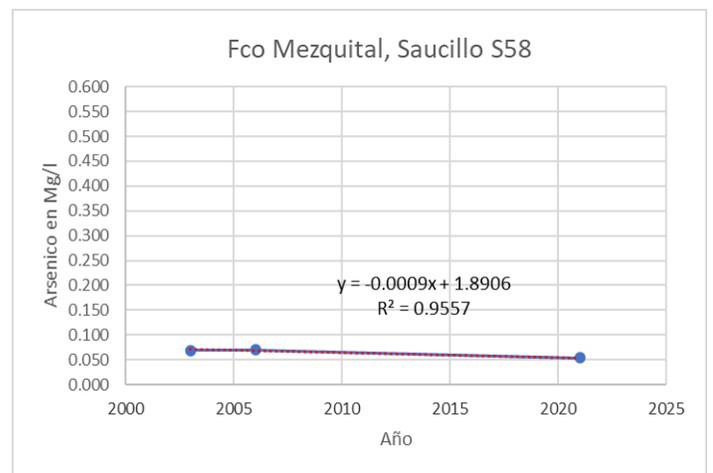
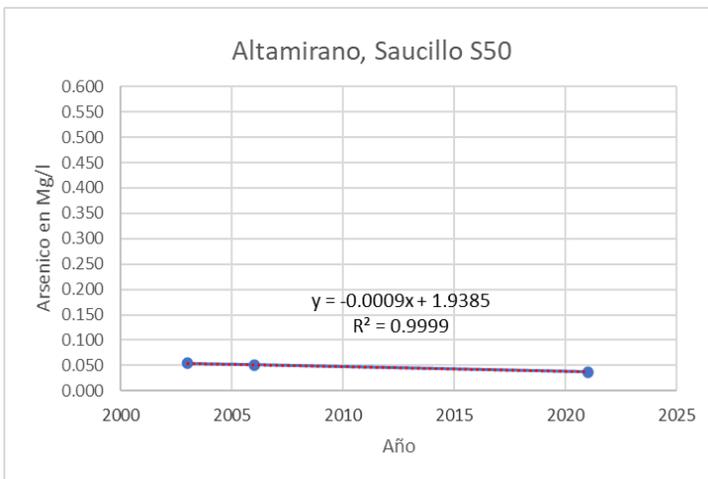
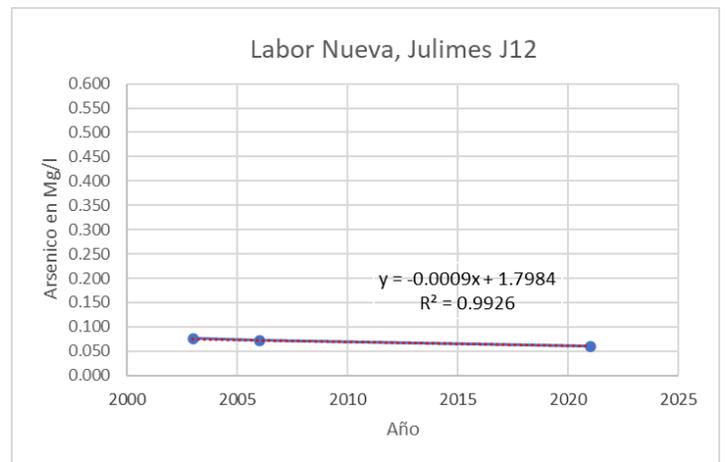
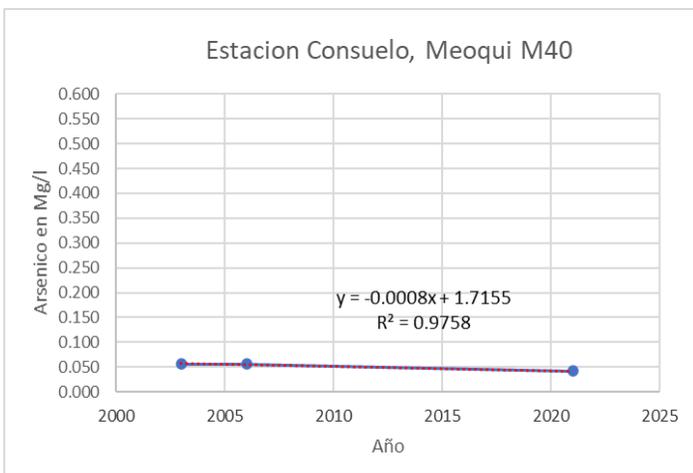
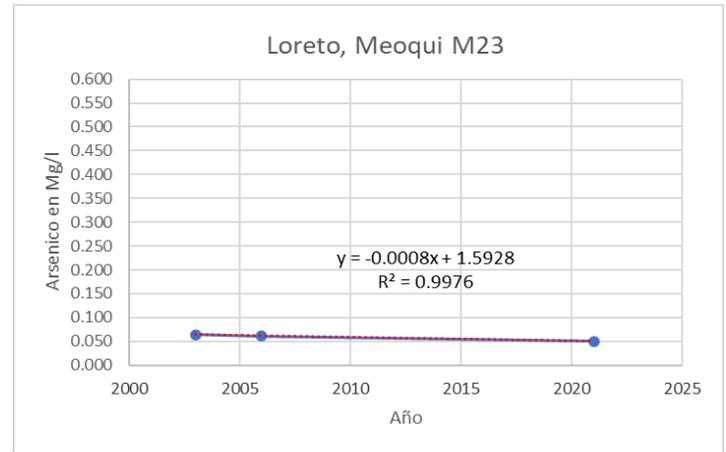
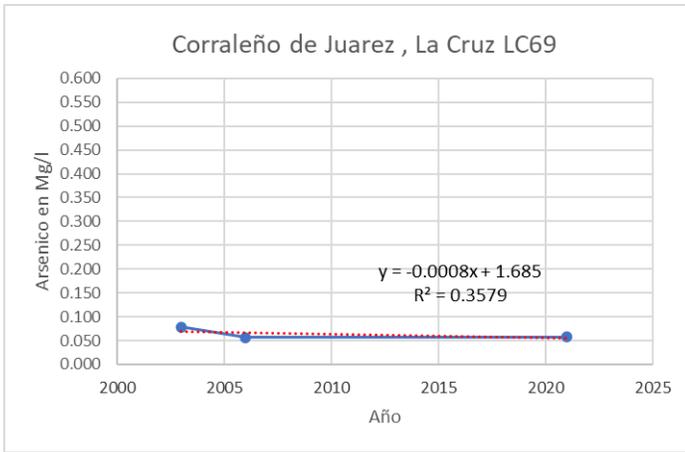


b) Incremento o decremento nulo



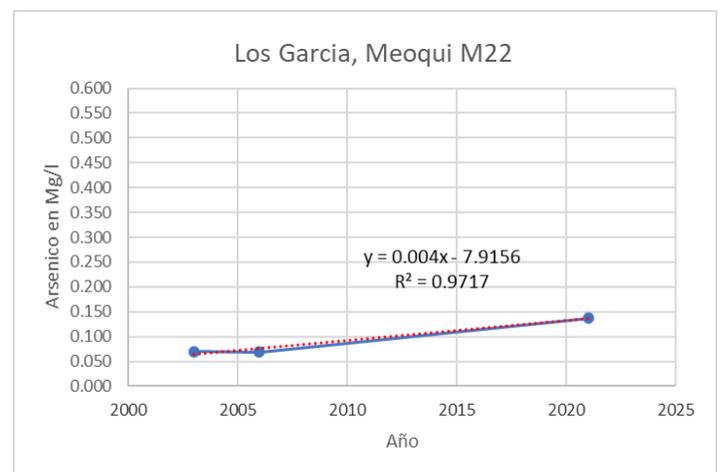
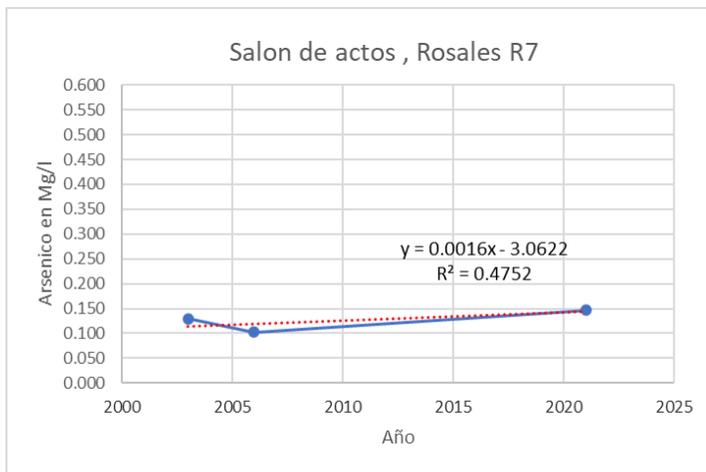
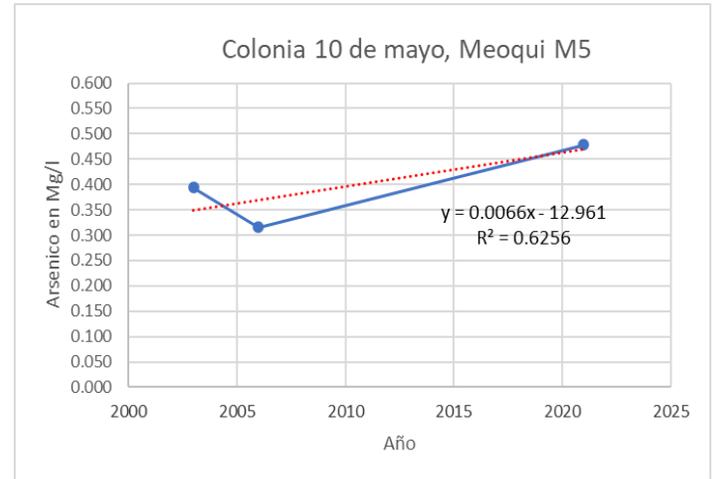
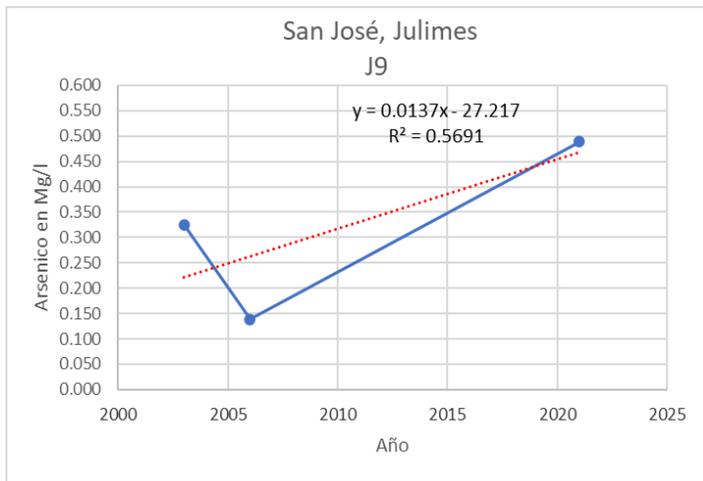








c) Pendiente positiva (alza)





Curriculum Vitae

Ing. René Alejandro Baeza Galván

a e-mail: rene_alejandro12@hotmail.com

VISION PROFESIONAL: Ser un Ingeniero Geólogo e hidrólogo de reconocimiento, ofrecer servicios de alta calidad y eficiencia, otorgando resolución, análisis y síntesis a los problemas, con adaptación a situaciones nuevas y mantener siempre el interés en la investigación.

OBJETIVOS: Crecer dentro del ámbito laboral, aportar ideas de mejora y ser elemento fundamental, ayudando a lograr metas y objetivos de la empresa, desarrollándome con un excelente desempeño de las funciones asignadas.

EDUCACIÓN

- Universidad Autónoma de Chihuahua Campus 2. Facultad de ingeniería, ingeniero geólogo titulado 2014-2018
- Universidad Autónoma de Chihuahua Campus 2. Facultad de ingeniería, Maestría en hidrología con especialización en hidrología subterránea en proceso de titulación 2020-2022- Título de tesis: Aspectos geológicos del arsénico y su evolución en el acuífero Meoqui-Delicias.

EXPERIENCIA LABORAL

- Starbucks México: Supervisor de turno, Atención a clientes, Manejo de inventarios, capacitación de personal, actividades administrativas, Manejo de personal, cumplimiento de metas y objetivos. Julio 2016-Marzo 2019
- Grupo México unidad Santa Bárbara: Prácticas profesionales, encargado de creación de base de datos de barrenación y diversas actividades, entre ellas: mapeo interior de mina, logueo y muestro etc. Abril 2019-mayo 2019
- Innovasport: asesor de ventas mayo 2019-octubre 2019
- HYM: asesor de ventas octubre 2019-2020

OTROS CURSOS

- Modelación de reservas mineras conocimiento básico de SURPAC. Enero 2019
- Ingles avanzado.
- Excel avanzado

COMPETENCIAS

- Manejo de software: ArcMap avanzado, AutoCAD, Surpac Básico, Paquete Office, Global Mapper, Google Earth, Sedlog, QGIS, ENVI, Geoquimic work bench, y programas de hidrología en general con capacidad de aprender otro software rápidamente si es necesario.
- Interés en el crecimiento de mi aprendizaje y desarrollarme laboralmente a través de la aplicación de conocimientos adquiridos durante mi formación académica.
- Manejo de sondas para medir niveles piezométricos, recolección de muestras de agua y roca, análisis de parámetros de campo y realización de sondeos eléctricos verticales.

DATOS DE INTERES

Disponibilidad de horario, disponibilidad para viajar, automóvil propio, licencia vigente, cambio de residencia, equipo de cómputo portátil con hardware adecuado para programas de la profesión, Con visa vigente.

Esta tesis fue mecanografiada por René Alejandro Baeza Galván.