



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA

FACULTAD DE INGENIERÍA

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO



**EVOLUCIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DE LA PRESENCIA DE
FLUORUROS EN EL ACUIFERO MEOQUI-DELICIAS, CHIHUAHUA**

POR:

ING. DANIEL FERNANDO RODRÍGUEZ LOZANO

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

CHIHUAHUA, CHIH., MÉXICO

MAYO DE 2022



Evolución espacial y temporal de la presencia de fluoruros en el acuífero Meoqui-Delicias, Chihuahua. Tesis presentada por Daniel Fernando Rodríguez Lozano como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Ingeniería en Hidrología, ha sido aprobado y aceptado por:

M.I. Javier González Cantú
Director de la Facultad de Ingeniería

Dr. Alejandro Villalobos Aragón
Secretario de Investigación y Posgrado

M.I. Miguel Ángel González Núñez
Coordinador Académico

Dra. María Socorro Espino Valdés
Directora de Tesis

Marzo 2022

Fecha

COMITÉ

Directora de Tesis:

Co Directora de Tesis:

Asesores de Tesis:

Dra. María Socorro Espino Valdés

Dra. Mélida Gutiérrez Quiroz

Dr. Humberto Silva Hidalgo

Dr. Adán Pinales Munguía

Derechos Reservados
**Daniel Fernando Rodríguez
Lozano**
Circuito Universitario No. 1, Campus
Universitario 2 C.P. 31125
Chihuahua, Chih. México
Marzo 2022



ING. DANIEL FERNANDO RODRÍGUEZ LOZANO
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 **“EVOLUCIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DE LA PRESENCIA DE FLUORUROS EN EL ACUÍFERO MEOQUI-DELICIAS, CHIHUAHUA”**.

Índice de Contenido

Dedicatoria

Agradecimientos

Resumen

Índice de figuras

Índice de tablas

1: Generalidades

1.1 Introducción

1.2 Antecedentes

1.3 Justificación

1.4 Hipótesis

1.5 Objetivos

2: Marco teórico

2.1 Química del flúor

2.2 Geoquímica del flúor

2.3 Ciclo hidrogeoquímico del flúor

2.4 Fuentes de flúor

2.5 Factores que influyen en la formación de F en las aguas subterráneas

2.6 Absorción en los humanos

2.7 Efectos en los humanos



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

2.8 Problemática del flúor en acuíferos del estado de Chihuahua

2.9 Disponibilidad de agua en los acuíferos del estado de Chihuahua

3: Descripción de la zona de estudio

3.1 Localización y vías de acceso

3.2 Situación administrativa del acuífero

3.3 Fisiografía

3.4 Clima

3.5 Hidrografía

3.6 Geología

3.7 Edafología

3.8 Hidrogeología

3.9 Calidad del agua en el acuífero Meoqui-Delicias

4: Materiales y métodos

5: Resultados y discusión

5.1 Resultados de parámetros de campo

5.2 Resultados de los análisis y evolución espacial de los Sólidos Disueltos Totales (SDT)

5.3 Discusión de resultados de la evolución espacial y temporal de la concentración de SDT

5.4 Resultados de los análisis y evolución espacial de los fluoruros en el acuífero

5.5 Configuraciones piezométricas

5.6 Discusión de resultados de evolución espacial y temporal de la concentración de fluoruros

5.7 Relación entre profundidad al nivel dinámico y concentración de fluoruro

5.8 Relación entre profundidad de pozos y concentración de fluoruro

5.9 Análisis de tendencias en el tiempo de la concentración de fluoruros

5.10 Consideraciones estadísticas

6: Conclusiones y recomendaciones

Bibliografía consultada

FACULTAD DE INGENIERÍA
Circuito No.1, Campus Universitario 2
Chihuahua, Chih., México. C.P. 31125
Tel. (614) 442-95-00
www.fing.uach.mx



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

Anexo 1

Anexo 2

Anexo 3

Anexo 4

Solicitamos a Usted tomar nota de que el título del trabajo se imprima en lugar visible de los ejemplares de las tesis.

ATENTAMENTE

"Naturam subiecit aliis"

EL DIRECTOR

**EL SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN
Y POSGRADO**

M.I. JAVIER GONZÁLEZ CANTÚ

**FACULTAD DE
INGENIERÍA
U.A.CH.**



DIRECCIÓN

DR. ALEJANDRO VILLALOBOS ARAGÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA
Circuito No.1, Campus Universitario 2
Chihuahua, Chih., México. C.P. 31125
Tel. (614) 442-95-00
www.fing.uach.mx



DEDICATORIA

A Dios

*A mi madre Yolanda Lozano por su apoyo incondicional y ser mi
motivación*



AGRADECIMIENTOS

A mi directora de Tesis, Dra. María Socorro Espino Valdés, mi más profundo agradecimiento, por su paciencia, su valiosa dirección y apoyo durante este trabajo de tesis, por sus amplios conocimientos y experiencia que fueron fundamentales para sacar adelante este trabajo.

A la Dra. Mérida Gutiérrez, directora externa de este trabajo de tesis, por su apoyo, su dirección y por su aporte de recursos para que este proyecto pudiera llevarse a cabo.

A mis sinodales y revisores el Dr. Adán Pinales Munguía y el Dr. Humberto Silva Hidalgo por sus valiosas asesorías y su incomparable apoyo durante la revisión del manuscrito.

A Miguel Ángel González Núñez, coordinador de la maestría, por su apoyo incondicional, por su inigualable empatía y comprensión, por cada consejo que me brindó y por ayudarme a buscar soluciones ante cada imprevisto que se me presentó en el camino.

Al Dr. Alejandro Villalobos Aragón, por sus valiosas asesorías, por su amplio conocimiento y por ayudarme a resolver situaciones adversas que se me presentaron.

A los compañeros que conformaron las brigadas de campo Nayeli Villalobos, René Baeza y Alejandro Hernández Hernández, por su disposición y apoyo en la recolección de muestras y toma de datos de piezometría por las diferentes localidades.

A Jacobo Chávez, funcionario del laboratorio de sanitarias, por brindarme una excelente capacitación para poder realizar los análisis químicos de fluoruro por el método potenciométrico, por su disposición y por compartir su gran conocimiento.

A las diferentes Juntas Municipales de Agua y Saneamiento que fueron visitadas por su disposición para brindarnos acompañamiento en campo hasta la zona donde se encuentran instalados los pozos.

A mis compañeros de maestría Indra Cervantes, Sarai Castillo y Juan Carlos Castañeda por su valiosa amistad, porque con cada uno de ellos compartí momentos de felicidad así como de esfuerzo y de mucha dedicación para lograr objetivos, gracias porque más que colegas son excelentes amigos que espero conservar por siempre.

y, por último, pero no menos importante, a mi querida alma máter UACH (Universidad Autónoma de Chihuahua) por brindar su ayuda para poder realizar los análisis químicos dentro del laboratorio.



RESUMEN

El acuífero Meoqui-Delicias, localizado en la porción centro-sur del estado de Chihuahua, ha presentado concentraciones de fluoruro por encima del límite máximo permisible (1.5 mg/l) para agua potable por la Mod. NOM-127. Aunque la ingestión de flúor a bajas concentraciones (≤ 1 mg/l) se considera benéfica, de acuerdo con la Organización Mundial de la Salud el consumo prolongado de agua con altos contenidos de flúor puede dar lugar a la fluorosis dental y si las concentraciones son muy altas puede originar fluorosis ósea, por lo que es importante monitorear su presencia en el agua de consumo.

En el caso del acuífero Meoqui-Delicias, el contenido de fluoruros es de origen geogénico y se debe principalmente a la lixiviación del material de relleno de los valles aluviales, los cuales están constituidos por rocas ígneas de composición félsica (riolitas y tobas riolíticas) que han sido erosionadas de las sierras circundantes y presentan minerales fuente de fluoruro como fluorita, biotita y anfíboles. Dicho F^- es reemplazado por iones OH^- por medio del proceso de hidrólisis y posteriormente se infiltra a través de las capas del aluvión por dispersión hidrodinámica por medio del agua de recarga natural y también con volúmenes de agua de recarga inducida proveniente de los retornos de riego que atraviesan capas del aluvión en el valle hasta alcanzar la zona saturada.

Para realizar este estudio se tomaron 64 muestras de agua potable, abarcando las localidades en las cuales se contaba con antecedente de concentración de fluoruros mayores a 1.5 mg/L. Los resultados de fluoruro se compararon con datos históricos de otras campañas de muestreo realizadas en años anteriores.

Con base a los resultados obtenidos las muestras se clasificaron en cuatro categorías en función de la tendencia que ha tenido la concentración de fluoruro con respecto al tiempo en cada localidad. Se encontró que aproximadamente el 40% de los pozos analizados presentaron un incremento leve o significativo. La mayoría de los pozos con tendencia alcista se encuentran ubicados en zona de descarga, específicamente sobre el valle aluvial del río



Conchos, aguas abajo de su confluencia con el río San Pedro donde están la mayoría de las localidades del municipio de Julimes y algunas del municipio de Meoqui.

En cuanto a la evolución espacial obtenida por medio de isolíneas de concentración, se observó la persistencia del problema de contaminación particularmente en el sector noreste (zona de descarga), lo que coincide tanto con el análisis estadístico temporal como con la relación que existe entre las concentraciones de F^- y la profundidad de captación de los pozos.



INDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA.....	2
AGRADECIMIENTOS.....	3
RESUMEN.....	4
ÍNDICE DE FIGURAS.....	8
ÍNDICE DE TABLAS.....	9
Capítulo 1. GENERALIDADES.....	10
1.1 Introducción.....	10
1.2 Antecedentes.....	12
1.3 Justificación.....	15
1.4 Hipótesis.....	17
1.5 Objetivos.....	17
Capítulo 2. MARCO TEÓRICO.....	19
2.1 Química del flúor.....	19
2.2 Geoquímica del flúor.....	20
2.3. Ciclo hidrogeoquímico del flúor.....	22
2.4 Fuentes de flúor.....	26
2.5 Factores que influyen en la formación de F ⁻ en las aguas subterráneas.....	29
2.6 Absorción en los humanos.....	32
2.7 Efectos en los humanos.....	33
2.8 Problemática del flúor en acuíferos del estado de Chihuahua.....	36
2.9 Disponibilidad de agua en los acuíferos del estado de Chihuahua.....	37
Capítulo 3. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	41
3.1 Localización y vías de acceso.....	41
3.2 Situación administrativa del acuífero.....	43



3.3	Fisiografía.....	43
3.4	Clima	46
3.5	Hidrografía.....	48
3.6	Geología	50
3.7	Edafología.....	55
3.8	Hidrogeología	57
3.9	Calidad del agua en el acuífero Meoqui-Delicias.....	58
Capítulo 4. MATERIALES Y MÉTODOS		61
Capítulo 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN		69
5.1	Resultados de parámetros de campo.....	69
5.2	Resultados de los análisis y evolución espacial de los Sólidos Disueltos Totales (SDT).....	71
5.3	Discusión de resultados de la evolución espacial y temporal de la concentración de SDT.....	76
5.4	Resultados de los análisis y evolución espacial de los fluoruros en el acuífero	77
5.5	Configuraciones piezométricas	86
5.6	Discusión de resultados de evolución espacial y temporal de la concentración de fluoruros	98
5.7	Relación entre profundidad al nivel dinámico y concentración de fluoruro	103
5.8	Relación entre profundidad de pozos y concentración de fluoruro	106
5.9	Análisis de tendencias en el tiempo de la concentración de fluoruros	110
5.10	Consideraciones estadísticas	116
Capítulo 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		120
Bibliografía Consultada.....		126
Anexo 1		131
Anexo 2		133



Anexo 3	142
Anexo 4	145

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Ciclo hidrogeoquímico del fluoruro. Fuente: Edmunds y Smedley, 2012.....	26
Figura 2 Localización del Acuífero Meoqui Delicias	41
Figura 3 Vías de comunicación. Fuente: Google Earth Pro, 2021	42
Figura 4 Provincias fisiográficas. Fuente: INEGI, 1981	44
Figura 5 Subprovincias fisiográficas. Fuente: INEGI, 1981	45
Figura 6 Clima. Fuente: INEGI, 1984	47
Figura 7 Hidrografía Fuente: INEGI, 2010	49
Figura 8 Geología. Fuente: SGM, 2000, Carta H13-11	51
Figura 9 Columna estratigráfica, Carta geológico minera de Delicias Chihuahua, H13-11 (SGM, 2000).....	54
Figura 10 Edafología. Fuente: INEGI, 2007	56
Figura 11 Ubicación de los pozos de agua potable muestreados en el periodo 2020-2021	63
Figura 12 Muestreo de agua potable	64
Figura 13 Sonda y equipo HANNA HI 9828	64
Figura 14 Medición de nivel dinámico.....	65
Figura 15 Selección de pozos para monitoreo de nivel dinámico	66
Figura 16 Equipo para medición de ion fluoruro.	67
Figura 17 Estándares para calibración del equipo.....	67
Figura 18 Isoconcentraciones SDT, año 2006.....	73
Figura 19 Isoconcentraciones de SDT, año 2021	75
Figura 20 Isoconcentraciones fluoruro, año 2003	79
Figura 21 Isoconcentraciones fluoruro, año 2006	82
Figura 22 Isoconcentraciones fluoruro, año 2020-2021	85
Figura 23 Profundidad del nivel dinámico, año 2005	89
Figura 24 Profundidad del nivel dinámico, año 2021	91
Figura 25 Elevación del nivel dinámico, año 2005	93
Figura 26 Elevación del nivel dinámico, año 2021	95
Figura 27 Evolución del nivel dinámico, periodo 2005-2021	97
Figura 28 Concentración de fluoruros año 2021 Vs profundidad al nivel dinámico año 2021	104
Figura 29 Concentración de fluoruros año 2006 Vs profundidad al nivel dinámico año 2005	106
Figura 30 Profundidad de pozo vs profundidad a nivel de agua estático, modificado de Freeze & Cherry (1979).....	108
Figura 31 Profundidad total de pozos Vs Concentración de fluoruros año 2021.....	108
Figura 32 Profundidad total de pozos Vs Concentración de fluoruros año 2006.....	109
Figura 33 Profundidad total de pozos Vs Concentración de fluoruros año 2003.....	109
Figura 34 Tendencia de concentración de fluoruros en acuífero Meoqui-Delicias, año 2020	115



Figura 35 Gráfica de frecuencia de datos, concentración de F ⁻ año 2003	116
Figura 36 Gráfica de frecuencia de datos, concentración de F ⁻ año 2006	117
Figura 37 Gráfica de frecuencia de datos, concentración de F ⁻ año 2021	118

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Disponibilidad Media Anual de Agua Subterránea de los Acuíferos del Estado de Chihuahua .(Diario Oficial de la Federación, 2020)	39
Tabla 2 Lista de pozos muestreados	61
Tabla 3 Datos recolectados en campo, campaña 2020, pozos de agua potable acuífero Meoqui-Delicias.	70
Tabla 4 Datos piezométricos de pozos monitoreados, año 2021	86
Tabla 5 Concentración de fluoruros año 2021 Vs Profundidad al nivel dinámico año 2021	104
Tabla 6 Concentración de fluoruros año 2006 Vs Profundidad al nivel dinámico año 2005	105
Tabla 7 Pozos con datos de concentración de fluoruros, profundidad total y profundidad al nivel dinámico	107
Tabla 8 Resultado de pendiente de línea de tendencia para cada pozo del acuífero Meoqui-Delicias	111



Capítulo 1. GENERALIDADES

1.1 Introducción

El agua es considerada como el solvente universal. Esta cualidad hace que el agua subterránea, al estar en contacto con diferentes materiales del subsuelo, ocasione que éstos sean solubilizados en diferente grado dependiendo del tiempo de contacto, velocidad del agua, tipo de suelo y temperatura, lo que determina ciertas propiedades fisicoquímicas que posee el agua presente en determinado acuífero. Entre los principales constituyentes iónicos del agua se encuentran el calcio, magnesio, sodio, potasio, cloruros, bicarbonatos y sulfatos. Existe otro tipo de iones que se encuentran presentes en una menor proporción dentro del subsuelo, que pueden afectar la calidad del agua. El arsénico, flúor y el uranio son ejemplos de esto (Précoma, 2007).

El agua subterránea es la fuente principal del recurso utilizada para diversos fines en la mayor parte del mundo; sin embargo, la presencia de concentraciones bajas o altas de ciertos iones constituyen un problema importante porque alteran la calidad de la misma, provocando que no sea adecuada principalmente para uso doméstico (Brindha et al., 2011). El fluoruro es uno de los iones que causa problemas relevantes de salud en las personas que viven en más de 25 países de todo el mundo (Ayoob y Gupta, 2006).

La contaminación por fluoruros (F^-) disueltos en agua subterránea destinada a consumo humano representa una amenaza para la salud de millones de personas en todo el mundo debido a que la ingesta excesiva de flúor causa diferentes tipos de fluorosis, principalmente fluorosis dental y esquelética, dependiendo de la concentración y periodo de exposición (Amini et al., 2008). Países como Argentina, Canadá, Chile, China, Estados Unidos, Hungría, India, Italia, México, Pakistán y Vietnam, entre otros, han reportado la severidad de la ingestión de agua con fluoruro (Edmunds y Smedley, 2005). La Organización Mundial de la Salud (WHO, por sus siglas en inglés) recomienda una concentración máxima para el flúor en agua potable de 1.5 mg/L; este límite máximo permisible fue adoptado por



la normatividad mexicana (Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994). En México, el proyecto de Norma Oficial Mexicana (PROY-NOM-127-SSA1-2017), contempla una reducción en la concentración de flúor hasta 1 ppm en 2025.

El flúor es el elemento más ligero del grupo de los halógenos, con un número atómico 9. Su estructura química hace que sea el elemento más electronegativo y, por ende, la sustancia más oxidante que se encuentra en la naturaleza de manera estable. Se estima que, en conjunto, los fluoruros representan entre el 0.06 y el 0.09 % de la corteza terrestre y la abundancia cortical promedio es 300 mg kg^{-1} (Fawell et al., 2006); esto significa que es casi tan abundante como el carbono, el nitrógeno o el cloro (Ayoob y Gupta, 2006).

El flúor reacciona con otros elementos para producir compuestos iónicos como fluoruro de hidrógeno y fluoruro de sodio en agua y en formas de disociación ion fluoruro cargado negativamente. (Ayoob y Gupta, 2006).

El F^- se encuentra siempre en el agua subterránea en forma iónica. Los controles principales de concentración en las rocas que lo originan son el tipo de diferenciación magmática ya que, si bien las rocas félsicas lo contienen, existen cuerpos de estas rocas que lo contienen en mayor concentración. Así, el tipo de minerales de origen, el tiempo de residencia del agua con la roca, la temperatura debido a la profundidad de circulación y el pH condicionan su concentración en el agua subterránea (Huizar et al., 2016).

El flúor es de los pocos elementos químicos encontrados de manera endémica que han mostrado causar efectos significativos en la salud de los seres humanos al ser ingerido con el consumo de agua potable. La ingestión de flúor a bajas concentraciones ($\leq 1 \text{ mg/L}$) se considera benéfica por su capacidad de prevenir las caries dentales. Sin embargo, el consumo prolongado de agua con altos contenidos de este elemento puede dar lugar a la fluorosis de dientes y huesos, y si la concentración es muy alta, puede originar serios daños a la salud, tales como fragilidad de los huesos, e incluso rigidez total y deformación ósea (Alarcón, 2002).



Las grandes extensiones geográficas en las que se pueden hallar elevadas concentraciones de flúor en el agua subterránea se encuentran asociadas con sedimentos de origen marino en áreas montañosas (como el caso de Irak), rocas volcánicas (África y México) y rocas graníticas y gneiss, ambas rocas metamórficas, como son los casos de China e India, entre otros (Fawell et al., 2006). Tanto aguas someras como profundas pueden verse afectadas; esto, como resultado de la disolución de la fluorita, apatita u otro tipo de roca que lo contenga. Pero de manera más general, la concentración de flúor dentro del suelo se ve incrementada conforme aumenta la profundidad del mismo, así como de la fracción de minerales arcillosos, la química del suelo en general y el clima (Ayoop y Gupta, 2006).

La sobreexplotación del agua subterránea también contribuye al aumento de la concentración de flúor y/o metales pesados, los cuales tienen efectos nocivos en la salud de las personas que consumen agua así contaminada.

Las regiones con problemas de altos niveles de concentración de flúor en las aguas subterráneas frecuentemente corresponden a aquellas en las que la composición geológica del suelo favorece la presencia de este elemento. En la República Mexicana el flúor se encuentra de manera natural en acuíferos de varios estados tales como Aguascalientes, Chihuahua, Durango, Jalisco, Guanajuato, San Luis Potosí, Sonora y Zacatecas (Chávez, 2010).

En el estado de Chihuahua no sólo el agua de los pozos agrícolas se está salinizando de forma progresiva; existen pozos de agua para consumo humano que ya tienen problemas de contaminación por arsénico, flúor y metales pesados, como ocurre en los acuíferos de Tabalaopa-Aldama, Meoqui-Delicias, Jiménez-Camargo y Valle de Juárez (Olivas, 2015).

1.2 Antecedentes

La presencia de F^- en las aguas subterráneas ha sido ampliamente reportada en América Latina, especialmente en regiones áridas y semiáridas de México, Argentina y Chile,



tales como en las aguas subterráneas del centro-norte de México, El Tatío en Chile, así como en la llanura chaco-pampeana de Argentina, donde el origen es principalmente geogénico. Su fuente primaria está asociada con material volcanoclástico, presente en depósitos de loess y aluviones, lutitas y/o actividad geotérmica (Alarcón et al, 2013).

En México se estima que la contaminación del agua subterránea por fluoruros es de origen geogénico proveniente de la disolución de rocas volcánicas (Armienta y Segovia, 2008). La presencia de fluoruros se encuentra documentada en acuíferos de varios estados, tales como Aguascalientes, Chihuahua, Durango, Jalisco, Guanajuato, San Luís Potosí, Sonora y Zacatecas (Chávez, 2010).

Alarcón et al. (2013) identificaron tres ambientes hidrogeológicos principales que contienen altas concentraciones de As y F en México: áreas de actividad geotérmica (centro y norte de México), acuíferos aluviales (norte de México) y áreas de actividad minera (centro-norte de México).

La presencia de flúor en los acuíferos del estado de Chihuahua se debe principalmente a la infiltración y disolución de este elemento del suelo y rocas que lo contienen, donde la composición geológica del suelo y las condiciones son favorables para su disolución (Alarcón et al., 2002).

En el estado de Chihuahua se han efectuado varios estudios que revelan altas concentraciones de flúor en el agua subterránea, tales como los realizados por Précoma (2007) en los acuíferos Flores Magón-Villa Ahumada, Buenaventura, Laguna La Vieja y Casas Grandes y los resultados presentados por Barrera (2008) y Rascón (2011) en el acuífero Meoqui-Delicias.

Con base en los antecedentes de monitoreo de calidad del agua del acuífero Meoqui-Delicias se han observado variaciones en la calidad en las fuentes de agua potable de varios de los municipios que corresponden a dicho acuífero como son los de Julimes, Delicias, Rosales, Meoqui y Saucillo en el estado de Chihuahua. En el agua subterránea de algunas localidades de estos municipios se han encontrado sólidos disueltos, arsénico, flúor, sulfatos



y/o nitratos en concentraciones superiores a los límites establecidos para el consumo humano, lo que puede ser causa de posibles efectos en la salud o del rechazo por parte de los consumidores (Barrera, 2008; Rascón, 2011).

Bencomo (2013) reportó que en el acuífero Meoqui-Delicias la concentración de flúor varía de 0.5 a 16.29 mg/l; dichas concentraciones están asociadas con valores de pH ligeramente alcalinos, así como con familias de agua bicarbonatadas-sódicas y sulfatadas-sódicas; aparentemente están ligadas a un origen geogénico común o de interacciones agua/roca/sedimentos.

En el estudio de Barrera (2008) se encontraron en el acuífero Meoqui-Delicias concentraciones de flúor que alcanzan valores de hasta 9.4 mg/l. Los valores más altos corresponden a la región norte del área en donde se incluyen la mayoría de las localidades de los municipios de Meoqui y Julimes, resaltando por sus altos valores las localidades Diez de Mayo, Progreso y Guadalupe Victoria del municipio de Meoqui, así como San José, Julimes, La Esperanza y La Regina en el municipio de Julimes, al igual que Salón de Actos en el municipio de Rosales.

Barrera (2008) y Rascón (2011) realizaron un estudio de vulnerabilidad a la contaminación del acuífero Meoqui-Delicias a través del método DRASTIC, el cual se basa en la asignación de índices que van de 1 a 10, en orden creciente de vulnerabilidad, de acuerdo al comportamiento de las variables correspondientes en el acrónimo de la palabra DRASTIC: D (profundidad del nivel freático), R (recarga neta), A (litología del acuífero), S (tipo de suelo), T (topografía o pendiente del terreno), I (impacto de la litología de la zona no saturada) y C (conductividad hidráulica).

De acuerdo con dicho estudio, los factores más importantes que inciden en la vulnerabilidad a la contaminación en el acuífero Meoqui-Delicias son la profundidad del nivel freático (D), el tipo de suelo (S) y el impacto de la zona no saturada (I). Los resultados del método DRASTIC indicaron para la zona de estudio que en ella coexisten, distribuidos



en menor o mayor proporción, los grados de vulnerabilidad insignificante, baja, media baja, media media y media alta.

Según Barrera (2008) la zona de mayor categoría ante la vulnerabilidad (media alta) en la porción norte del acuífero cubre un 15.86% del área de estudio y está distribuida preferencialmente sobre las áreas del valle aledañas a los ríos San Pedro y Conchos, en concordancia con la dirección de flujo de los mismos. En general estas zonas presentan las más someras profundidades del nivel estático y los mayores volúmenes de recarga al acuífero; se caracterizan por estar albergadas en los depósitos sedimentarios de aluvión de río constituidos por guijarros, gravas, arenas, limos y arcillas, los cuales se erosionan constantemente con la creciente de los arroyos y ríos, proceso que facilita a la zona contar con una alta permeabilidad.

Con respecto a la porción sur del acuífero, Rascón (2011) definió un porcentaje de cubrimiento de área correspondiente al 12.6%; esta zona se encuentra en su mayoría siguiendo la trayectoria del río Conchos y cercana al área de valle. En cuanto a la profundidad, el nivel estático en la mayoría de estas áreas es somero, esto es de 5 m, 10 m y 20 m lo cual contribuye a una vulnerabilidad clasificada entre alta y media alta. En relación a su geología, se encuentran en aluvión (Qhoal) y roca sedimentaria formada de arenas y gravas, las cuales son arrastradas y movidas por las corrientes de los ríos o arroyos.

1.3 Justificación

Las características geológicas del territorio mexicano indican que el fluoruro puede estar por encima de los estándares de agua potable en muchas áreas del país; por lo tanto, el monitoreo de este ion debe efectuarse regularmente en todas las fuentes de agua subterránea, particularmente las que son empleadas para el abastecimiento potable. Se necesita incrementar la investigación al respecto para determinar los niveles reales, causas y movilización de estos elementos en acuíferos. Estos estudios podrían identificar opciones



para suministrar agua de buena calidad basados en los regímenes de extracción y/o procedimientos de tratamiento. Es por esta razón que surge la importancia de comparar los niveles de concentración de F^- de diversas campañas de monitoreo y así evaluar su evolución y distribución espacio-temporal en los acuíferos.

Debido a las características geográficas y climatológicas en el Estado de Chihuahua, el agua subterránea es el principal recurso para el abastecimiento público, así como para usos industriales y el riego agrícola (Espino, 2009). En el caso del acuífero Meoqui-Delicias, debido al contexto geológico donde se localiza, las condiciones semidesérticas y el constante abatimiento de los niveles freáticos por la sobreexplotación del recurso siendo la población el principal receptor sensible, se ha llegado a la necesidad de captar agua subterránea de mantos cada vez más profundos para el abastecimiento humano, lo que ha generado un deterioro en la calidad del agua subterránea, mostrando un incremento en la salinidad que afecta negativamente su composición química (Rocha, 2002). De acuerdo con Ayoop y Gupta (2006) la concentración de flúor dentro del suelo se ve incrementada conforme aumenta la profundidad del mismo, así como de la fracción de minerales arcillosos, la química del suelo en general y el clima.

La ingestión de agua subterránea profunda puede contener altos niveles de fluoruro (mayores a 1.5 mg/L) y por consiguiente causar problemas de fluorosis dental y esquelética, desarrollando una mayor susceptibilidad a enfermedades renales y cáncer (WHO, 2004) así como afectación al desarrollo del cerebro humano, reduciendo, entre otros efectos, el coeficiente intelectual (IQ) de niños en edad escolar (Wang et al., 2007).

Las evidencias presentadas en los antecedentes sobre la presencia de flúor en el acuífero Meoqui-Delicias justifican la necesidad de actualizar los datos de concentración de fluoruro en pozos de agua potable que exceden este valor límite en varias localidades ubicadas en el área de dicho acuífero; esto permitirá realizar una comparación de registros históricos con el fin de observar el comportamiento y la evolución de las concentraciones de este elemento a través del tiempo. De igual manera, es importante identificar las zonas con



las mayores concentraciones de flúor, su distribución espacial, las zonas con mayores abatimientos del nivel freático y su posible relación con la concentración de flúor.

1.4 Hipótesis

Existe una correlación entre la evolución temporal y espacial de las concentraciones de flúor presente en el acuífero Meoqui-Delicias y las condiciones hidrogeológicas del mismo.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Determinar la evolución espacial y temporal de los niveles de concentración de flúor en el acuífero Meoqui-Delicias por medio de comparación de registros históricos de concentración de dicho elemento en pozos de agua potable en el mismo (años 2003 y 2006), correlacionar la información con un nuevo monitoreo del acuífero y realizar un análisis estadístico que permita observar tendencias y el comportamiento de las concentraciones de flúor con respecto al tiempo.

1.5.2 Objetivos específicos

- Recopilar información sobre las características físicas del acuífero Meoqui-Delicias: geología, suelos, clima, hidrogeología, química y calidad del agua subterránea.
- Actualizar la información sobre las concentraciones de flúor, a través de la toma y análisis de un número de muestras representativas en el área de dicho acuífero.
- Realizar un análisis comparativo entre los resultados de las concentraciones de fluoruros reportadas anteriormente y los obtenidos recientemente.
- Realizar la interpretación hidrogeoquímica de los resultados a partir de la elaboración de tablas, diagramas y mapas de isoconcentraciones.



- Realizar análisis estadístico a bases de datos de concentración de flúor para observar tendencias y anomalías que han seguido los pozos a través del tiempo.
- Comparar los niveles estáticos y/o dinámicos históricos para determinar zonas con mayor abatimiento en el acuífero.
- Definir si existe alguna correlación entre los abatimientos del nivel estático y/o dinámico con las concentraciones de flúor en el área de estudio.



Capítulo 2. MARCO TEÓRICO

2.1 Química del flúor

El flúor es el miembro más ligero del grupo de los halógenos y es uno de los más reactivos de todos los elementos químicos. Se presenta como gas diatómico en su forma elemental y tiene un número de valencia de -1 (Brindha y Elango, 2011). Se utiliza en su estado elemental gaseoso en algunos procesos industriales (Babu et al., 2015). Es el más electronegativo de todos los elementos (Hem, 1989 en Fawel et al., 2006) lo que significa que tiene una fuerte tendencia a adquirir una carga negativa, y en solución forma iones F^- . Otros estados de oxidación no se encuentran en los sistemas naturales, aunque pueden ser complejos sin carga. Los iones de fluoruro tienen la misma carga y casi el mismo radio que los iones de hidróxido y pueden reemplazarse entre sí en estructuras minerales (Hem, 1985 en Fawel et al., 2006). Esto representa un factor de gran importancia en su comportamiento y ocurrencia geoquímica. En menor grado, el ion fluoruro puede reemplazar de manera isomorfa a los iones de cloruro, Cl^- (radio: 1.81 Å), y a iones de oxígeno, O^{2-} (radio: 1.40 Å) (Fleischer y Robinson, 1963 en Shawe 1976).

El flúor gaseoso puede alcanzar cierta estabilidad al presentarse como una molécula biatómica, pero aun así resulta difícil de manejar por su gran reactividad química y por poseer un enlace covalente sorprendentemente débil. La pequeña energía de disociación de su molécula biatómica hace que sea altamente reactivo, participando mayoritariamente en reacciones exotérmicas. Esta característica lo hace altamente tóxico, por ello debe ser manejado con gran cuidado y debe evitarse cualquier contacto con la piel y ojos, debido a que puede causar irritaciones y/o quemaduras severas (Fawell et al., 2006).

El flúor reacciona con otros elementos para producir compuestos iónicos como fluoruro de hidrógeno y fluoruro de sodio en agua y en formas de disociación ion fluoruro cargado negativamente (Ayoob y Gupta, 2006).



El flúor forma complejos minerales con un gran número de cationes y algunas especies minerales bastante comunes de baja solubilidad contienen fluoruro. Por lo tanto, el flúor en el medio ambiente se encuentra en forma de fluoruros que juntos representan alrededor del 0,06% al 0,09% de la corteza terrestre. Los fluoruros se encuentran en niveles significativos en una amplia variedad de minerales, incluyendo espato flúor, roca fosfórica, criolita, apatita, mica, hornblenda y otros (Murray, 1986 en Fawel et al., 2006). La fluorita (CaF_2) o espato flúor es un fluoruro común mineral de baja solubilidad presente en rocas ígneas y sedimentarias.

La presencia de flúor en aguas naturales está estrechamente relacionada con su abundancia en minerales y rocas locales. También es fuertemente asociado con la solubilidad mineral y en este sentido la fluorita siendo menos soluble y con cinética favorable de disolución a baja temperatura, ejerce el control principal de concentraciones acuosas en el medio natural. Un límite superior de la actividad del fluoruro en solución acuosa está controlado por el producto de solubilidad, K_{fluorita} (Edmunds y Smedley, 2012).

De ahí que las concentraciones de fluoruro en las aguas de consumo estén en estrecha relación con las características geológicas de cada territorio. La limitación de su concentración en el agua se asocia con su misma solubilidad (Fawell et al., 2006).

2.2 Geoquímica del flúor

El agua de lluvia que cae sobre la tierra se enriquece en CO_2 del suelo, aire y reacciones bioquímicas de bacterias y materia orgánica durante su descenso, las sales secundarias presentes en el suelo (mezcla de contenido variable de NaHCO_3 , NaCl y Na_2SO_4) también se están lixiviando. Adicionalmente, si se aplican fertilizantes fosfatados en el suelo, éste puede contener proporciones variables de compuestos que contienen flúor. Simultáneamente, se produce una reacción de intercambio iónico con cationes



intercambiables presentes en el complejo arcilloso del suelo como la siguiente (Ayoob y Gupta, 2006):

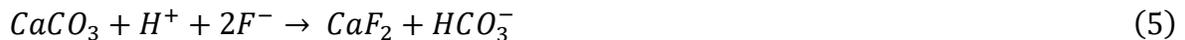


donde X es el mineral de arcilla.

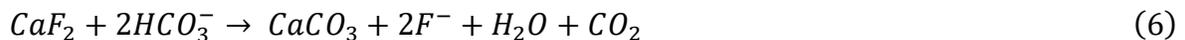
La disolución de CO_2 tiende a aumentar la concentración de iones de hidrógeno en aguas subterráneas de acuerdo a las siguientes reacciones:



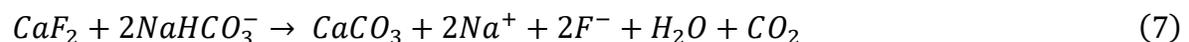
Los minerales calcáreos, en particular el $CaCO_3$, si están presentes, también pueden disolverse como bicarbonatos:



Por otra parte, el agua alcalina puede movilizar F^- de suelos, rocas erosionadas y CaF_2 precipitando $CaCO_3$ como:



En presencia de un exceso de bicarbonatos de sodio en el agua subterránea, la disolución del fluoruro será alta y esto se puede expresar como:





En general, la concentración de fluoruro en el agua subterránea depende de la concentración de minerales que contienen flúor en los tipos de rocas y principalmente en sus actividades de descomposición y disolución a través de interacciones roca-agua. Un ambiente alcalino (dentro de un rango de pH de 7,6 a 8,6) con un alto contenido de concentración de bicarbonato es más propicia para la disolución del fluoruro en las aguas subterráneas, lo que sugiere que el pH del agua subterránea es más importante para determinar la concentración de fluoruro (Brindha y Elango, 2011).

Por lo tanto, la erosión de los minerales primarios en rocas y la lixiviación de minerales que contienen fluoruro, son los principales procesos que producen fluoruro en solución. El mineral que determina predominantemente la concentración de fluoruro en agua natural es fluorita.

El CaF_2 tiene un producto de solubilidad de

$$K_{ps} = [F^-]^2[Ca^{2+}] = 4.0 \times 10^{-11} \quad (8)$$

Dado que el producto de solubilidad de la fluorita es muy bajo (ecuación 8), las aguas con bajo contenido de calcio deben tener altas concentraciones de flúor. Los tipos de agua subterránea bicarbonatada sódica y bicarbonatada clorurada sódica en presencia de minerales fluorados generalmente tienen altas concentraciones de fluoruro.

2.3. Ciclo hidrogeoquímico del flúor

2.3.1 Entrada superficial y atmosférica de flúor

El ciclo hidrogeoquímico del flúor se ilustra en Figura 1. El ciclo implica la transferencia de flúor a la atmósfera por emisiones volcánicas, evaporación, aerosoles marinos y contaminación industrial. En la geósfera, la absorción y liberación de flúor están controladas por diversas interacciones agua-roca y por aportes de fuentes antropogénicas.

Las precipitaciones constituyen un componente importante del ciclo, en donde las fuentes de flúor en la lluvia incluyen aerosoles marinos, emisiones volcánicas e introducción



antropogénica de clorofluorocarbonos (CFC) y emisiones industriales (Edmunds y Smedley, 2012).

Los aerosoles industriales se producen especialmente a partir de la quema de carbón, fabricación de ladrillos y fundición de aluminio (Fuge y Andrews, 1988 en Edmunds y Smedley, 2012) y la exposición al flúor también está relacionada con la quema del carbón doméstico (Finkelman et al., 1999 en Edmunds y Smedley, 2012).

Las concentraciones de fluoruro en las precipitaciones son escasas. Los aerosoles marinos contribuyen al aumento de flúor en el ambiente; las lluvias en zonas costeras muestran una composición de elementos volátiles de cloro en 10 mg L^{-1} y flúor de $0,68 \text{ mg L}^{-1}$. En muchas áreas continentales donde las concentraciones de Cl^- en lluvia es cercana o está por debajo de 1 mg L^{-1} , las entradas de flúor a corrientes y aguas subterráneas desde estas aguas provenientes de precipitaciones son iguales o inferiores a $0,1 \text{ mg L}^{-1}$.

2.3.2 Fuentes minerales de fluoruro

El flúor es más abundante en la corteza terrestre (625 mg kg^{-1}) que su elemento hermano halógeno, el cloro (130 mg kg^{-1}). El cloruro es muy móvil en el medio acuoso y la mayoría se encuentra en los océanos. Por el contrario, el flúor es principalmente retenido en minerales, tiene un radio iónico muy similar al de OH^- y sustituye fácilmente posiciones de hidroxilo en minerales de formación tardía en rocas ígneas. Es móvil en condiciones de alta temperatura y es un elemento ligero y volátil que se encuentra junto con el boro y en menor cantidad con cloruro en soluciones hidrotermales (Edmunds y Smedley, 2012).

Por lo tanto, las concentraciones de fluoruro generalmente se originan por procesos geológicos. La mayoría se encuentra en rocas ígneas ácidas, vetas mineralizadas y formaciones sedimentarias donde se han producido reacciones biogeoquímicas. El flúor se encuentra en minerales primarios, especialmente biotitas y anfíboles, donde sustituye posiciones del hidroxilo en la estructura mineral. Un ejemplo es la biotita:





Con la intemperie, el flúor tiende a liberarse preferentemente de estos minerales donde biotitas y anfíboles son abundantes, como por ejemplo en el granito; estos constituyen una importante fuente de fluoruro en cuerpos de agua. La fluorita (CaF_2) es el principal mineral de flúor, que ocurre en depósitos de vetas hidrotermales secundarias localizadas y como un mineral autigénico relativamente raro en sedimentos (Edmunds y Smedley, 2012).

En los sedimentos marinos el flúor se concentra tanto por adsorción sobre arcillas y también por procesos biogeoquímicos que implica la eliminación de fósforo. Las calizas pueden contener concentraciones localizadas de fluorapatita, especialmente francolita. La mayoría de las areniscas contienen concentraciones muy bajas de flúor y, por lo tanto, el flúor en las aguas subterráneas residentes también puede ser bajo (Edmunds y Smedley, 2012).

2.3.3 Fuentes y reacciones en los suelos

La cantidad de fluoruro adsorbido por los suelos varía según el tipo de suelo, pH del suelo, salinidad y concentración de fluoruro (Fuhong y Shuquin 1988; Lavado y Reinaudi 1979 en Edmunds y Smedley, 2012). La adsorción se favorece en condiciones ligeramente ácidas y la absorción de suelos ácidos pueden ser hasta diez veces mayores que los suelos alcalinos. Los suelos de grano fino retienen generalmente el flúor mejor que los tipos arenosos. La adsorción de iones fluoruro libera los iones intercambiables hidroxilo (OH^-). El punto de menor movilidad del flúor se da en el rango de pH 6.0-6.5, la movilidad de este incrementa al disminuir el pH del rango de punto mínimo de movilidad, esta movilidad aumenta debido a la formación de complejos $[\text{AlF}]^{2+}$ y $[\text{AlF}_2]^+$ en solución. Los suelos de grano fino retienen mayormente el flúor que los tipos de arena. La adsorción de flúor es fuertemente favorecida por la presencia de precipitados de $\text{Fe}(\text{OH})_3$ y $\text{Al}(\text{OH})_3$ los cuales reaccionan fácilmente con los iones fluoruros. Los minerales arcillosos son también adsorbentes como lo es también la materia orgánica en el suelo (Fuge y Andrews 1988 en Edmunds y Smedley, 2012).



2.3.4 Fluoruro en solución

La presencia de flúor en aguas naturales está estrechamente relacionada con su abundancia en minerales y rocas locales. También está fuertemente asociado con la solubilidad mineral y en este sentido la fluorita, siendo menos soluble y con cinética de disolución favorable a baja temperatura, ejerce el principal control de concentraciones acuosas en el medio natural. Un límite superior de la actividad del fluoruro en solución acuosa está controlado por el producto de solubilidad, K_{fluorita} (Edmunds y Smedley, 2012).



$$K_{\text{Fluorita}} = [\text{F}^-]^2[\text{Ca}^{2+}] = 10^{-10.57} \text{ a } 25^\circ\text{C} \quad (10)$$

$$\text{o } \text{Log}K_{\text{Fluorita}} = [\text{Ca}^{2+}] + 2\text{log}[\text{F}^-] = -10.57 \quad (11)$$

2.3.5 Distribución de fluoruro en aguas subterráneas

Las aguas subterráneas con alto contenido de fluoruro son típicamente de tipo Na-HCO₃ con concentraciones de Ca relativamente bajas (<20 mg L⁻¹), y con valores de pH neutros a alcalinos (alrededor de 7-9). Los problemas de fluoruro se encuentran principalmente en las aguas subterráneas del basamento de los acuíferos (Figura 1), en particular granitos, donde los minerales ricos en flúor son abundantes; en zonas volcánicas activas donde el flúor se deriva de las rocas volcánicas y fuentes geotermales y aguas subterráneas en algunos sedimentos, particularmente en zonas áridas (Edmunds y Smedley, 2012).

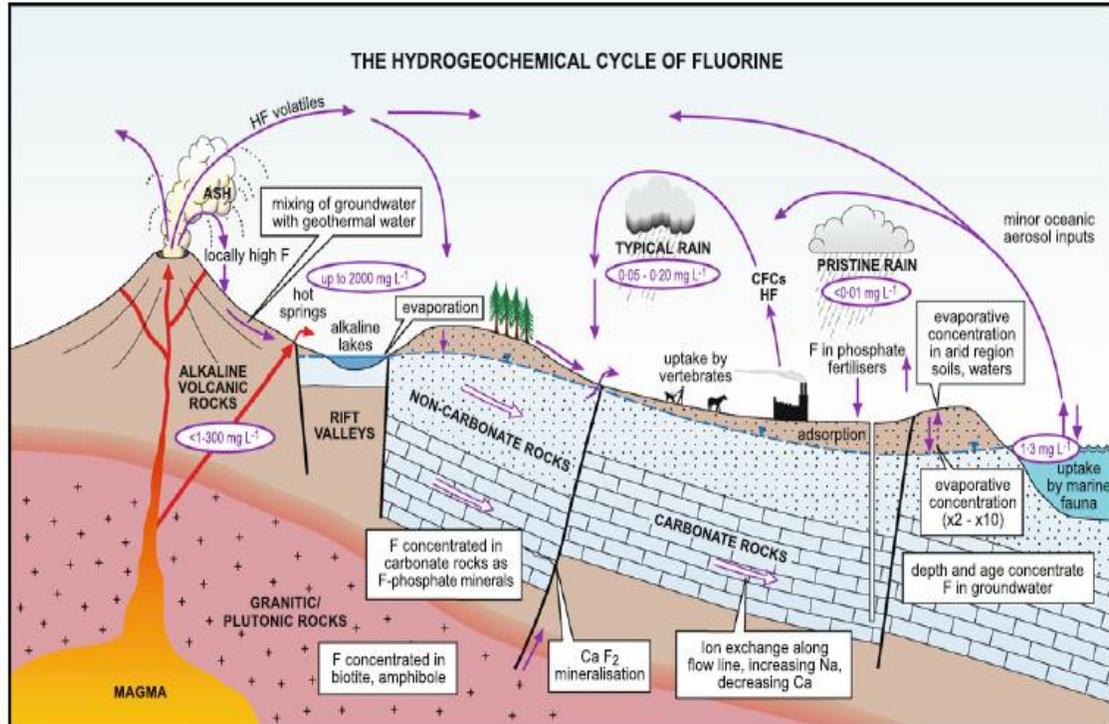


Figura 1 Ciclo hidrogeoquímico del fluoruro. Fuente: Edmunds y Smedley, 2012

2.4 Fuentes de flúor

Las grandes extensiones geográficas en las que se pueden hallar elevadas concentraciones de flúor dentro del agua subterránea se encuentran asociadas con sedimentos de origen marino en áreas montañosas (como el caso de Irak), rocas volcánicas (África y México) y rocas graníticas y gneiss, ambas rocas metamórficas, como son los casos de China e India, entre otros (Fawell et al., 2006). Tanto aguas someras como profundas pueden verse afectadas, esto, como resultado de la disolución de la fluorita, apatita u otro tipo de roca que lo contenga. Pero de manera más general, la concentración de flúor dentro del suelo se ve incrementada conforme aumenta la profundidad del mismo, así como de la fracción de minerales arcillosos, la química del suelo en general y el clima (Ayoop y Gupta, 2006).

Aun cuando el agua natural es considerada la principal fuente de flúor en el consumo humano, existen otras aportaciones que, dependiendo del área en estudio, pueden ser de igual



o mayor importancia en la determinación de la cantidad de flúor que es ingerido por el ser humano, y la evaluación de la susceptibilidad a los riesgos a los que puede ser expuesto.

2.4.1 Fuentes naturales

El fluoruro ingresa al cuerpo humano a través de una variedad de fuentes, a saber, agua, comida, aire, medicamentos y cosméticos. La principal fuente natural de fluoruro en el suelo es la propia roca madre. La fluorita, el único mineral principal de flúor en la naturaleza, ocurre principalmente como un mineral accesorio en rocas graníticas. Las rocas de granito contienen concentraciones de fluoruro de 20 a 3600 ppm; apatita, anfíboles, pegmatita, hornblenda, moscovita, biotita, micas, ciertos tipos de arcillas y villiaumita también contienen flúor (Ayoob y Gupta, 2006).

2.4.1.1 Fluoruro en el suelo

El contenido de fluoruro en el suelo normalmente varía de 200 a 300 ppm. Dado que los fluoruros son retenidos a través de fuertes asociaciones con los componentes del suelo, el fluoruro no se lixivia fácilmente. El contenido de fluoruro en el suelo aumenta con la profundidad, y solo del 5 al 10% del total de fluoruro en el suelo es soluble en agua (Nomnink, 1953 en Ayoob y Gupta, 2006). El destino de los fluoruros inorgánicos liberados en el suelo también depende de la forma química, la tasa de deposición, la química del suelo y el clima.

En suelos ácidos con pH por debajo de 6 la mayoría de los fluoruros se encuentran en complejos con aluminio o hierro. El fluoruro se une a la arcilla desplazando hidróxidos de la superficie de la arcilla. La adsorción depende en gran medida del pH y la concentración de fluoruro. Es más significativo a pH 3 y 4, y disminuye por encima de pH 6.5. La aplicación de fertilizantes en el riego da como resultado la presencia de Cl^- , SO_4^{-2} , NO_3^- y F^- en aguas subterráneas. Se observa un mayor contenido de flúor en las aguas subterráneas de las tierras de regadío y suelos, principalmente por alcalinización (Ayoob y Gupta, 2006).



2.4.1.2 Fluoruro en alimentos y bebidas

Prácticamente todos los productos alimenticios contienen al menos trazas de fluoruro, ya que es omnipresente en el medio ambiente. El flúor está ingresando a las cadenas de alimentos y bebidas en cantidades crecientes a través del consumo de té, trigo, espinacas, repollo, zanahorias y otros alimentos. El fluoruro en estos productos presumiblemente resulta del uso de suelo o agua fluorada a base de fertilizantes para el procesamiento de alimentos y bebidas.

En esta clasificación entra cualquier alimento y bebida diferente al agua natural. Los productos dentales, como lo es la pasta de dientes y enjuagues bucales, que aun cuando no son propiamente un alimento y que ayudan a la prevención de caries, se estima que pueden llegar a contribuir a una ingestión diaria de 0.50 a 0.75 mg/día por niño que acostumbre a comer pasta de dientes (Fawell et al., 2006).

El porcentaje en que contribuyen las frutas y verduras se podría considerar pequeño, al igual que en la mayoría de las carnes y algunos pescados, con un nivel bajo relativo de 2.0-5.0 mg/kg, concentración que se encuentra principalmente fijada en los huesos de los pescados. Sin embargo, se pueden encontrar altas concentraciones de flúor en el arroz y cebada, con cerca de 2 mg/kg (Fawell et al., 2006). Aun cuando el flúor se acumula en los huesos, los enlatados de pescados y sus concentrados proteínicos pueden llegar a contener altas concentraciones en flúor, hasta 370 mg/kg (Fawell et al., 2006).

Los productos lácteos, por lo general, contienen bajos niveles en flúor. Por otro lado, se ha observado que los tibetanos ingieren altas cantidades de flúor debido al consumo de té en bloque (brick tea) llegando a consumir 14 mg por día (Fawell et al., 2006). Este tipo de té es hecho de hojas viejas, totalmente secas, que contienen niveles de flúor mucho más elevados que el té negro o verde. Otras fuentes que pueden contribuir significativamente en la ingestión diaria de flúor son los vinos, cervezas y bebidas dulces en general (refrescos y jugos), esto dependiendo del lugar en el que se produce o el tipo de agua que se empleó para su producción. En México el gran consumo en refrescos ha demostrado que puede contribuir



de manera considerable en la cantidad de flúor ingerida. En el estudio realizado en San Luis Potosí (Díaz, 1997 en Edmunds y Smedley, 2012) se detectaron niveles de hasta 3.5 mg/l en las muestras analizadas.

2.4.2 Otras fuentes

Las fuentes de fluoruro en el medio ambiente también incluyen fundiciones de aluminio, plantas industriales que fabrican ácido fluorhídrico, plantas de fertilizantes fosfatados, trabajos de esmalte, vidrio, ladrillos y tejas, teñido de textiles, fábricas e industrias de plásticos consumir carbón no coquizable con alto contenido de azufre, como las centrales térmicas (Ayooob y Grupta, 2006).

Actualmente se generan grandes cantidades de efluentes industriales que contienen fluoruro de industrias de alta tecnología que fabrican semiconductores e integradas. Los cigarrillos, con un promedio de 236 ppm de fluoruro, contribuyen significativamente en la ingesta de flúor por humanos. Los utensilios de cocina revestidos de teflón pueden también contribuir a la absorción de fluoruro por parte de los seres humanos. La concentración de fluoruro se encontró que aumentaba a casi 3 ppm en utensilios de cocina recubiertos de teflón, pero en artículos de aluminio, estaba disminuyendo. En acero inoxidable y cerámica también se encontró que la concentración de fluoruro estaba aumentando, pero en menor grado. El fluoruro en el agua puede iniciar la lixiviación de aluminio de los utensilios de cocina y cobre de tuberías en concentraciones normales y altas, respectivamente (Ayooob y Grupta, 2006).

2.5 Factores que influyen en la formación de F^- en las aguas subterráneas

La mayor parte del F^- que se encuentra en las aguas subterráneas se produce naturalmente a partir de la erosión de las rocas, la descomposición de los suelos y deposición de contaminantes atmosféricos. En el agua subterránea, la concentración natural de F^- depende de los factores geológicos, características físicas y químicas del acuífero, la porosidad y acidez del suelo y las rocas, la temperatura, la acción de otros productos químicos



y la profundidad de los pozos. Debido al gran número de variables, las concentraciones de F^- en el agua subterránea puede variar desde $<1.0 \text{ mg L}^{-1}$ a $>35.0 \text{ mg L}^{-1}$ (Meenaksi y Maheshwari, 2006).

2.5.1. Interacción agua-roca

La interacción agua-roca es responsable de la liberación de F^- de la matriz del acuífero al agua subterránea. Madhnure et al. (2007) concluyeron que la interacción agua-roca es el proceso principal en el que los minerales ricos en F^- se descomponen/disocian de la roca fuente y el F^- se disuelve en el agua subterránea por disolución (Saxena y Ahmed, 2003). La influencia de la litología local, ayudada por otros factores como un clima semiárido, puede ser responsable de una mayor concentración de F^- en el agua subterránea.

2.5.2. Acuíferos profundos

La alta concentración de F^- en los acuíferos más profundos en comparación con los acuíferos poco profundos podría deberse a su alto tiempo de residencia en el sistema acuífero; por lo tanto, tiene un tiempo de contacto más largo para la disolución de los minerales portadores de F^- presentes (Ramakrishnan, 1998 en Babu et al., 2015). Generalmente las aguas subterráneas de los acuíferos con lecho rocoso de granitos alcalinos y metamórficos se enriquecen de F^- (Banks et al., 1995 en Babu et al., 2015). El agua subterránea que circula profundamente por basamentos graníticos y metamórficos generalmente se enriquecen en cationes principales y alcalinidad, y tienen un pH más alto. Sin embargo, el Ca^{2+} se agota por precipitación de calcita ($CaCO_3$) a un pH más alto de un acuífero profundo (Shanker et al., 2003). Otra fuente de F^- es el intercambio de iones de hidróxido (OH^-) a $pH > 8.5$ por iones F^- en posiciones susceptibles en arcillas y micas que están presentes en sedimentos arcillosos en los sistemas acuíferos (Rastogi y Gaumat, 1999 en Babu et al., 2015).

Las aguas alcalinas intercambian F^- de minerales como la fluorapatita con OH^- , ya que OH^- y F^- tienen la misma carga y reacción iónica casi igual. El agua subterránea en varios



acuíferos muestra incrementos progresivos de F^- a lo largo de las líneas de flujo y demuestra la importancia del tiempo de residencia y su posición en la secuencia de flujo y reacción. La acumulación de F^- en el agua está limitada en última instancia por la solubilidad de los minerales. En aguas subterráneas donde el calcio es abundante, las concentraciones de F^- están limitadas por la saturación con fluorita. En los casos en que las concentraciones de calcio sean bajas, o donde el calcio se elimina por intercambio iónico, el F^- puede acumularse hasta concentraciones excesivas y peligrosas (Edmunds y Smedley, 2012).

2.5.3. pH

A un pH alto podría presentarse el intercambio de iones OH^- por iones F^- en filosilicatos, principalmente arcillas y micas erosionadas como biotita y moscovita que están presentes en sedimentos de grano fino. Probablemente se necesitan valores de pH superiores a 8,5 para que este proceso sea una fuente relativa de F^- sustancial a la disolución de minerales porque la concentración de iones OH^- sería demasiado baja a valores de pH más bajos (Ramamohana et al., 1993 en Babu et al., 2015). Los minerales arcillosos, como el caolín, pueden retener iones F^- en sus superficies, pero a pH alto, los iones OH^- pueden desplazar iones F^- , que luego se liberan al agua subterránea (Sreedevi et al., 2006 en Babu et al., 2015). Los valores de pH son relativamente más altos en los acuíferos profundos (Frengstad et al., 2001 en Babu et al., 2015).

2.5.4. Profundidad de pozo

La relación entre la concentración de iones F^- y la profundidad del pozo es importante. Apambire et al. (1997) en Babu et al. (2015) han demostrado que F^- en el agua subterránea aumenta con la profundidad. Guo et al. (2007) informaron que las altas concentraciones de F^- en el agua subterránea se encuentra en las áreas de descarga, especialmente en los lugares donde el acuífero se encuentra en un nivel poco profundo.



2.6 Absorción en los humanos

Aproximadamente del 75 al 90% del flúor ingerido por el ser humano es absorbido a través del tracto digestivo. De esta cantidad que se encuentra circulando dentro del cuerpo humano, el fluoruro es rápidamente distribuido y controlado principalmente por el pH y la capacidad de almacenamiento de los huesos, reduciéndose el porcentaje absorbido en presencia de pH altos y de una mayor formación de complejos de calcio, magnesio, fósforo y aluminio. Sin duda el almacenamiento en los huesos es el factor más importante, ya que aproximadamente el 99% del flúor ingerido es absorbido en los huesos. Dentro del cuerpo humano, la presencia de flúor en los fluidos de los tejidos se da como ion de flúor y/o HF (Fawell et al, 2006; Ayoop y Gupta, 2006).

La edad y la dieta de las personas son consideradas como condiciones variantes que determinan la cantidad de flúor que puede ser absorbido o retenido por el cuerpo y fijado en los huesos. Se ha demostrado que una dieta rica en proteínas genera una orina más ácida que una dieta vegetariana, lo que trae como resultado una mayor retención del flúor en el cuerpo, es decir, una menor excreción del mismo, a causa del bajo pH. Aun así, no se ha podido definir correlación alguna entre los efectos producidos por el flúor entre una persona vegetariana y una no vegetariana (Fawell et al., 2006).

Dentro de los tejidos blandos, como el plasma, órganos y resto de líquidos corporales (líquido intracelular y líquido intersticial), el fluoruro no se ve acumulado, pero se mantiene constante al circular como fluoruro de hidrógeno, es por ello que la concentración ingerida se puede ver reflejada dentro de la sangre (Ayoop y Gupta, 2006). La relación de la concentración de fluoruro que existe entre los fluidos de otros tejidos y el plasma (T/P), se mantiene del 40% al 90%, lo que equivale a una relación de 0.4 a 0.9 con algunas excepciones, como lo es el riñón y la placenta en los últimos meses de embarazo, los cuales exceden la proporción T/P promedio.

La concentración de flúor en el tejido adiposo del cerebro es menor o igual al 20% de la que posee el plasma. La eliminación de fluoruro del plasma se da principalmente por



dos mecanismos: por absorción en huesos y la excreción por la vía urinaria. La exclusión del flúor por medio de la absorción de los huesos es mayor en los niños que en los adultos, debido a que su sistema óseo se encuentra en crecimiento a comparación del adulto el cual es más compacto (Fawell et al., 2006).

2.7 Efectos en los humanos

El consumo de flúor puede generar efectos positivos y negativos en la salud. Se ha demostrado que concentraciones menores a 0.1 mg/l están asociadas con la caída de dientes; concentraciones que van de 0.8 a 1.5 mg/l están asociadas con los niveles más bajos en la presencia de caries, obteniendo así el mayor beneficio del flúor dentro de este rango; concentraciones mayores a 1.5 mg/l dan inicio a efectos en detrimento de la salud. Los primeros efectos se generan en los dientes, siendo básicamente aspectos cosméticos, como es el caso del desgaste del esmalte (Ayoop y Gupta, 2006).

2.7.1 Fluorosis dental

El esmalte dental está compuesto principalmente de hidroxiapatita (87%) que es fosfato de calcio cristalino (Brudevold y Soremark, 1967 en Brindha et al., 2011). El fluoruro, que es más estable que la hidroxiapatita, desplaza los iones hidróxido de la hidroxiapatita para formar fluoroapatita. Con la continuación prolongada de este proceso, los dientes se vuelven duros y quebradizos. A esto se le llama fluorosis dental. La fluorosis dental en las etapas iniciales hace que el diente se coloree desde amarillo a marrón e incluso hasta negro. Dependiendo de la gravedad, puede ser solo la decoloración de los dientes o la formación de hoyos en los dientes. La coloración de los dientes puede presentarse en forma de manchas o rayas. Por lo general, estas rayas en los dientes son horizontales. Los niños que están expuestos al exceso de flúor desde la infancia muestran síntomas de fluorosis con mucha frecuencia en comparación con los adultos (Brindha y Elango, 2011). La fluorosis dental en



un adulto es el resultado de una alta exposición al fluoruro cuando el adulto era niño o adolescente (Fawell et al., 2006).

Es un trastorno que inicia en la etapa de odontogénesis por ingestión excesiva de flúor que se caracteriza por la presencia de manchas blancas, opacas o manchas amarillas. Puede ser clasificada en tres categorías: (Fawell et al., 2006).

- Fluorosis dental leve o de esmalte, caracterizada por dientes moteados (manchas opacas), originados por la presencia de flúor durante el desarrollo de los dientes, donde las proteínas del esmalte son retenidas y su porosidad se ve incrementada.
- Fluorosis dental moderada y severa: en ambos casos incrementa la porosidad extendiéndose las lesiones hasta el esmalte interior. Esto favorece que partículas pequeñas, al igual que las bacterias, puedan ser atrapadas comprometiendo así la función protectora para la salud del diente (lo que puede comprender la caída de dientes, pérdida de la función de los dientes, así como problemas psicológicos y sociales).

Al estar relacionada la fluorosis dental con la etapa de desarrollo de los dientes, se ha determinado que el periodo más crítico es de los primeros 6 a 8 años de vida (Fawell et al., 2006).

2.7.2 Fluorosis ósea

Dentro de la fluorosis ósea existen diferentes grados de afección, con tendencia potencial a generar deformaciones severas, así como a ocasionar la pérdida de movilidad en las extremidades. Estos efectos se dan como resultado de la mineralización del tejido óseo causando efectos sobre las células de los huesos (tanto células en formación, como en el proceso de reabsorción), reduciendo así la calidad del hueso (Fawell et al., 2006).

Las primeras etapas de la fluorosis esquelética comienzan con dolor en los huesos y las articulaciones, debilidad muscular, dolor esporádico, rigidez de las articulaciones y fatiga crónica. Durante las etapas posteriores se produce la calcificación de los huesos, la



osteoporosis en los huesos largos y los síntomas de la osteosclerosis donde los huesos se vuelven más densos y desarrollan una estructura cristalina anormal. En la etapa avanzada los huesos y las articulaciones se debilitan por completo y es difícil moverlos. Las vértebras de la columna se fusionan y el paciente queda lisiado, que es la etapa final. La fluorosis esquelética generalmente no se reconoce hasta que la enfermedad alcanza una etapa avanzada (Brindha y Elango, 2011).

En 1993 se afirmó que la fluorosis esquelética paralizante puede ocurrir en personas que han ingerido de 10 a 20 mg de fluoruro por día durante más de 10 a 20 años (Fawell et al., 2006).

2.7.3 Otros efectos

Otros trastornos de salud que ocurren debido al consumo de alto contenido de flúor en el agua potable son la degeneración de las fibras musculares, niveles bajos de hemoglobina, deformidades en los glóbulos rojos, sed excesiva, dolor de cabeza, erupciones cutáneas, nerviosismo, manifestaciones neurológicas, depresión, problemas gastrointestinales, mal funcionamiento del tracto urinario, náuseas, dolor abdominal, sensación de hormigueo en los dedos de manos y pies, inmunidad reducida, abortos repetidos o mortinatos, esterilidad masculina, etc. (Meenakshi y Maheshwari, 2006). Como el flúor se excreta en la orina a través de los riñones, éste afecta el funcionamiento eficaz de los riñones y facilita la formación de cálculos renales. Li y col. (1988) en Brindha y Elango, 2011 informaron que el fluoruro podría tener efectos genotóxicos. El consumo de agua potable con alto contenido de flúor por parte de los niños puede afectar su inteligencia. Sin embargo, Tang y col. (2008), quienes estudiaron este fenómeno, no pudieron encontrar un mecanismo por el cual se reduzca el coeficiente intelectual de los niños. Guan y col. (1999) en Brindha y Elango, 2011 sugirieron que cuando el contenido de fosfolípidos y ubiquinona se altera en el cerebro de ratas afectadas por fluorosis crónica los cambios en los lípidos de su membrana pueden ser la causa de este problema. Varios otros estudios realizados también



cumplen con este hecho (Trivedi et al., 2007). La presencia de un exceso de fluoruro en las aguas subterráneas tiene un impacto no solo en los seres humanos, sino también en la fertilidad del suelo y el crecimiento de plantas y animales (Brindha y Elango, 2011).

2.8 Problemática del flúor en acuíferos del estado de Chihuahua

Las características climatológicas que posee el estado de Chihuahua hacen que el uso del agua subterránea sea de gran importancia para consumo humano y el desarrollo agrícola e industrial de la región. Desgraciadamente, la creciente demanda de tales sectores ha provocado un desequilibrio entre la recarga y la extracción en gran parte de los acuíferos del estado. En algunas regiones la problemática del suministro se asocia también con el deterioro en la calidad del agua en los que se han detectado recientemente elevados niveles de flúor en el agua destinada al abastecimiento público. Las elevadas concentraciones de fluoruro son frecuentes en zonas áridas donde el flujo del agua es menor y, en consecuencia, el tiempo de contacto entre el agua y las rocas es más elevado.

El estado de Chihuahua, y en general el norte del país, han sido profundamente afectados por efectos de sequías que en ocasiones se han prolongado por varios años. Una de las consecuencias de este fenómeno es el abatimiento de los pozos de producción de agua potable; como resultado de la sobreexplotación, la calidad del agua se deteriora, mostrando un incremento en la salinidad que afecta negativamente su composición química (Rocha, 2002).

El problema de la sobreexplotación de acuíferos se agudiza en: 1) zonas áridas, 2) áreas con alto crecimiento demográfico y 3) áreas donde se extrae agua subterránea para irrigación intensiva de cultivos. La zona centro de Chihuahua está sometida a uno o más de estos factores de presión, además de otros factores climatológicos eventuales como son la sequía y el aumento de temperatura ambiente por el calentamiento global (Gutiérrez et al., 2016).



Uno de los síntomas de la desertificación es la salinización progresiva del suelo y del agua de las cuencas (López, 2000). Entre más agua se extrae del subsuelo, más se concentran las sales en los acuíferos (Kidd, 2002; Chávez, 2006). La sobreexplotación del agua subterránea también contribuye al aumento de la concentración de arsénico y/o metales pesados (García, 2006), los cuales tienen efectos nocivos en la salud de las personas que consumen agua así contaminada (Calderón, 2006). En el estado de Chihuahua no sólo el agua de los pozos agrícolas se está salinizando y sodificando de forma progresiva; existen pozos de agua para consumo humano que ya tienen problemas de contaminación por arsénico y metales pesados, como ocurre en los acuíferos de Tabalaopa-Aldama, Meoqui-Delicias, Jiménez-Camargo y Valle de Juárez (CNA, 2006).

2.9 Disponibilidad de agua en los acuíferos del estado de Chihuahua

Chihuahua es el estado más extenso del país, conformado por 68 municipios; más del 76% de la población se encuentra concentrada en seis de ellos: Juárez, Chihuahua, Cuauhtémoc, Parral, Delicias y Nuevo Casas Grandes. Además de mostrar una alta concentración poblacional, geográficamente la mayor parte del estado corresponde a regiones áridas y/o semiáridas donde las lluvias son irregulares y/o escasas. Las necesidades del recurso hídrico por parte de la población son abastecidas por 5 regiones hidrológicas en las cuales hay cuencas sobreexplotadas; aunado a ello esta concentración de población se sitúa en el área más árida, por lo que el manejo, uso y acceso al agua debe ser de una forma eficiente.

Gran parte del estado de Chihuahua (74 %) se encuentra localizado en el norte árido de México. Las cuencas y ríos se comparten entre municipios y algunos con los estados fronterizos de Sonora, Sinaloa, Durango y Coahuila, así como en la frontera norte con los estados de Texas y Nuevo México de Estados Unidos. Entre las fuentes de agua que el estado de Chihuahua comparte con Estados Unidos se encuentra el Río Bravo, que además cumple



su función como línea divisoria entre ambos países (Jiménez, 2005). Una de estas fuentes subterráneas que se comparte es el Bolsón del Hueco, que es utilizado por ambas ciudades fronterizas (Ciudad Juárez y El Paso) en su mayoría para consumo doméstico (Zárate, 2006). Con el fin de lograr un manejo compartido de las fuentes de agua, se han generado tratados internacionales entre ambos países, como son el Tratado de 1906, que establece la cantidad de agua que debe otorgar Estados Unidos al Valle de Juárez en México, el Tratado de Aguas de 1944 que describe el uso que se le puede dar a los ríos Colorado, Tijuana y Bravo, así como el Acta 261 que maneja aspectos de contaminación ambiental que afectan los ríos fronterizos que se comparten (Anglés, 2006).

En lo que respecta a consumo y abastecimiento de agua en el Estado de Chihuahua, para el año 2020 la extracción total ascendió a 6405.8 hm^3 (Tabla 1), mientras la recarga media anual se mantuvo en 3735.8 hm^3 , el volumen concesionado en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDa) es de 3198.4 hm^3 y la disponibilidad total de agua subterránea en el Estado de Chihuahua corresponde a -3655.6 hm^3 (Diario Oficial de la Federación, 2020).

Adicionalmente, de los 61 acuíferos que integran el estado en la actualidad hay 42 que se encuentran en déficit; entre ellos, el acuífero Meoqui–Delicias cuyo recurso se utiliza principalmente para riego agrícola. Su alta tasa de explotación es preocupante por su importancia económica y rápido abatimiento. El balance indica que no existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario, el déficit es de $165,038,360 \text{ m}^3$ anuales que se están extrayendo a costa del almacenamiento no renovable del acuífero (Diario Oficial de la Federación, 2020).



Tabla 1 Disponibilidad Media Anual de Agua Subterránea de los Acuíferos del Estado de Chihuahua .(Diario Oficial de la Federación, 2020)

CLAVE	ACUÍFERO	R	DNC	VEAS					DMA	
				VCAS	VEALA	VAPTYR	VAPRH	TOTAL	POSITIVA	NEGATIVA (DÉFICIT)
CIFRAS EN MILLONES DE METROS CUBICOS ANUALES										
0801	ASCENSIÓN	132.2	0.0	237.300000	0.000000	3.956730	0.000000	241.256730	0.000000	-109.056730
0802	ALTA BABÍCORA	46.2	5.2	23.875900	15.901600	1.689000	0.000000	41.466500	0.000000	-0.466500
0803	BAJA BABÍCORA	90.6	0.0	103.455000	124.529000	1.139200	0.000000	229.123200	0.000000	-138.523200
0804	BUENAVENTURA	66.5	0.0	130.936000	85.845500	0.003066	0.000000	216.784566	0.000000	-150.284566
0805	CUAUHTÉMOC	299.4	0.0	305.180000	0.548420	1.319430	0.000000	307.047850	0.000000	-7.647850
0806	CASAS GRANDES	180.0	0.0	198.207000	3.023480	5.824360	0.000000	207.054840	0.000000	-27.054840
0807	EL SAUZ-ENCINILLAS	62.4	0.0	89.811400	28.611100	2.635830	0.000000	121.058330	0.000000	-58.658330
0808	JANOS	142.0	15.7	168.453000	0.000000	2.325520	0.000000	170.778520	0.000000	-44.478520
0809	LAGUNA DE MEXICANOS	35.1	0.0	37.074400	10.561500	5.876840	0.000000	53.512740	0.000000	-18.412740
0810	SAMALAYUCA	16.1	0.0	21.734400	7.788830	0.240000	0.000000	29.763230	0.000000	-13.663230
0811	LAS PALMAS	4.4	0.8	3.731910	0.000000	0.480000	0.000000	4.211910	0.000000	-0.611910
0812	PALOMAS-GUADALUPE VICTORIA	15.0	2.3	16.096100	0.000000	0.000000	0.000000	16.096100	0.000000	-3.396100
0813	LAGUNA TRES CASTILLOS	18.8	0.0	3.197820	65.479100	14.407300	0.000000	83.084220	0.000000	-64.284220
0814	LAGUNA DE TARABILLAS	36.4	0.0	19.512900	263.080000	40.910000	0.000000	323.502900	0.000000	-287.102900
0815	LAGUNA EL DIABLO	0.8	0.6	0.185515	0.015512	0.000000	0.000000	0.201027	0.000000	-0.001027
0816	ALDAMA-EL CUERVO	19.9	0.3	13.036900	0.180000	5.635470	0.000000	18.852370	0.747630	0.000000
0817	LAGUNA DE PATOS	11.0	0.0	10.564500	96.544700	0.783650	0.000000	107.892850	0.000000	-96.892850
0818	LAGUNA DE SANTA MARÍA	45.2	3.2	33.712300	427.466000	0.660000	0.000000	461.838300	0.000000	-419.838300
0819	LAGUNA LA VIEJA	77.1	0.0	43.716700	236.260000	14.160000	0.000000	294.136700	0.000000	-217.036700
0820	IGNACIO ZARAGOZA	73.9	0.0	1.060670	5.623480	0.000000	0.000000	6.684150	67.215850	0.000000
0821	FLORES MAGÓN-VILLA AHUMADA	137.5	0.0	246.941000	8.077890	1.107200	0.000000	256.126090	0.000000	-118.626090
0822	SANTA CLARA	59.2	35.8	37.211700	1.424000	1.257030	0.000000	39.892730	0.000000	-16.492730
0823	CONEJOS-MÉDANOS	18.8	0.0	12.985700	106.103000	1.785900	0.000000	120.874600	0.000000	-102.074600
0824	LAGUNA DE HORMIGAS	25.5	0.0	16.845600	262.705000	14.905300	0.000000	294.455900	0.000000	-268.955900
0825	EL SABINAL	37.5	0.0	31.244000	6.770480	20.096200	0.000000	58.110680	0.000000	-20.610680
0826	LOS LAMENTOS	9.7	0.0	1.928140	3.467170	4.536000	0.000000	9.931310	0.000000	-0.231310
0827	EL CUARENTA	3.6	0.0	2.153130	9.701100	0.810000	0.000000	12.664230	0.000000	-9.064230
0828	LOS MOSCOS	37.7	0.0	38.466700	0.000000	0.000000	0.000000	38.466700	0.000000	-0.766700
0829	JOSEFA ORTÍZ DE DOMÍNGUEZ	4.9	0.0	3.813250	0.000000	0.880000	0.000000	4.693250	0.206750	0.000000
0830	CHIHUAHUA-SACRAMENTO	56.6	0.0	99.109500	25.389900	0.816580	0.000000	125.315980	0.000000	-68.715980
0831	MEOQUI-DELICIAS	211.2	0.0	371.612000	3.323110	1.303250	0.000000	376.238360	0.000000	-165.038360
0832	JIMÉNEZ-CAMARGO	173.3	5.5	309.093000	44.949900	5.897030	0.000000	359.939930	0.000000	-192.139930
0833	VALLE DE JUÁREZ	125.9	0.0	199.311522	3.061820	0.257000	0.000000	202.630342	0.000000	-76.730342
0834	PARRAL-VALLE DEL VERANO	26.7	0.0	23.197900	37.358900	0.295036	0.000000	60.851836	0.000000	-34.151836
0835	TABALAOPA-ALDAMA	76.5	4.3	64.629100	13.743100	3.450840	0.000000	81.823040	0.000000	-9.623040
0836	ALDAMA-SAN DIEGO	62.5	1.5	80.152400	0.318080	28.077600	0.000000	108.548080	0.000000	-47.548080
0837	BAJO RÍO CONCHOS	116.2	0.8	17.534600	15.137800	63.093800	0.000000	95.766200	19.633800	0.000000
0838	ALTO RÍO SAN PEDRO	56.3	29.1	19.325900	18.314800	3.950580	0.000000	41.591280	0.000000	-14.391280
0839	MANUEL BENAVIDES	23.5	0.2	0.389747	0.000000	0.051721	0.000000	0.441468	22.858532	0.000000
0840	VILLALBA	17.5	4.4	12.327000	37.994000	6.599750	0.000000	56.920750	0.000000	-43.820750
0841	POTRERO DEL LLANO	23.7	8.5	1.390010	1.332990	6.860000	0.000000	9.583000	5.617000	0.000000
0842	ÁLAMO CHAPO	68.8	2.0	0.801069	2.290990	23.706200	0.000000	26.798259	40.001741	0.000000
0843	BOCOYNA	236.7	177.5	3.794540	5.595580	0.880037	0.000000	10.270157	48.929843	0.000000



0844	VALLE DE ZARAGOZA	104.7	101.1	5.373870	7.149320	6.136170	0.000000	18.659360	0.000000	-15.059360
0845	SAN FELIPE DE JESÚS	69.9	52.4	0.045088	0.759636	0.000000	0.000000	0.804724	16.695276	0.000000
0846	CARICHI-NONOAVA	250.0	187.5	3.094990	1.642780	0.360102	0.000000	5.097872	57.402128	0.000000
0847	LOS JUNCOS	133.6	0.1	64.815400	766.477000	0.000000	0.000000	831.292400	0.000000	-697.792400
0848	LAGUNA DE PALOMAS	23.1	0.0	16.651900	0.000000	7.569980	0.000000	24.221880	0.000000	-1.121880
0849	LLANO DE GIGANTES	18.8	0.0	4.198550	45.689600	20.463700	0.000000	70.351850	0.000000	-51.551850
0850	LAS PAMPAS	12.7	0.0	0.997000	0.042775	1.097000	0.000000	2.136775	10.563225	0.000000
0851	RANCHO EL ASTILLERO	20.6	0.0	6.195290	4.882510	8.064000	0.000000	19.141800	1.458200	0.000000
0852	LAGUNA DE JACO	16.0	0.0	0.678580	3.752370	0.900140	0.000000	5.331090	10.668910	0.000000
0853	RANCHO LA GLORIA	16.0	0.0	0.807253	0.755180	0.369125	0.000000	1.931558	14.068442	0.000000
0854	RANCHO DENTÓN	19.3	0.0	2.490000	0.326834	19.110000	0.000000	21.926834	0.000000	-2.626834
0855	LAGUNA LOS ALAZANES	27.5	0.0	29.412900	22.125800	17.033600	0.000000	68.572300	0.000000	-41.072300
0856	LAGUNA EL REY	1.0	0.0	0.416000	0.000000	0.021500	0.000000	0.437500	0.562500	0.000000
0857	ESCALÓN	15.7	8.0	5.448510	0.069125	1.301960	0.000000	6.819595	0.880405	0.000000
0861	VALLE DEL PESO	24.1	8.3	2.647600	0.159250	0.004072	0.000000	2.810922	12.989078	0.000000
TOTAL		3735.8	655.1	3198.4	2832.4	375.1	0.0	6405.8	330.5	-3655.6

R: recarga total media anual; DNC: descarga natural comprometida; VEAS: volumen de extracción de aguas subterráneas; VCAS: volumen concesionado/asignado de aguas subterráneas; VEALA: volumen de extracción de agua en las zonas de suspensión provisional de libre alumbramiento y los inscritos en el Registro Nacional Permanente; VAPTYR: volumen de extracción de agua pendiente de titulación y/o registro en el REPDA; VAPRH: volumen de agua correspondiente a reservas, reglamentos y programación hídrica; DMA: disponibilidad media anual de agua del subsuelo. Las definiciones de estos términos son las contenidas en los numerales “3” (fracciones 3.10, 3.12, 3.18 y 3.25), y “4” (fracción 4.3), de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015.

Capítulo 3. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

3.1 Localización y vías de acceso

El acuífero Meoqui-Delicias se encuentra ubicado en la porción centro-sur del estado de Chihuahua, México (Figura 2). Cubre una superficie aproximada de 4,830 km², 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 (CONAGUA, 2020).

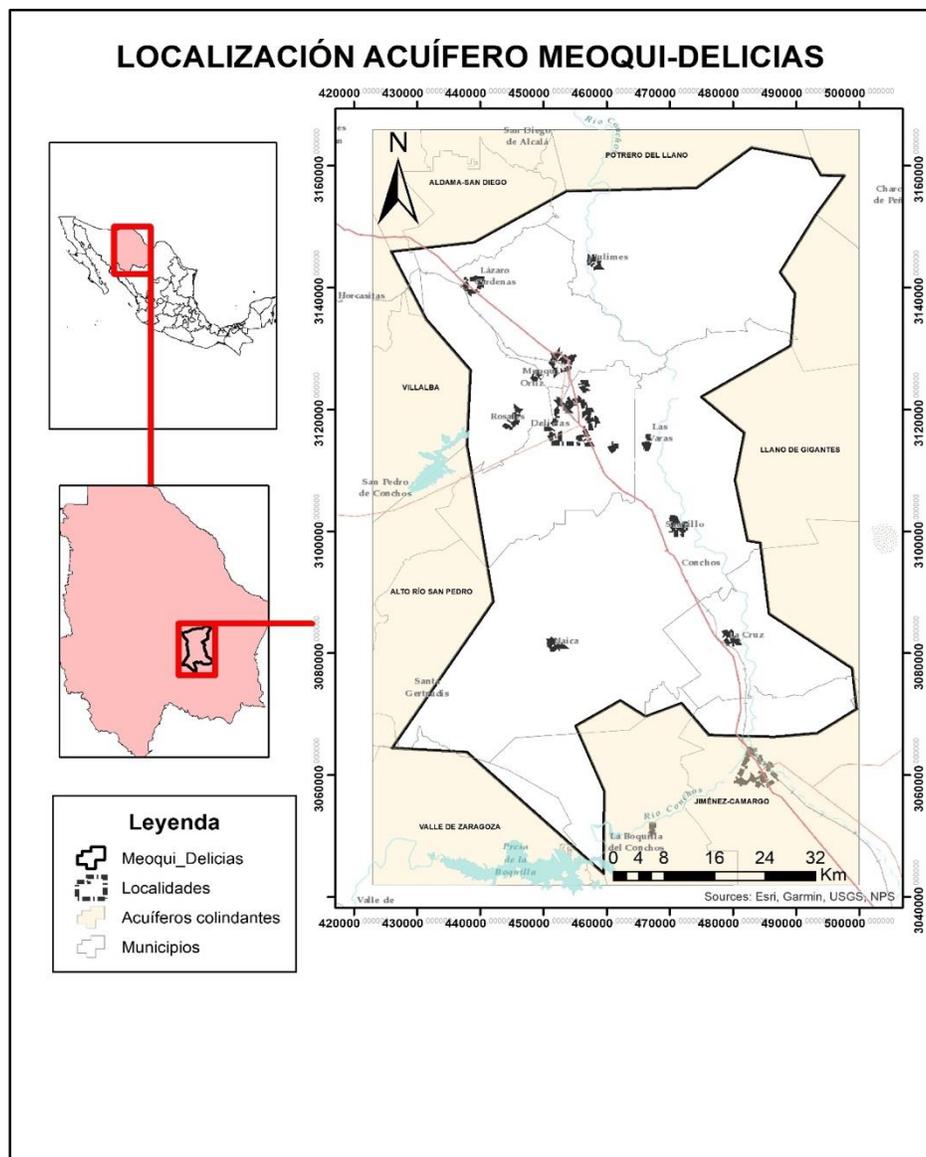


Figura 2 Localización del Acuífero Meoqui Delicias



Está delimitado geográficamente por los paralelos 27° 31' a 28° 35' de latitud norte y los meridianos 105° 45' a 105° 00' de longitud oeste. La altitud promedio en el valle es de 1200 msnm, mientras que las sierras más altas alcanzan altitudes entre 1500 y 2000 msnm (CONAGUA, 2020).

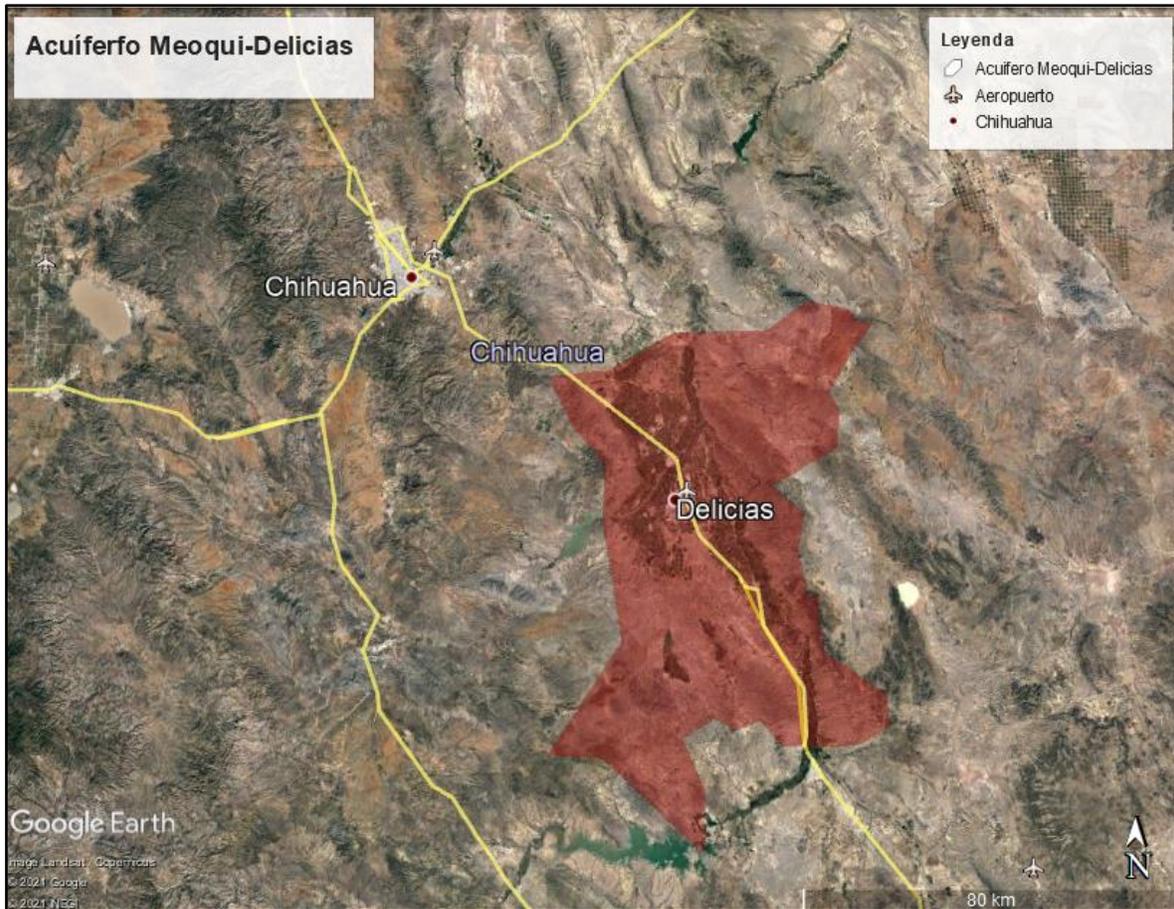


Figura 3 Vías de comunicación. Fuente: Google Earth Pro, 2021

La principal vía terrestre para acceder al acuífero es la Carretera Federal 45, también conocida como Carretera Panamericana, la cual recorre el centro y norte de México, desde la frontera con los Estados Unidos en Ciudad Juárez, Chihuahua hasta la población de Portezuelo, Hidalgo, siendo de las más importantes del país y tiene una longitud de 1920 km (Figura 3).



3.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero Meoqui-Delicias pertenece a la Región Administrativa VI Río Bravo. Actualmente no cuenta con un Comité Técnico de Aguas Subterráneas, COTAS. En el acuífero se encuentra en vigor el decreto de veda “Zona de Delicias” publicada en el DOF el 16 de julio de 1962, el cual abarca parcialmente los municipios de La Cruz, Julimes, Delicias, Rosales y Saucillo, así como la totalidad de Meoqui. La superficie restante del acuífero se encuentra en zona de libre alumbramiento (CONAGUA, 2020).

En el acuífero Meoqui-Delicias queda comprendido casi en su totalidad el Distrito de Riego (DR) 005 Delicias, quien es el mayor usuario del agua, tanto superficial como subterránea. A su vez, el acuífero se encuentra localizado dentro del Distrito de Desarrollo Rural (DDR) 013, Delicias. Existen además algunas Unidades de Riego para el Desarrollo Rural (CONAGUA, 2020).

3.3 Fisiografía

La zona se encuentra ubicada dentro de la Provincia Fisiográfica de Sierras y Cuencas (Figura 4), misma que se caracteriza por contener áreas desérticas, en las cuales se levantan sierras plegadas y falladas de manera dispersa, separadas por amplias llanuras rellenas de amplios espesores de depósitos aluviales y lacustres llamados bolsones (Figura 5) con orientación general NW-SE (CONAGUA, 2020).

Esta provincia constituye la prolongación meridional de la gran provincia del “Basin and Range” del suroeste de Estados Unidos de América. Concretamente el territorio al que se refiere el presente estudio, muestra sierras orientadas predominantemente de noroeste a sureste, las cuales emergen de grandes llanuras y bolsones, mismos que presentan una ligera inclinación hacia el noreste, precisamente en el sentido del flujo de las aguas de los ríos San Pedro y Conchos.

En cuanto a las serranías, observamos que gran parte de ellas se encuentran rodeadas de lomerío bajo y suave, mientras que la zona montañosa se observa escarpada en un ángulo

bastante pronunciado, con sierras abatidas por la acción de la erosión eólica y pluvial, dejando al descubierto grandes áreas rocosas, con faldeos pedregosos que llegan en su base a depositarse en el suelo sedimentario de la llanura. Entre las principales sierras de la región podemos nombrar las siguientes: El Carrizo, Ojuelos, Humboldt, La Boquilla, Palomas, Sierra El Pajarito y Sierra Alta.

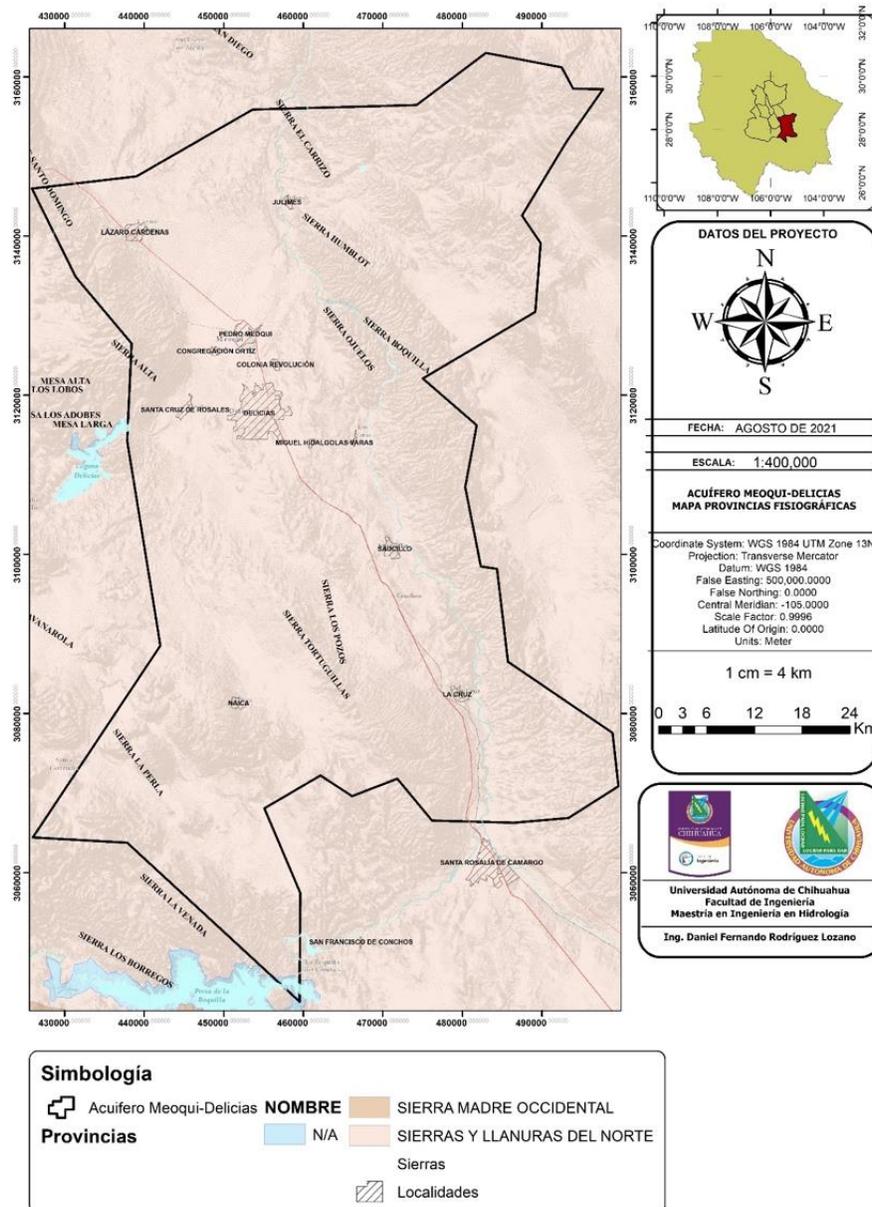


Figura 4 Provincias fisiográficas. Fuente: INEGI, 1981

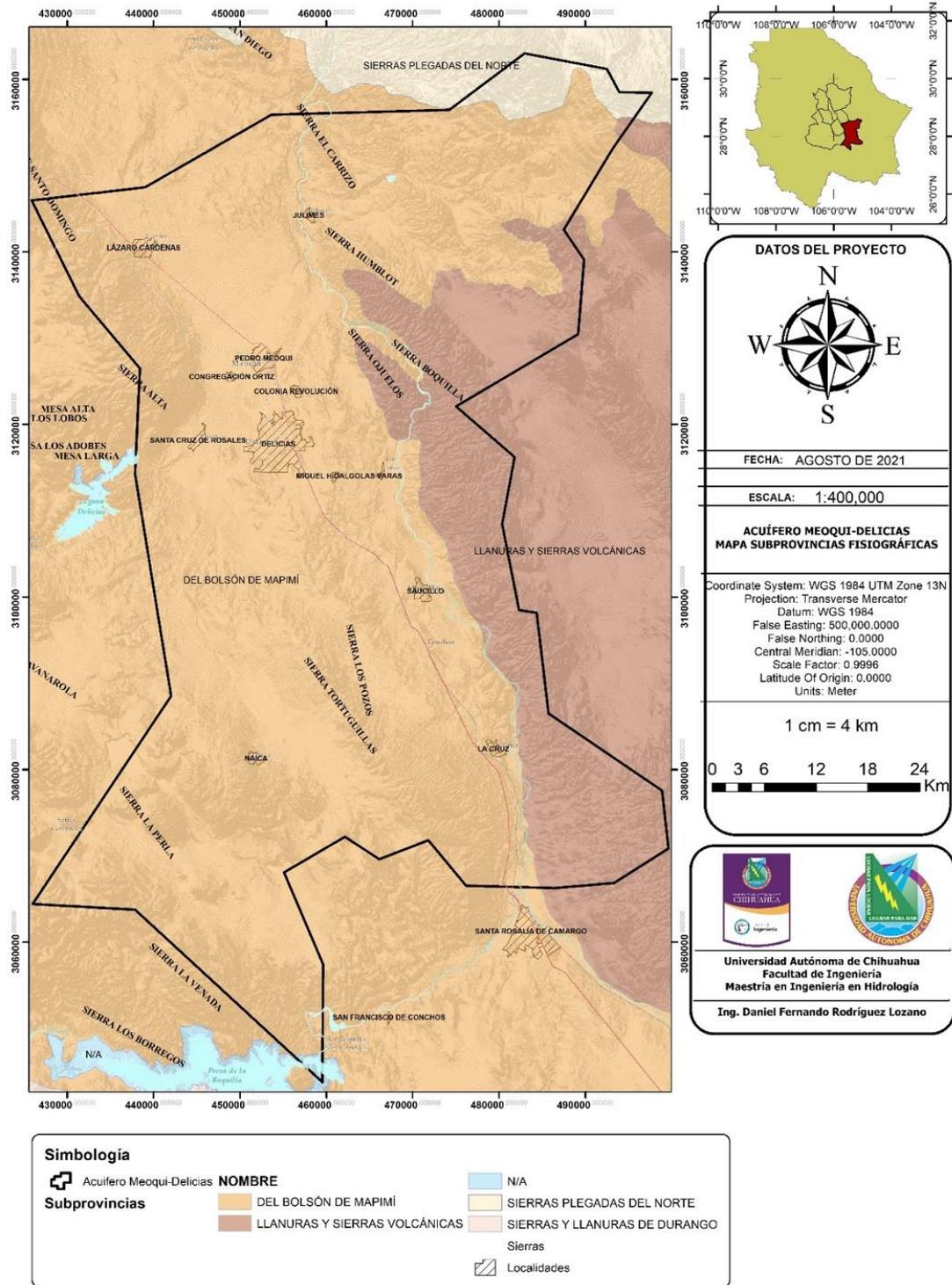


Figura 5 Subprovincias fisiográficas. Fuente: INEGI, 1981



3.4 Clima

El clima de la zona es extremoso seco, con altas temperaturas en el verano y frío moderado en el invierno, el cual presenta vientos de baja temperatura provenientes del norte (Figura 6). De acuerdo con la clasificación de Köppen, es BWhw, el cual se clasifica como muy árido, semicálido, con temperatura media anual entre 18° C y 22° C, con lluvias en verano y porcentaje de lluvia invernal del 5 al 10.2% del total anual. Hacia la porción sur el clima predominante es del tipo BSohw, el cual se clasifica como árido, semicálido, temperatura entre 18° C y 22° C con el mismo régimen de lluvias invernales (CONAGUA, 2020).

Temperatura media anual

La temperatura media anual en la estación climatológica Delicias es de 20.1° C, con mínima media de 6.4° C y máxima media de 33.7° C, sin embargo, según INEGI la temperatura media anual de toda la zona es del orden de 18° C (CONAGUA, 2020).

Precipitación media anual

La precipitación media anual en la misma estación es de 284 mm, estimada en el período 1990-2004. Asimismo, también según la información del INEGI el promedio es del orden de 300 mm/año (CONAGUA, 2020).

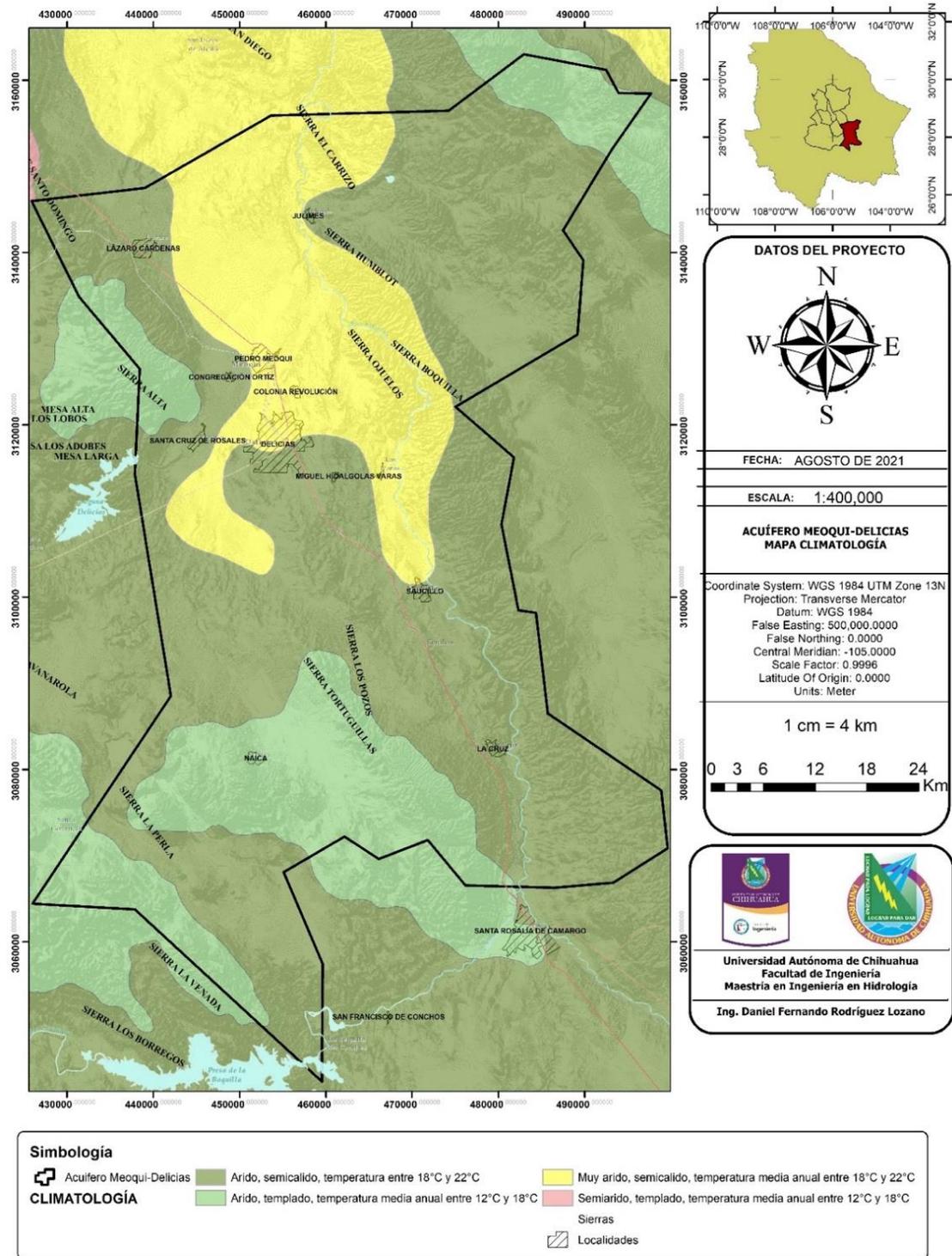


Figura 6 Clima. Fuente: INEGI, 1984



3.5 Hidrografía

El acuífero Meoqui-Delicias pertenece a la Región Hidrológica No. 24, Bravo-Conchos, Subregión Río San Pedro en su parte Oeste, así como en la subregión Cuenca Río Conchos, Presa El Granero en su parte Este. Cuenca del Río Conchos. A pesar de que la presa La Boquilla se encuentra fuera del área, tiene influencia en el acuífero dado que parte de sus aguas, junto con las de la presa Francisco I. Madero, se utilizan en el Distrito de Riego 05, el cual se encuentra casi en su totalidad dentro de este acuífero. Adicionalmente, existen zonas en la porción noroeste que se irrigan exclusivamente con aguas subterráneas. (CONAGUA, 2020).

El acuífero es atravesado por los ríos Conchos y San Pedro (Figura 7); el primero de ellos con un afluente de sur a norte y el segundo que, proveniente del oeste, avanza hacia el noreste hasta juntarse con las aguas del Río Conchos. Este último nace en la parte oriente de la Sierra Tarahumara y pertenece a la Vertiente del Golfo, pues cerca del poblado de Ojinaga se une al río Bravo. Cabe destacar la importancia de las presas Francisco I. Madero, también conocida como Las Vírgenes, que se encuentra colindante al oeste con el área estudiada, y la presa La Boquilla, que regula las aguas del río Conchos y los canales que del mismo se alimentan. Una serie de arroyos convergen hacia ambos ríos, en especial aquellos nacientes de la serranía local, cuyas longitudes no superan los cuarenta kilómetros y sólo se les aprecia con agua en época de lluvia. La zona además cuenta con un complejo sistema de canales, los cuales son utilizados principalmente para el riego de terrenos de cultivo y en menor escala para el consumo del ganado y pesca (Saucedo, 1996 en Barrera, 2008).

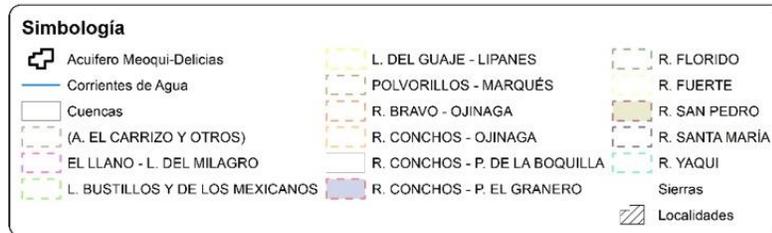
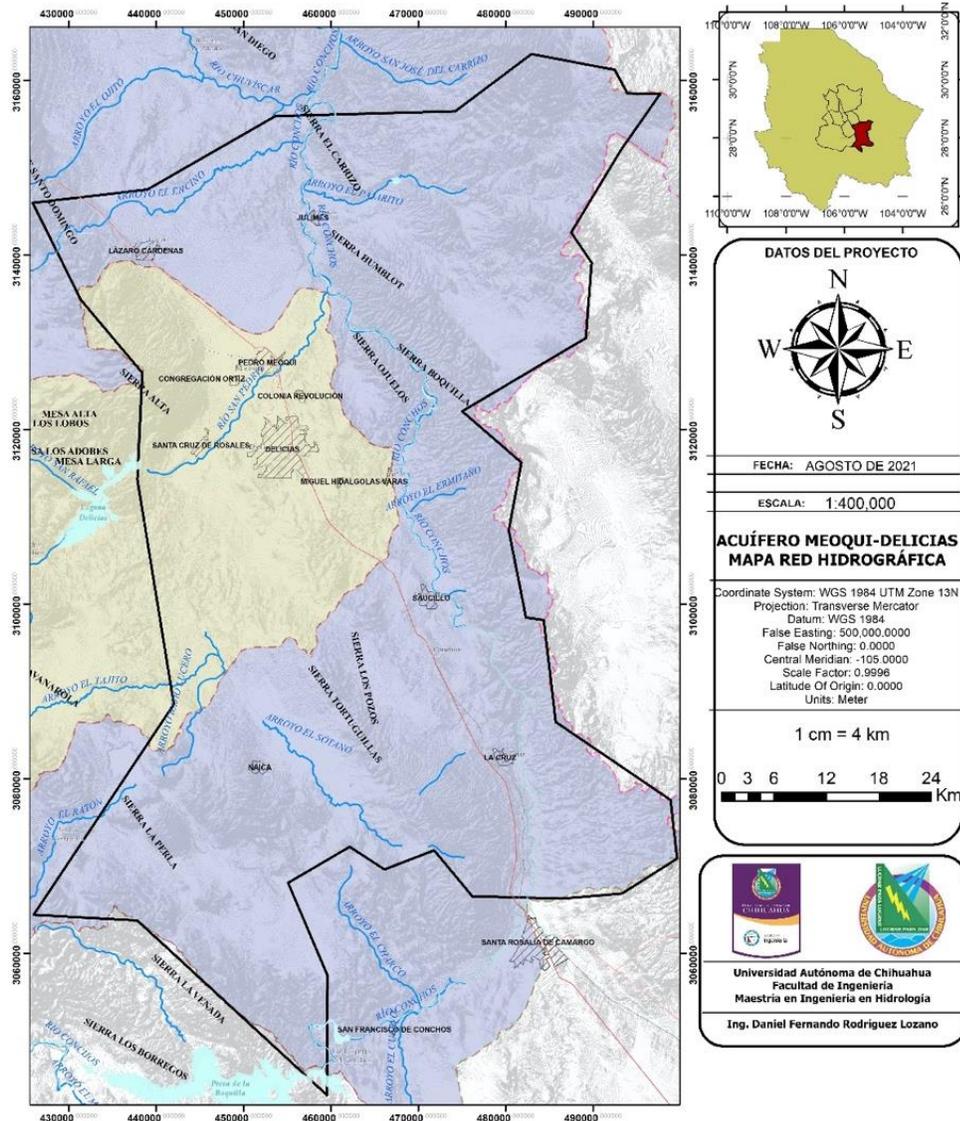


Figura 7 Hidrografía Fuente: INEGI, 2010



3.6 Geología

La geología superficial del área de estudio está constituida predominantemente por rocas ígneas volcánicas que afloran hacia las sierras adyacentes al valle, la composición de estas rocas es de naturaleza riolítica, aunque también se presentan variaciones composicionales como riodacitas, traquitas, andesitas y basaltos (Figura 8). El valle se caracteriza principalmente por depósitos sedimentarios entre los que se pueden distinguir el aluvión de río, así como también aluvión de planicie y depósitos de talud, destacando entre sus componentes la granulometría de grava, arena y la arcilla, además esta área se encuentra constituida por rocas sedimentarias e ígneas que han sido erosionadas de las sierras adyacentes al valle (Barrera, 2008).

Desde el punto de vista hidrogeológico, las formaciones más importantes son las que conforman acuíferos y están representadas por las rocas de la Formación Aurora del Cretácico Inferior, constituida por calizas con permeabilidad secundaria por fracturamiento y disolución, que afloran en la mina de Naica y en las serranías localizadas al sur del acuífero. La otra unidad está compuesta por los materiales aluviales que junto con intercalaciones de derrames lávicos rellenan el subsuelo de los valles y en los que se encuentran alojados la gran mayoría de los pozos perforados en la planicie del Distrito de Riego (CONAGUA, 2020).



3.6.1 Estratigrafía

La secuencia estratigráfica está integrada por rocas sedimentarias marinas y continentales e ígneas que comprenden un registro cronoestratigráfico desde el Paleozoico hasta el Reciente (

Figura 9), el cual se describe a continuación en orden cronológico a partir de la unidad más antigua (CONAGUA, 2020).

Paleozoico

Se encuentra representado por areniscas y caliza, concordantemente se encuentra la formación Horquilla, depósitos realizados sobre el borde de plataforma o ambiente de talud, constituida por calizas y dolomías, de edad Carbonífero superior. Debido al aporte de sedimentos se deposita la formación Rara, caracterizada por alternancia de areniscas, lutitas y limolitas (SGM, 2000).

Jurásico

Está representada por un depósito discordante de conglomerado polimíctico de fragmentos de caliza y arenisca. Discordante a esto afloran lutitas, areniscas y calizas conocido como la formación La Casita, suprayacida discordantemente por rocas del Neocomiano con depósitos correspondientes a zonas de plataforma somera. Por su granulometría y grado de cementación son consideradas como unidades impermeables para fines hidrogeológicos (SGM, 2000).

Cretácico Inferior

Está representado por depósitos sedimentarios varían de un ambiente de deposición de plataforma intermedia a plataforma externa, representado por las formaciones: Cuchillo, constituida por lutitas y areniscas calcáreas y horizontes de caliza con evaporitas; formación Aurora, representada por calizas masivas y estratos gruesos con nódulos de pedernal, facie de plataforma somera, afectados por fracturas y conductos de disolución, que en ocasiones llegan a formar verdaderas cavernas.; formación Benigno, formada por calizas con abundantes fósiles y microfósiles (SGM, 2000).



Cretácico Superior

Corresponden a esta edad una alternancia de lutitas y areniscas calcáreas de muy baja permeabilidad, que en ocasiones descansan en forma concordante sobre la Formación Aurora. Debido a su fracturamiento tienen permeabilidad alta las tobas y riolitas, andesitas-basálticas y basaltos. Las unidades litológicas con permeabilidad media son los conglomerados continentales, las gravas, arenas, calizas lacustres y los derrames de riolitas debido la presencia de fracturas. Por último, las unidades con permeabilidad baja comprenden a los depósitos lacustres y las tobas riolíticas (CONAGUA, 2020)

Cuaternario

Dentro del cuaternario se distinguen a) los abanicos aluviales antiguos con gravas, expuestos en los márgenes del río Chuvistar, que son clásticos aluviales que ocupan las estribaciones de las sierras, b) los depósitos de pie de monte en los taludes de las sierras, c) depósitos fluviales, d) depósitos aluviales y e) depósitos lacustres y de llanura de inundación. Todas estas unidades presentan permeabilidades variables entre media y alta, excepto los depósitos lacustres que se clasifican con permeabilidad media a baja, no obstante, pueden funcionar como acuitardos que transmiten agua hacia las unidades que las subyacen (CONAGUA, 2020).



COLUMNA GEOLOGICA CD. DELICIAS H13-11

SIMBOLOGIA

CUATERNARIO	
Qhoal	ALUVION
Qholm	LIMO
Qhola	LACUSTRE
Qhoco	COLUVION
QphoCgp	CONGLOMERADO POLIMICTICO
TERCIARIO	
NEOGENO	
TmB	BASALTO
TmCgp	CONGLOMERADO POLIMICTICO
TmCzAr	CALIZA - ARENISCA
PALEOGENO	
ToA-TA	ANDESITA - TOBA ANDESITICA
ToB	BASALTO
ToAr-TR	ARENISCA - TOBA RIOLITICA
ToDa	TOBA DACITICA
ToR	RIOLITA
ToTR	TOBA RIOLITICA
ToBvR	BRECHA RIOLITICA
ToRd-TRd	RIODACITA - TOBA RIODACITICA
ToTq	TRAQUITA
ToLa	LATITA
ToA	ANDESITA
TeCgp-Ar	CONGLOMERADO POLIMICTICO - ARENISCA
CRETACICO	
SUPERIOR	
KmTpaCgp	CONGLOMERADO OLIGOMICTICO
KoomAr-Lu	ARENISCA - LUTITA
KoeCz	CALIZA
KoelLu-Cz	LUTITA - CALIZA
INFERIOR	
KaceCz	CALIZA
KaCz	CALIZA
KaCz-Lu	CALIZA - LUTITA
KaLu-Cz	LUTITA - CALIZA
KaCz-Ar	CALIZA - ARENISCA
KaCz-Lu1	CALIZA - LUTITA
KaiCz	CALIZA
KaCz	CALIZA
KaceCz	CALIZA
KapaLu-Ar	LUTITA - ARENISCA
KapCz-Lu	CALIZA - LUTITA
KnapY-Cz	YESO - CALIZA
KnAr-Lu	ARENISCA - LUTITA
KnLu-Ar	LUTITA - ARENISCA
JURASICO	
SUPERIOR	
JsLu-Ar	LUTITA - ARENISCA
JURASICO MEDIOTRIASICO	
PERMICO	
TRJmCgp	CONGLOMERADO POLIMICTICO
PpLm-Lu	LIMOLITA - LUTITA
PpAr-Lu	ARENISCA - LUTITA
PpAr-Lu1	ARENISCA - LUTITA Fm. RARA
CARBONIFERO	
PcCz	CALIZA
CAMBRICO	
PcAr-Cz	ARENISCA - CALIZA
PROTEROZOICO MEDIO	
pTMGr-Af	METAGRANITO - ANFIBOLITA
ROCAS IGNEAS INTRUSIVAS	
ToGr	GRANITO
ToSi	SIENITA
ToGd	GRANODIORITA
ToPR	PORFIDO RIOLITICO
ROCAS DE METAMORFISMO CONTACTO	
SK	SKARN

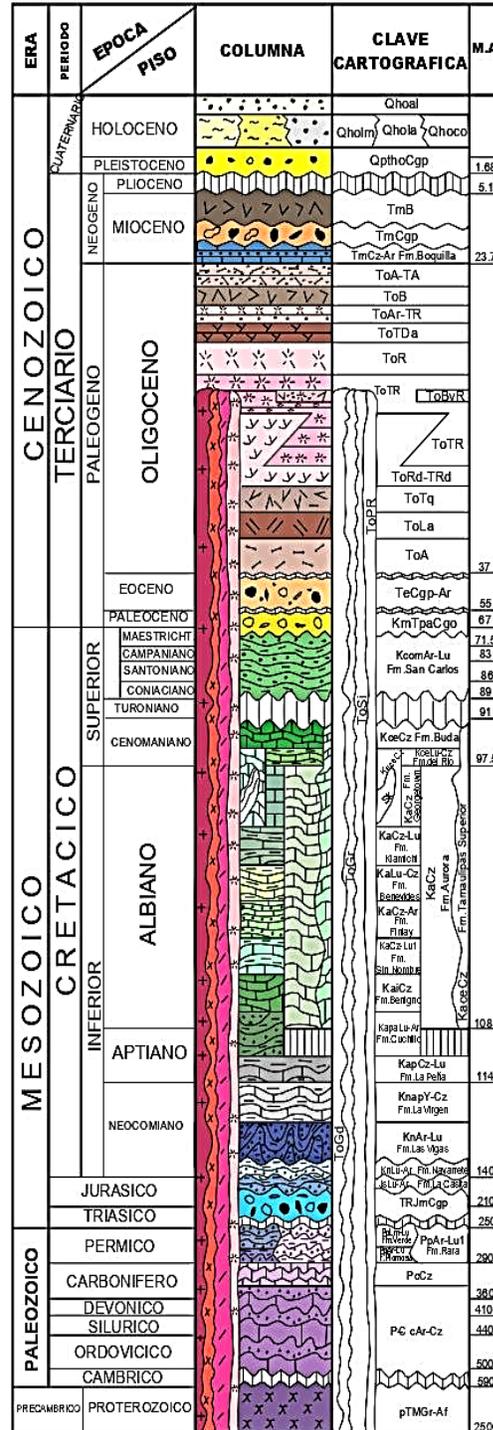


Figura 9 Columna estratigráfica, Carta geológico minera de Delicias Chihuahua, H13-11 (SGM, 2000).



3.7 Edafología

La zona de riego del acuífero cuenta con una gran variedad de series de suelo (Figura 10). Se destacan en la parte sur el Fluvisol Calcárico (Jc) y el Regosol Calcárico (Rc); en la parte media, el Xerosol Háplico y el Cálxico (Xh, Xc), el Feozem Calcárico (Hc), el Castañozem Lúvico y Háplico (Kl, Kh); y en la parte norte, el Feozem Calcárico, el Litosol (l), el Solonchak Órtico (Zo) el Xerosol Háplico y la Rendzina (E) (CNA, 2009).

Estos suelos son de tipo aluvial, los cuales por haber sido intemperizados bajo condiciones climáticas áridas han sufrido pocas alteraciones. En general estos suelos contienen alguna cantidad de carbonato de calcio y sales de sodio; debido a un drenaje deficiente característico en esta región se han acumulado depósitos de materiales solubles dando origen a suelos salinos y/o sódicos. Se cuenta con más de 14 000 ha afectadas por salinidad y sodicidad en diferente grado, con un pH superior a 7.5 (CNA, 2009).

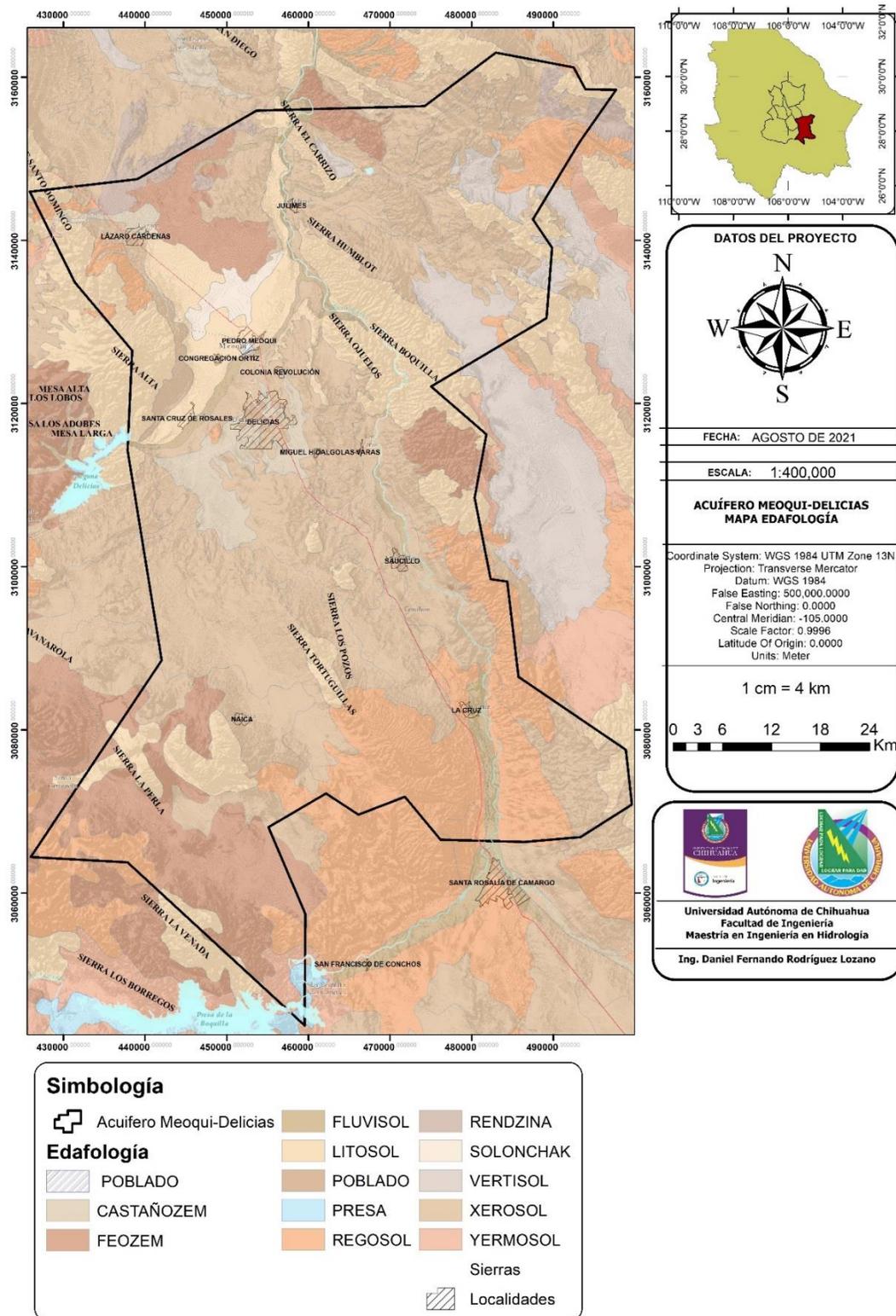


Figura 10 Edafología. Fuente: INEGI, 2007



3.8 Hidrogeología

La Comisión Nacional del Agua, en su último reporte de Disponibilidad para el Acuífero Meoqui-Delicias (2020), identifica de acuerdo a la estratigrafía, 3 unidades hidrogeológicas en función de sus valores cuantitativos de conductividad hidráulica (CONAGUA, 2020).

La primera categoría incluye materiales de permeabilidad alta como son los depósitos aluviales y de pie de monte, compuestos por material granular del Terciario y Cuaternario que contienen al acuífero actualmente en explotación. Las calizas de la formación Aurora, perteneciente al Cretácico superior, albergan un acuífero aún no explotado por su gran profundidad, pero potencialmente de gran importancia. El acuífero de los materiales granulares funciona como libre y tiene un espesor que alcanza valores de hasta 500 (CONAGUA, 2020).

La segunda categoría integrada por rocas ígneas como tobas y riolitas, andesitas basálticas y basaltos presentan una buena permeabilidad secundaria por fracturamiento; este material está cubierto por sedimentos granulares de relleno. Al aflorar estas rocas en superficie funcionan como zonas de recarga (CONAGUA, 2020).

La tercera categoría contiene litologías de permeabilidad baja, rocas de Paleozoico, Jurásico y formaciones Cuchillo y Las Vigas del Cretácico. Todas estas están en contacto directo y pueden considerarse como el basamento geohidrológico regional. Como fronteras laterales del acuífero se tienen las secuencias ignimbríticas y rocas volcánicas riolíticas (CONAGUA, 2020).

La recarga del acuífero se da principalmente por la infiltración de aguas de corrientes superficiales que entran al acuífero (ríos San Pedro y Conchos) dentro del valle, como lo son canales de distribución y la infiltración de excedentes de riego, a nivel parcelario (Barrera, 2008). La recarga principal proviene del sur, correspondiente a las máximas elevaciones, 1350 y 1325 msnm desde la sierra La Venada. A la altura de Ciudad Delicias y Meoqui el flujo general prosigue hacia el norte, recibiendo aportaciones de otra zona de recarga



localizada hacia el occidente, por las serranías ubicadas en esta zona y por la sierra de Santo Domingo, ya fuera de los límites del acuífero; a partir de dicha población, se une al flujo principal para dirigirse hacia el NE con un rumbo franco hacia el cauce del río Conchos. La dirección preferencial del flujo subterráneo es de sur a norte, pasando por el Distrito de Riego 05, hasta el río Chuvíscar, siguiendo en forma paralela el curso del río Conchos (CONAGUA, 2020).

3.8.1 Tipo de acuífero

El acuífero Meoqui-Delicias es en manera general de tipo libre, con presencia de condiciones locales de semiconfinamiento debido a la existencia de lentes arcillosos o de rocas volcánicas compactas. Está constituido por sedimentos clásticos de granulometría variada, que alcanzan un espesor de hasta 600 m en las porciones centro y norte. Las rocas carbonadas que subyacen a los depósitos clásticos constituyen otro acuífero potencial que no ha sido aún explorado, pero que se conoce por las obras mineras que se desarrollan en la región (CONAGUA, 2020).

3.8.2 Parámetros hidráulicos

En cuanto a las características hidrodinámicas, de acuerdo con los resultados de la interpretación de pruebas de bombeo realizadas con anterioridad, se determinaron valores extremos para la transmisividad (T) de 1382 m²/día y 19.8 m²/día. Sin embargo, se considera que los valores promedio de este parámetro oscilan entre los 50 y 500 m²/día (CONAGUA, 2020).

3.9 Calidad del agua en el acuífero Meoqui-Delicias

Las principales familias de agua en el acuífero Meoqui-Delicias descritas por Barrera (2008) y Rascón (2011) para el muestreo realizado en el año 2006 indican para el municipio de Rosales al noroeste del acuífero, que el agua es principalmente sulfatada bicarbonatada



sódica, al igual que en el municipio de Meoqui, en donde destaca la comunidad del Potrero del Llano (M6) con alto contenido de cloruros. Julimes, ubicado al norte del acuífero en las laderas del río Conchos, tiene una composición sulfatada sódica-cálcica; a este respecto cabe resaltar las comunidades de San José (J6) y La Regina (J10) con alto contenido de cloruros. Por otra parte, las localidades de Meoqui y Delicias ubicadas en la zona central del acuífero cercanas al río Conchos y río San Pedro, corresponden a una composición principalmente sulfatada-bicarbonatada sódico-cálcica. El municipio de Saucillo presenta mayormente agua bicarbonatada-sulfatada cálcica-sódica; mientras que en La Cruz principalmente es bicarbonatada-sulfatada sódico-cálcica.

Con respecto a la calidad del agua en el acuífero para el año 2006, Barrera (2008) y Rascón (2011) describen los principales elementos presentes de manera natural; los Sólidos Disueltos Totales (SDT) con mayores concentraciones y que superan el límite máximo permisible (LMP) de 1000 mg/L establecido por la Mod. NOM-127 se localizan en los municipios de Delicias y Julimes en un rango entre 1055 y 2700 mg/l. Las concentraciones de cloruros que superan lo establecido por la Mod. NOM-127 (250 mg/L) se localizan en el centro del acuífero entre los ríos San Pedro y Conchos, en localidades del municipio de Delicias; sin embargo, el pozo de La Regina (J10) en Julimes, alcanzó en esta fecha el valor más elevado de 515 mg/L. Con respecto al flúor, que es particularmente importante por las complicaciones que provoca al consumir agua con concentraciones elevadas (fluorosis dental y ósea), la Mod. NOM-127 establece como nivel máximo permisible 1.5 mg/L. Los municipios de Meoqui y Julimes presentan los valores más elevados de este elemento, con fluctuaciones entre 1.5 y 9.4 mg/L en esa fecha; resaltando por sus altos valores Col. Diez de Mayo, Progreso y Guadalupe Victoria del municipio de Meoqui, así como San José, Julimes, La Esperanza y La Regina en el municipio de Julimes, al igual que Salón de Actos en el municipio de Rosales. El contenido de arsénico en el agua subterránea se asocia a los climas áridos y al hidrotermalismo principalmente. Este elemento es de gran importancia por su toxicidad, además de que tiene efectos negativos crónicos en la salud a ciertas



concentraciones. Es por esto que la Mod. NOM-127 establece como nivel máximo permisible en agua de consumo humano el valor de 0.025 mg/L. Las comunidades que presentan una alta concentración de arsénico coinciden con las zonas con alto contenido de flúor, como son los municipios de Meoqui y Julimes al norte del acuífero; de igual manera el municipio de Rosales, y Saucillo y La Cruz al sur del acuífero. De particular importancia resultan las fuentes de Progreso y Diez de Mayo, en Meoqui, así como La Regina de Julimes en las que el contenido de arsénico en el agua es de 0.376 mg/l, 0.316 mg/l y 0.277 mg/l, respectivamente.



Capítulo 4. MATERIALES Y MÉTODOS

Para la elaboración de este trabajo se desarrolló la metodología descrita en los siguientes puntos:

1. **Recopilación de información relativa al acuífero Meoqui-Delicias:** Se recolectó información sobre el medio abiótico del acuífero, es decir, geología, suelos, clima, hidrología, hidrogeología, química y calidad del agua subterránea, obtenida principalmente a través de fuentes como la Comisión Nacional del Agua, Junta Central de Agua y Saneamiento del Estado de Chihuahua y Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Chihuahua (UACH).
2. **Selección de puntos de muestreo:** Los puntos de muestreo del agua subterránea se definieron considerando los resultados de las bases de datos históricas en los que se observaron altos niveles de concentración de flúor. Adicionalmente, se buscó que los pozos seleccionados presenten buena distribución espacial con el fin de cubrir la mayor área posible del acuífero Meoqui-Delicias. En total se seleccionaron 64 pozos de agua potable para muestreo de la calidad (ver Tabla 2 y Figura 11).

Tabla 2 Lista de pozos muestreados

ID	Muestra	Municipio	Localidad	X	Y
1	D126	Delicias	Fco. I. Madero	457660,10	3124407,15
2	D127	Delicias	Col. Morelos	461442,87	3123186,75
3	D129	Delicias	La Merced	465077,52	3124726,45
4	D130	Delicias	Santa Fe	460935,59	3118092,47
5	D131	Delicias	Vicente Guerrero	457994,52	3119099,52
6	D133	Delicias	Las Virginias	462806,72	3120080,53
7	D134	Delicias	Hidalgo	460951,46	3113949,23
8	D136	Delicias	Armendáriz	463059,05	3106487,06
9	D137	Delicias	Ejido El Diez	452467,93	3111476,37
10	D138	Delicias	Col. Nicolás Bravo	448423,46	3107338,85
11	D139	Delicias	Col. Campesina	448349,95	3113055,50
12	J9	Julimes	San José	456779,66	3139556,41
13	J10	Julimes	La Regina	455786,95	3142937,04
14	J11	Julimes	Esperanza	455773,08	3147069,40
15	J12	Julimes	Labor Nueva	455193,58	3150201,52
16	J13	Julimes	La Boquilla	455670,17	3151383,44
17	J14	Julimes	El Carrizo	457939,33	3150462,58
18	J15	Julimes	Julimes	459415,59	3144253,42
19	J16	Julimes	Ex Hda. Humboldt	459617,92	3137550,27
20	J17	Julimes	El Gramal	461424,08	3135494,74
21	J18	Julimes	Las Arenillas	462504,39	3133098,35
22	LC63	La Cruz	Las Pintas	477568,99	3090022,93
23	LC64	La Cruz	Panamericana	480703,92	3081709,43
24	LC67	La Cruz	Est. La Cruz	481386,92	3077720,53
25	LC69	La Cruz	Corraleño de Juárez	482862,89	3076832,16



26	M1	Meoqui	Lázaro Cárdenas	439072,87	3140319,39
27	M5	Meoqui	Col. 10 de Mayo	445350,42	3144000,03
28	M6	Meoqui	Potrero del Llano	446816,48	3147660,38
29	M19	Meoqui	El Torreón	459170,01	3132699,48
30	M21	Meoqui	Gpe. Victoria	457524,89	3133214,87
31	M22	Meoqui	Los García	457125,14	3136517,68
32	M22.2	Meoqui	Los García	458361,12	3136845,61
33	M23	Meoqui	Loreto	456753,56	3131378,66
34	M24	Meoqui	Las Puentes	455774,99	3129609,00
35	M25	Meoqui	Gran Morelos	455026,55	3129137,32
36	M26	Meoqui	Fco. Portillo	455725,27	3126441,53
37	M27	Meoqui	Nuevo Loreto	460583,74	3127421,44
38	M39	Meoqui	Buenavista	445040,60	3128946,00
39	M40	Meoqui	Est. Consuelo	441138,51	3134093,76
40	M40.2	Meoqui	Est. Consuelo	441687,27	3134057,80
41	M41	Meoqui	Nvo. San Lucas	444106,85	3136683,50
42	M42	Meoqui	Progreso	452458,07	3135981,60
43	M43	Meoqui	Lomas Consuelo	454078,43	3131765,39
44	R2	Rosales	Barranco Bco.	440062,50	3146119,62
45	R3	Rosales	Santa Rita de Casia	441069,19	3147687,74
46	R7	Rosales	Salón de Actos	446312,56	3152476,91
47	R30	Rosales	San Valentín	450288,06	3120979,28
48	R35	Rosales	La Garita	443050,72	3113372,38
49	R38	Rosales	Orinda	444426,84	3126688,47
50	S44	Saucillo	Ampliacion La Merced	465566,72	3124281,89
51	S45	Saucillo	Bella Vista	464772,06	3120960,79
52	S46	Saucillo	Santa Rosa	465241,48	3117048,86
53	S47	Saucillo	Orranteño	466203,83	3117179,03
54	S50	Saucillo	Altamirano	465559,32	3111542,19
55	S52	Saucillo	Fco. I. Mad. (Gato N.)	466231,61	3106178,57
56	S54	Saucillo	Gomeño	469060,99	3106082,30
57	S56-3	Saucillo	Saucillo P3	470670,32	3101259,42
58	S56-8	Saucillo	Saucillo P8	470666,34	3099631,00
59	S57	Saucillo	Col. Vicente Gro.	469087,70	3101208,01
60	S58	Saucillo	Fco. Mezquital	472763,60	3096790,18
61	S59	Saucillo	Pto. del Toro	477574,16	3092792,30
62	S60	Saucillo	Parritas	476989,52	3095673,57
63	S62	Saucillo	Est. Conchos	471969,48	3093579,49
64	S98	Saucillo	Est. Saucillo	468780,41	3100211,81

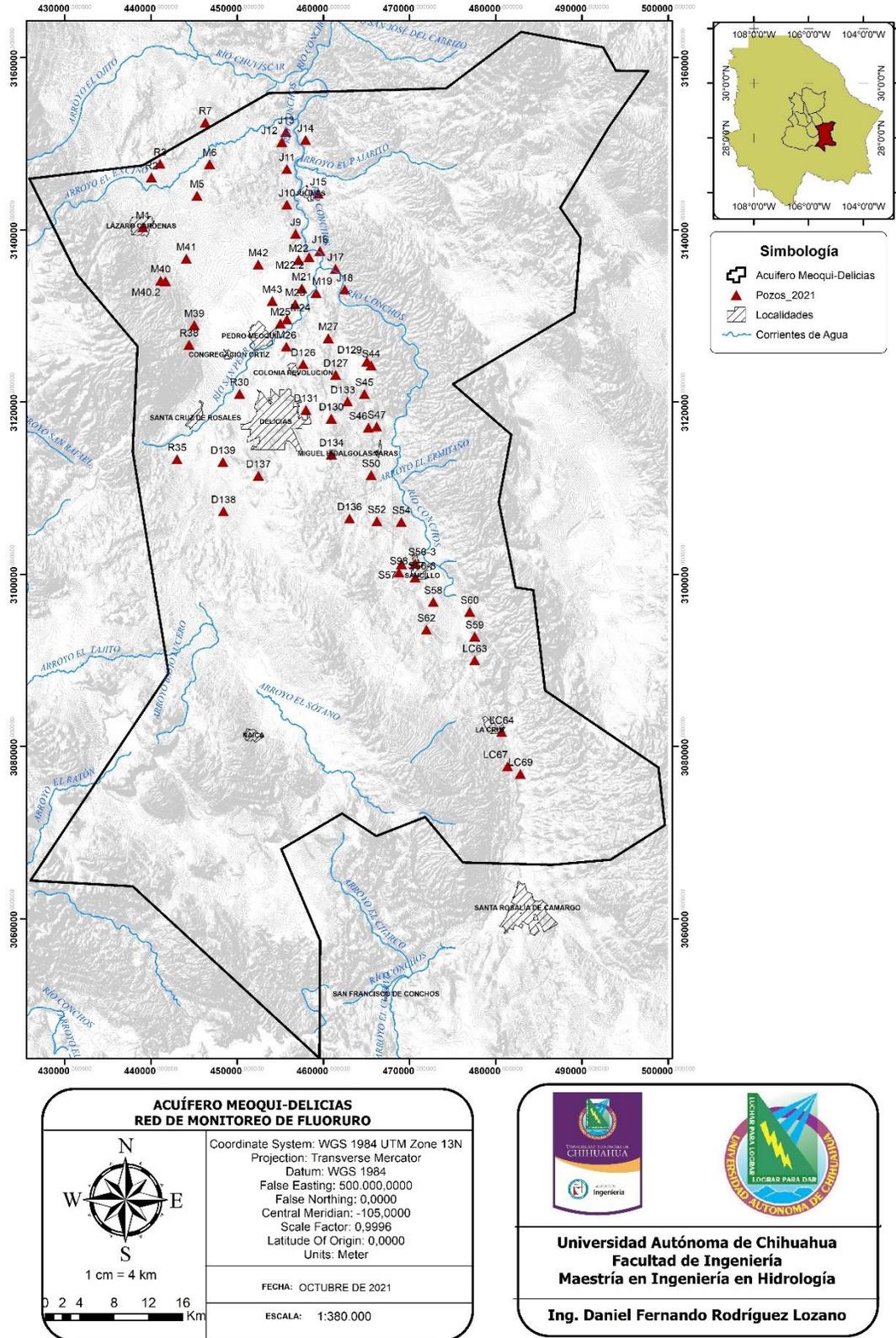


Figura 11 Ubicación de los pozos de agua potable muestreados en el periodo 2020-2021



3. **Muestreo de agua en pozos seleccionados:** La recolección de 64 muestras de agua potable se hizo conforme a las indicaciones descritas en la NOM-014-SSA1-1993 “Procedimientos sanitarios para el muestreo de agua para uso y consumo humano en sistemas de abastecimiento de agua públicos y privados” para análisis fisicoquímicos (Secretaría de Salud, 1993) (Figura 12). En las muestras colectadas se analizaron parámetros de campo (pH, sólidos disueltos totales, conductividad eléctrica y temperatura) utilizando un equipo HANNA HI 9828 multiparamétrico implementado con una sonda portátil (Figura 13).



Figura 12 Muestreo de agua potable



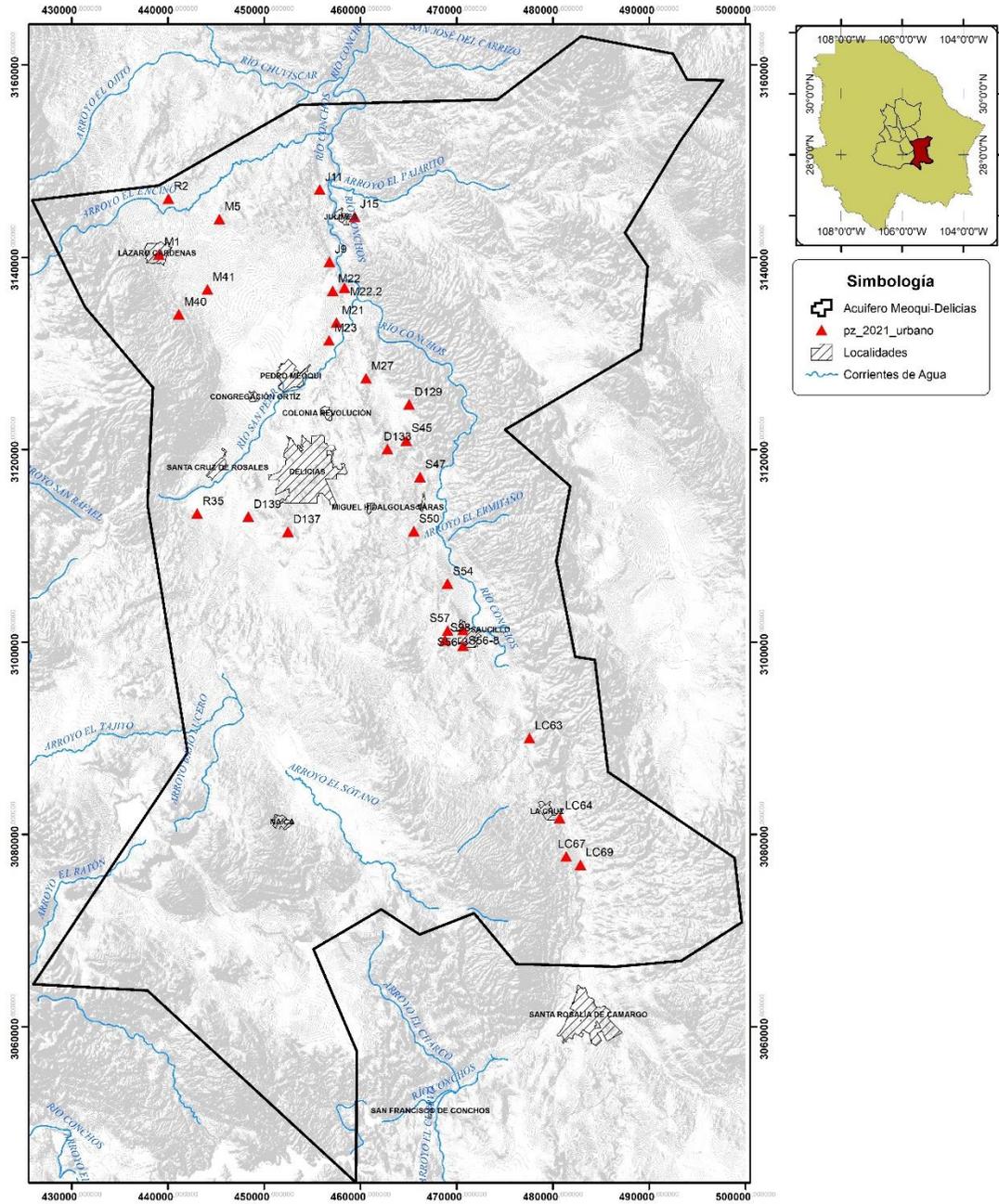
Figura 13 Sonda y equipo HANNA HI 9828



4. **Medición de niveles dinámicos:** Se definió una red de monitoreo piezométrico tomando en consideración que los pozos seleccionados coincidieran con los monitoreados en el año 2005, esto con el fin de poder determinar la evolución histórica de niveles dinámicos durante el periodo 2005-2021. En total se midió el nivel dinámico de 30 pozos de agua potable (Figura 14 y Figura 15).



Figura 14 Medición de nivel dinámico



ACUÍFERO MEOQUI-DELICIAS RED DE MONITOREO PIEZOMÉTRICO	
 1 cm = 4 km 	Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 13N Projection: Transverse Mercator Datum: WGS 1984 False Easting: 500,000,000 False Northing: 0,0000 Central Meridian: -105,0000 Scale Factor: 0,9996 Latitude Of Origin: 0,0000 Units: Meter
	FECHA: OCTUBRE DE 2021 ESCALA: 1:380.000

 Universidad Autónoma de Chihuahua Facultad de Ingeniería Maestría en Ingeniería en Hidrología	 IIT Instituto de Ingeniería y Tecnología
Ing. Daniel Fernando Rodríguez Lozano	

Figura 15 Selección de pozos para monitoreo de nivel dinámico



5. **Análisis de laboratorio:** La cuantificación del flúor se realizó conforme a la norma mexicana NMX-AA-077-SCFI-2001, haciendo uso del Método Potenciométrico, por medio de equipo de Electrodo Combinado de Ion Selectivo para fluoruro de la marca Thermo Scientific conectado a un medidor de sobremesa de pH/mV/SE/Temperatura HI 4222 (
- 6.
- 7.
8. **Figura 16 y Figura 17).**



Figura 16 Equipo para medición de ion fluoruro.



Figura 17 Estándares para calibración del equipo

9. **Obtención de resultados:** Se realizó la comparación de las bases de datos históricas incluyendo los resultados obtenidos del muestreo actual; se generaron gráficas, tablas y mapas de isoconcentraciones de flúor y se correlacionaron los niveles dinámicos recientes con los reportados en el censo del 2005 para determinar su evolución.

10. **Análisis estadístico:** Se efectuó un estadístico de las bases de datos históricas de concentración de flúor, incluyendo los resultados del monitoreo actual, para evaluar el comportamiento de los pozos profundos del acuífero Meoqui-Delicias. Inicialmente se realizó un análisis gráfico de los datos por aprovechamiento en donde se identificó el coeficiente de correlación entre las fechas y la pendiente de cada gráfica representativa de la evolución en el tiempo de las concentraciones de flúor. Posteriormente se realizó la prueba de significancia estadística mediante el coeficiente de correlación de Pearson (r). Los grupos de pozos fueron seleccionados dependiendo de las tendencias de las pendientes de las gráficas de evolución, es decir, si es a la baja, al alza o si permanece estable en el tiempo.





Capítulo 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Resultados de parámetros de campo

Entre los meses de diciembre 2020 y febrero 2021 se realizaron varias visitas de campo durante las cuales se recolectaron 64 muestras de agua subterránea de pozos de distintas localidades que abarcan los municipios de Meoqui, Delicias, Julimes, Rosales, Saucillo y La Cruz. Las muestras de agua fueron envasadas y etiquetadas siguiendo el procedimiento de la norma NOM-014-SSA1-1993 “Procedimientos sanitarios para el muestreo de agua para uso y consumo humano en sistemas de abastecimiento de agua públicos y privados. Adicionalmente, se colectó agua del grifo de los sistemas de distribución o pozos profundos para realizar la medición de parámetros in situ tales como temperatura, pH, sólidos disueltos y conductividad eléctrica (Tabla 3) a través de medidor multiparamétrico con sonda portátil de referencia HANNA HI 9828.

El pH es considerado como una medida de la actividad de los iones hidrógeno en la disolución. La norma mexicana para agua potable (Modificación a la NOM-127-SSA1-1994) establece que el pH (potencial de Hidrógeno) debe estar entre 6.5-8.5, siendo solo las localidades de La Merced (D129) y Col. Nicolás Bravo (D138) las que se encuentran por debajo de este rango con 6.39 y 5.98, respectivamente.

Los sólidos disueltos totales (SDT) proporcionan una evaluación de la concentración total de iones disueltos en el agua, y es una propiedad importante del agua que se toma frecuentemente como un indicador del grado de mineralización. La Modificación a la Norma NOM-127-SSA1-1994 tiene como límite máximo permisible de SDT el valor de 1000 ppm; de los 64 pozos analizados, 13 se encuentran por encima de la norma, siendo los municipios de Delicias y Julimes los que cuentan con los valores más altos, con 5 y 7 localidades que sobrepasan este límite. A este respecto, Col. Santa Fe (D130) con 2059 ppm y La Regina (J10) con 1587 presentaron los valores más altos registrados durante el monitoreo reciente.



Tabla 3 Datos recolectados en campo, campaña 2020, pozos de agua potable acuífero Meoqui-Delicias.

MUESTRA	MUNICIPIO	LOCALIDAD	TEMP. °C	pH	SDT	CE µmohs/cm
D126	DELICIAS	FRANCISCO I. MADERO	21,34	7,26	775	1107/1030
D127	DELICIAS	COL. MORELOS	23,45	7,35	1333	1905/1845
D129	DELICIAS	LA MERCED	26,12	6,39	794	1134/1158
D130	DELICIAS	SANTA FE	18,23	7,3	2059	2942/2565
D131	DELICIAS	VICENTE GUERRERO	18,18	7,13	1128	1611/1403
D133	DELICIAS	LAS VIRGINIAS	24,04	6,72	1307	1867/1833
D134	DELICIAS	COL. MIGUEL HIDALGO	24,73	7,48	862	1231/1225
D-136	DELICIAS	COL. ARMENDARIZ	25,74	7,19	863	1233/1251
D137	DELICIAS	EJ. EL DIEZ	20	7,34	519	744/674
D138	DELICIAS	COL. NICOLAS BRAVO	21,42	5,98	1057	1510/1409
D139	DELICIAS	COL. CAMPESINA	25,03	7,7	520	743/744
J9	JULIMES	SAN JOSE	18,27	8,27	1056	1510/1313
J10	JULIMES	LA REGINA	22,86	7,09	1587	2267/2175
J11	JULIMES	LA ESPERANZA	23,11	7,46	1031	1474/1419
J12	JULIMES	LABOR NUEVA	22,26	7,11	1429	2043/1948
J13	JULIMES	BOQUILLA	22,2	7,11	1429	2043/1948
J14	JULIMES	CARRIZO	18,98	7,32	1221	1741/1543
J15	JULIMES	JULIMES	23,54	7,04	1193	1704/1659
J16	JULIMES	EX. H. HUMBOLDT	19,8	7,43	890	1271/1146
J17	JULIMES	EL GRAMAL	13,73	7,51	720	1029/808
J18	JULIMES	ARENILLAS	25,48	7,19	840	1200/1210
LC63	LA CRUZ	LAS PINTAS	18,63	7,3	762	1068/961
LC65	LA CRUZ	LA CRUZ	21,9	7,76	914	1304/1223
LC67	LA CRUZ	EST. LA CRUZ	21,63	7,2	739	1056/993
LC69	LA CRUZ	CORRALEÑO DE JUAREZ	25,1	7,35	884	1264/1268
M1	MEOQUI	L. CARDENAS	20,92	7,27	401	572/528
M5	MEOQUI	10 DE MAYO	24,49	8,25	469	670/664
M6	MEOQUI	POTRERO DEL LLANO	18,73	7,91	953	1361/1199
M19	MEOQUI	EL TORREON	14,12	7,98	701	1051/794
M21	MEOQUI	GPE. VICTORIA	22,13	7,21	739	1055/998
M22	MEOQUI	LOS GARCIA	25,17	7,48	842	1203/1207
M22.2	MEOQUI	LOS GARCIA	13,5	7,23	1000	1428/1117
M23	MEOQUI	LORETO	18,67	8,04	690	986/877
M24	MEOQUI	LAS PUENTES	21,87	7,43	539	769/722
M25	MEOQUI	GRAN MORELOS	22,02	7,29	604	863/814
M26	MEOQUI	LOS JÁQUES	27,18	7,54	355	507/528
M27	MEOQUI	NVO. LORETO	27,71	7,12	675	964/1011
M39	MEOQUI	BUENAVISTA	10,78	7,93	383	547/399
M40	MEOQUI	EST. CONSUELO	21,77	7,03	398	567/533
M41	MEOQUI	SAN LUCAS	17,49	7,37	434	620/531
M42	MEOQUI	PROGRESO	22,27	7,51	618	883/837
M43	MEOQUI	LOMAS DE CONSUELO	24,29	7,36	727	1039/1025
R2	ROSALES	BARRANCO BLANCO	22,38	7,38	587	838/796
R3	ROSALES	SANTA RITA	17,51	7,49	429	613/526
R7	ROSALES	SALÓN DE ACTOS	24,29	8,11	490	699/690
R30	ROSALES	R. SAN VALENTIN	15,85	8,15	418	597/493
R35	ROSALES	LA GARITA	23,14	6,9	951	1357/1308
R38	ROSALES	ORINDA	12,77	7,58	330	471/362
S44	SAUCILLO	AMPLIACION LA MERCED	19,87	7,55	583	833/752



S45	SAUCILLO	BELLA VISTA	21,1	7,76	575	820/759
S46	SAUCILLO	STA. ROSA	21,17	6,97	817	1167/1080
S47	SAUCILLO	ORRANTEÑO	22,44	7,03	735	1049/998
S50	SAUCILLO	ALTAMIRANO	23	7,48	581	833/792
S52	SAUCILLO	FRANCISCO I. MADERO	22,98	7,56	755	1029/1039
S54	SAUCILLO	GOMEÑO	21,03	7,31	786	1122/1038
S56-3	SAUCILLO	SAUCILLO P3	24,61	6,74	834	1191/1182
S56-8	SAUCILLO	SAUILLLO P8	27,01	7,23	843	1206/1249
S57	SAUCILLO	VICENTE GUERRERO	24,94	7,58	456	651/650
S58	SAUCILLO	FCO. MEZQUITAL	15,43	7,15	1020	1457/1192
S59	SAUCILLO	PUERTO DEL TORO	22,42	7,62	444	634/602
S60	SAUCILLO	PARRITAS	22,43	7,28	454	649/615
S62	SAUCILLO	EST. CONCHOS	23,44	7,37	793	1132/1101
S98	SAUCILLO	EST. SAUCILLO	22,17	7,22	668	954/904

5.2 Resultados de los análisis y evolución espacial de los Sólidos Disueltos Totales (SDT)

Los resultados obtenidos en la campaña de muestreo realizada entre diciembre de 2020 y febrero de 2021 se presentan en la Anexo 1, en donde se muestran también los datos históricos de sólidos disueltos totales correspondientes a los 64 pozos analizados previamente durante el año 2006. Conocer la evolución de este parámetro a través del tiempo es importante para identificar zonas de recarga y descarga, debido a que la evolución del agua subterránea presenta una relación con las concentraciones de los elementos disueltos en los pozos considerando el agua de reciente recarga, la distancia recorrida y la velocidad del agua, así como el medio granular por el que a traviesa. Las concentraciones de SDT obtenidas se compararon con los resultados obtenidos con anterioridad.

Para el año 2006 (Figura 18) los Sólidos Disueltos Totales se encuentran presentes en las muestras de agua con fluctuaciones entre 284 y 2700 mg/L dentro del área de estudio. Los valores más altos que superan el límite máximo permisible de 1000 mg/L establecido en la NOM-127 predominaron en los municipios de Delicias y Julimes en un rango entre 1055 y 2700 mg/L, siendo la localidad Santa Fe (D130) del municipio de Delicias la que presentó la mayor concentración con 2700 mg/L. Otras localidades de Delicias que superaron el límite máximo permisible son Col. Campesina (D139), Vicente Guerrero (D131), Col. Nicolás Bravo (D138), Las Virginias (D133) y Col. Morelos (D127) con concentraciones de 1757



mg/L, 1468 mg/L, 1429 mg/L, 1317 mg/L y 1299 mg/L respectivamente; el 54% de las muestras analizadas del municipio de Delicias superaron el límite máximo permisible. Por su parte, en el municipio de Julimes las mayores concentraciones de SDT se encontraron en La Regina (J10) mg/L, El Gramal (J17), El Carrizo (J14) y Julimes (J15) con valores de 1650 mg/L, 1495 mg/L, 1449 mg/L y 1441 mg/L en cada uno; el 70% de las muestras analizadas del municipio de Julimes superaron el límite máximo permisible. Del municipio de Meoqui sobresalen las localidades de Los García (M22) y Nuevo Loreto (M27) con concentraciones de 1652 mg/L y 1433 mg/L respectivamente. En el sur del acuífero, las localidades con mayor afectación por SDT son Col. Panamericana (LC64) del municipio de La Cruz y Fco. Mezquital (S58) del municipio de Saucillo con concentraciones de 1771 mg/L y 1561 mg/L respectivamente.

Por otra parte, se observó que el 66% de las muestras analizadas están por debajo del límite máximo permisible, siendo Lázaro Cárdenas (M1), Estación Consuelo (M40) y Buenavista (M39) del municipio de Meoqui y Orinda (R38) en Rosales las que presentaron las menores concentraciones, las cuales son inferiores a 400 mg/L.

De acuerdo a lo anterior, para el año 2006 se tiene que 21 muestras correspondientes al 34% del total de las muestras consideradas para este estudio sobrepasan el límite de la norma oficial mexicana (1000 mg/L), y de éstas el 43% se encuentran a los costados del valle aluvial del río Conchos, en el tramo localizado aguas abajo de la confluencia de dicho río con el río San Pedro, cuya trayectoria es en sentido norte y fluye al oeste de las sierras circundantes Humboldt y El Carrizo. El 38% del total de las muestras que sobrepasan el límite están localizadas en la parte central del acuífero y, por lo tanto, del Distrito de Riego 005, correspondiendo principalmente a los pozos del municipio de Delicias.

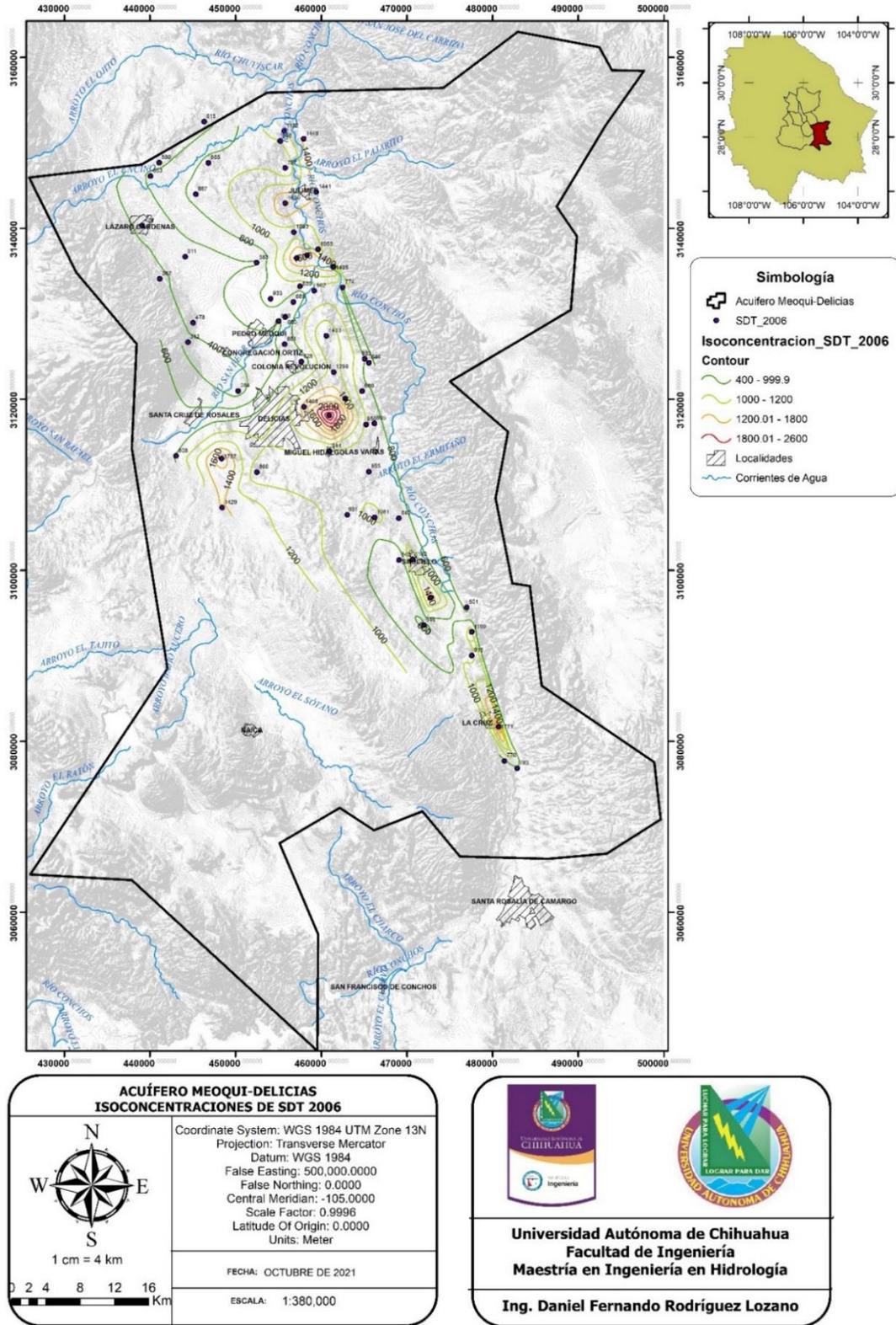


Figura 18 Isoconcentraciones SDT, año 2006



Para el año 2021 (Figura 19) se observó una disminución en el número de pozos que superan el límite máximo permisible de 1000 mg/L, lo que corresponde a 13 pozos de un total de 64 pozos analizados (20%); sin embargo, la tendencia en la zonificación no presenta cambios significativos, debido a que los municipios de Delicias y Julimes siguen siendo quienes cuentan con los valores más altos, con 5 y 7 localidades que sobrepasan este límite respectivamente; los valores más elevados están en las localidades de Col. Santa Fe (D130) con 2059 mg/L, seguido por La Regina (J10) con 1587 mg/L, Labor Nueva (J12) y La Boquilla (J13) ambas de Julimes con 1429 mg/L cada una, Col. Morelos (D127) con 1333 mg/L, Las Virginias (D133) con 1307 mg/L. Por otra parte, al costado noroeste del acuífero se observan algunas localidades cuyas concentraciones se encuentran por debajo de los 400 ppm, dichas localidades corresponden a Lázaro Cárdenas (M1), Estación Consuelo (M40) y Buenavista (M39) del municipio de Meoqui y Orinda (R38) en Rosales.

Por último, en la porción sur del acuífero la única localidad que supera el límite máximo permisible es Francisco Mezquital (S58) del municipio de Saucillo.



5.3 Discusión de resultados de la evolución espacial y temporal de la concentración de SDT

Con base en los resultados de las isolíneas de concentración de SDT realizadas para los años 2006 y 2021 se puede inferir que, hacia el sector norte del acuífero, específicamente aguas abajo del río Conchos y de su confluencia con el río San Pedro y también al costado este de Delicias, que corresponde a la parte central de acuífero, se localizan las mayores concentraciones de SDT.

Una de las razones principales por la cual estas zonas presentan altas concentraciones de SDT radica en la relación directamente proporcional que existe entre la distancia recorrida del agua de recarga a través de medios granulares y/o fracturados y la concentración de SDT, ya que entre mayor sea la distancia recorrida y dependiendo la velocidad de flujo y el tipo de formación geológica que atraviesa el agua, mayor será la incorporación de iones disueltos debido a que en estas interacciones se generan procesos de disolución de minerales.

Es importante mencionar que las isolíneas de concentración de SDT y las configuraciones de elevación de los niveles dinámicos elaboradas para los años 2005 y 2021 presentan correlación en la distribución espacial ya que los contornos de ambos productos muestran una tendencia principal hacia el noreste, debido a que los SDT aumentan progresivamente desde la zona de mayor carga hidráulica como lo es la Sierra Alta, localizada al noroeste del acuífero y se dirige hacia la zona de menor carga hidráulica correspondiente al valle aluvial del río Conchos localizado al noreste, aguas abajo de la confluencia de dicho río con el río San Pedro, el cual transcurre hacia el oeste de las sierras circundantes Humboldt y El Carrizo. También se observan incrementos desde el sur del acuífero hacia el centro, siendo la Col. Santa Fe (D133) del municipio de Delicias el pozo con la mayor concentración de SDT en la parte central del acuífero; sin embargo, esta parte coincide con direcciones de flujo radial ocasionado por el bombeo constante al que ha sido sometido el acuífero para actividades de riego superficial parcelario.



Se puede inferir que otra causa de las altas concentraciones hacia la zona norte del acuífero está relacionada al fenómeno de termalismo localizado en la zona del manantial El Pandeño del municipio de Julimes; esto debido a que la acción de la temperatura en el agua subterránea interviene en el aporte de los elementos disueltos (Galarza, 2011).

El hecho de que para el año 2021 ha disminuido la cantidad de pozos que superan el límite máximo permisible de SDT con respecto a las concentraciones reportadas en el año 2006 se debe probablemente a un proceso de dilución generado por la ocurrencia de la mezcla de dos aguas: el agua de flujo regional que proviene de Delicias cuya recarga principal son los retornos de riego agrícola, con la recarga del flujo subterráneo procedente de la Sierra Alta en la porción occidental, así como las aportaciones superficiales al riego con agua proveniente de las presa Francisco I. Madero y La Boquilla.

5.4 Resultados de los análisis y evolución espacial de los fluoruros en el acuífero

Los resultados obtenidos en la campaña de muestreo realizada entre diciembre de 2020 y febrero de 2021 se presentan en el Anexo 1, en donde se muestran también los datos históricos de fluoruros correspondientes a los 64 pozos analizados previamente, durante los años 2003 y 2006. Para fin de esta investigación es de gran interés observar la evolución de este parámetro a través del tiempo comparando los resultados obtenidos con anterioridad.

En los datos de la Comisión Nacional del Agua correspondientes al año 2003 (Figura 20) se observaron concentraciones de fluoruros por encima del límite máxima permisible por la Mod. NOM-127-SSA1-1994 (1.5 mg/L) al norte del acuífero, en la colonia San José (J9) del municipio de Julimes con 6.73 mg/L, la colonia Salón de Actos (R7) del municipio de Rosales con 6.52 mg/L y las colonias Progreso, Guadalupe Victoria y 10 de Mayo (M42, M21 y M5) con concentraciones de 6.27 mg/L, 5.12 mg/L y 5.03 mg/L respectivamente. También se observaron pozos con concentraciones entre 3 y 4 mg/L en dicha zona, principalmente sobre el curso del río San Pedro hasta su desembocadura en el río Conchos y al costado oeste de las sierras Humboldt y El Carrizo; entre las localidades que presentaron



este rango de concentración están Julimes, La Regina, La Esperanza, El Carrizo y Ex hacienda Humboldt (J15, J10, J11, J14 y J16) del municipio de Julimes y las localidades Potrero del Llano, Loreto, Gran Morelos y Los García (M6, M23, M25 y M22) del municipio de Meoqui.

Cabe expresar que al costado noroeste del acuífero los pozos presentaron concentraciones que sobrepasan levemente el límite máximo permisible de 1.5 mg/L para F⁻ tales como los pozos Barranco Blanco, Santa Rita de Casia y Orinda (R3, R2 y R38) del municipio de Rosales, así como Lázaro Cárdenas, Nuevo San Lucas, Estación Consuelo, Buenavista (M1, M41, M40 y M39) del municipio de Meoqui.

De manera contrastante destaca la porción central y el sur del acuífero donde se localiza la mayor cantidad de pozos con concentraciones inferiores o que sobrepasan levemente el LMP; estos pozos corresponden principalmente a los municipios de Delicias, Saucillo y La Cruz, siendo los pozos de Ejido El Diez (D137) y Armendáriz (D136), al sur del municipio de Delicias, los de mayor concentración con 2.92 mg/L y 2.89 mg/L respectivamente.

De acuerdo a lo anterior, para el año 2003 se tiene que el 73% de las muestras consideradas para este estudio sobrepasan el límite máximo permisible para fluoruro de la norma oficial mexicana (1.5 mg /L), y de éstas el 64% se encuentra hacia la parte norte del acuífero, principalmente en el valle aluvial del río San Pedro hasta su confluencia con el río Conchos y aguas abajo de dicha confluencia.

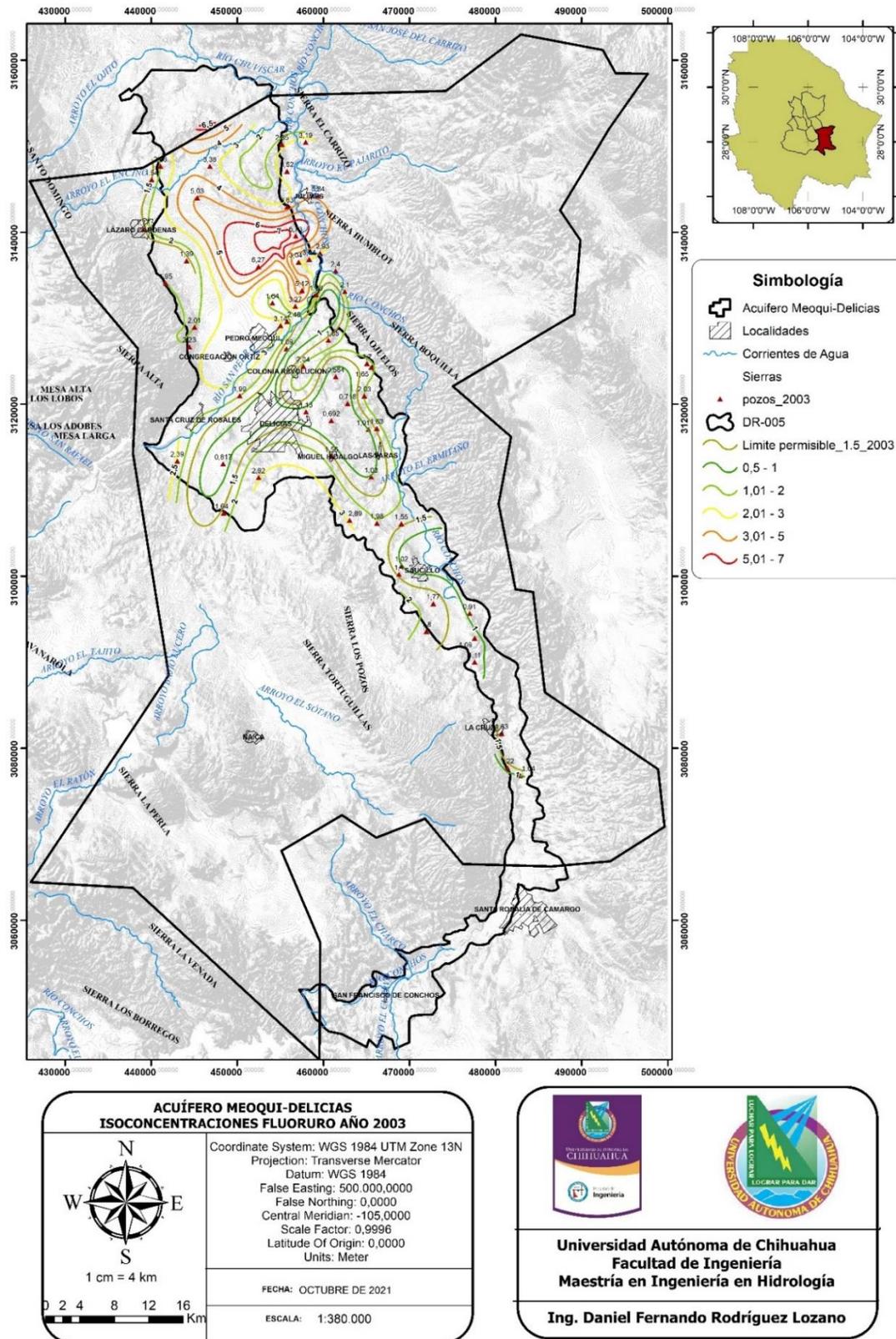


Figura 20 Isoconcentraciones fluoruro, año 2003



Posteriormente, en 2006 (Figura 21) se realizó una campaña de recolección de datos (Barrera, 2008; Rascón, 2011) donde se observaron algunos cambios, principalmente en la porción norte del acuífero, en las localidades de los municipios de Meoqui y Julimes. Se registraron incrementos de hasta 4.37 mg/L, como es el caso de la localidad 10 de Mayo (M5) en Meoqui, donde varió la concentración de 5.03 mg/L a 9.40 mg/L. En general se observó un descenso de 11% en el total de pozos monitoreados que sobrepasan el límite máximo permisible, ya que en el 2003 se contaba con un 73% de las muestras por encima de 1.5 mg/L y para el 2006 este porcentaje disminuyó a 62%. Los valores más elevados en el norte del acuífero se mantuvieron en las localidades de la Col. 10 de Mayo (M5) del municipio de Meoqui y San José (J9) del municipio de Julimes con 9.40 mg/L y 7.15 mg/L respectivamente. Cabe expresar que la mayoría de pozos que aumentaron su concentración con respecto al año 2003 corresponden a los del municipio de Julimes, tal es el caso de Julimes, La Esperanza, La Regina, El Carrizo, Ex hacienda Humboldt, Labor Nueva, El Gramal y las Arenillas (J15, J11, J10, J14, J16, J12, J17 y J18); el promedio en la concentración de F^- aumentó 0.25 mg/L en los pozos de uso público urbano monitoreados del municipio de Julimes. En contraste, se observó en la porción noroeste del acuífero una ligera disminución en la concentración de F^- ya que los pozos de Orinda (R38), Santa Rita de Casia (R3) y Barranco Blanco (R2) correspondientes al municipio de Rosales, al igual que Lázaro Cárdenas (M1) y Estación Consuelo (M40) del municipio de Meoqui, disminuyeron en promedio 0.15 mg/L su concentración con respecto al año 2003. Por otra parte, en la zona central del acuífero se evidenció un descenso tanto en el promedio de la concentración de F^- como en el número de pozos que sobrepasa la norma; en tal caso el porcentaje de pozos que sobrepasa el límite máximo permisible pasó de 64% en el 2003 a 36% en el 2006 y el promedio en la concentración disminuyó 0.2 mg/L. La mayoría de los pozos de Delicias y Saucillo registraron un descenso en la concentración y algunos pozos que en el 2003 superaban la norma como son Hidalgo (D134) de Delicias, Francisco I. Madero (S52), Orranteño (S47) y Gomeño (S54) del municipio de Saucillo y San Valentín (R30) y La Garita



(R35) del municipio de Rosales, para el año 2006 se encontraban por debajo del LMP. De manera general, en esta zona central destacan los pozos de la Colonia Armendáriz (D136) y Ejido El Diez (D137) del municipio de Delicias, ambas con una concentración de 2.50 mg/L, los que presentaron las concentraciones más altas. Por último, se identificó que hacia el sur del acuífero no se presentaron cambios significativos tanto en el promedio de concentración en comparación con el año 2003, así como en el número de pozos que sobrepasan la norma. Como rasgo considerable se identificó el pozo Estación Saucillo (S98) del municipio de Saucillo con una concentración de 2.40 mg/L como el de mayor concentración hacia el sur del acuífero. También es importante mencionar que ningún pozo monitoreado del municipio de La Cruz sobrepasó la norma tanto en el año 2003 como en el 2006.

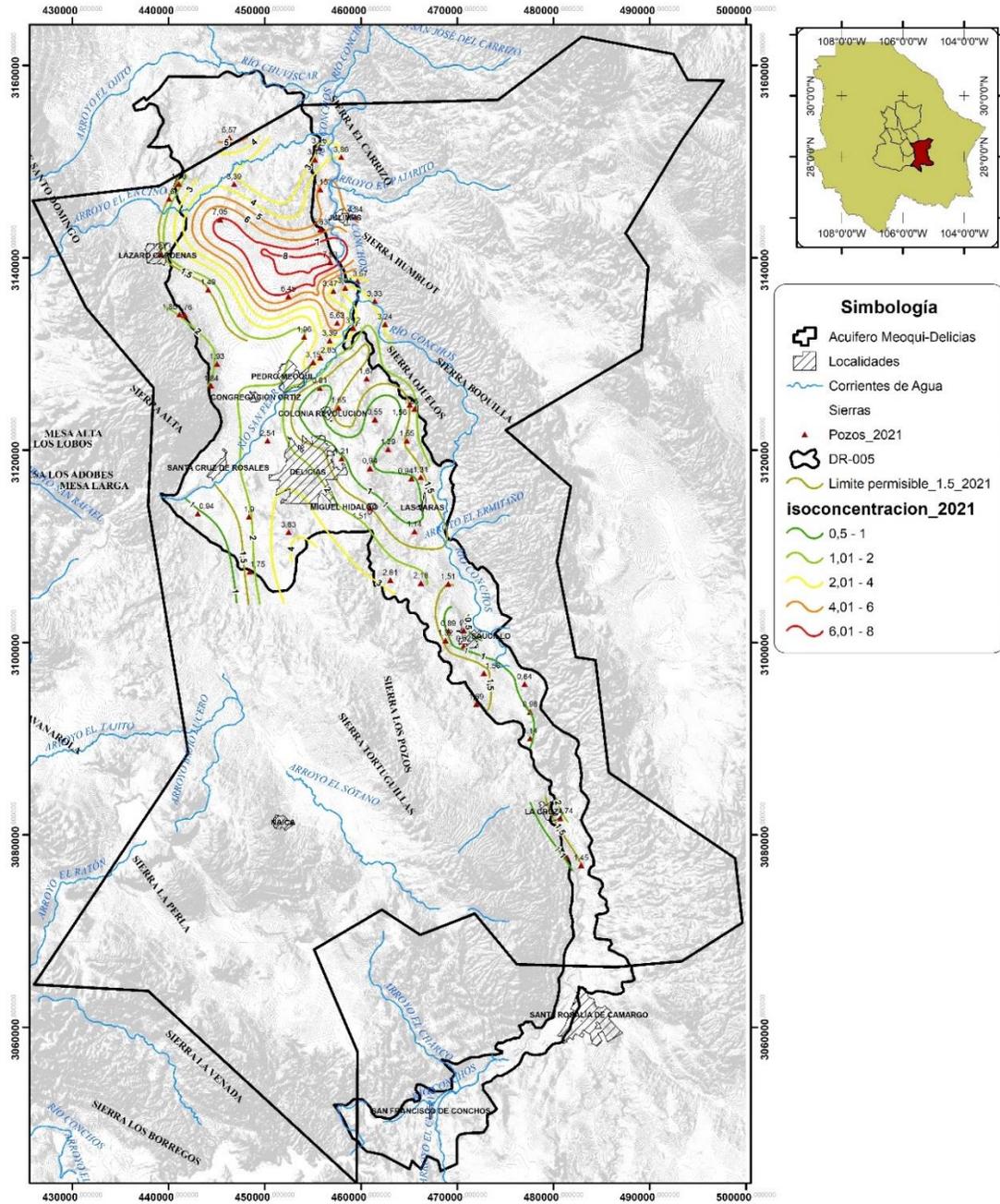
De manera general se observó que para estas fechas la zona con mayor concentración de fluoruros siguió siendo la parte norte del acuífero, en las laderas del valle aluvial del río Conchos hasta su confluencia con el río San Pedro, al costado oeste de las sierras Humboldt y El Carrizo.



La última campaña de recolección de datos corresponde a fines del 2020 e inicios del 2021 (Figura 22). Para esta fecha se observa que el 70% de los pozos censados sobrepasan la Norma Oficial Mexicana para agua potable (Mod. NOM-127-SSA1-1994) lo que representa un aumento de 8% con respecto al año 2006. Haciendo la misma observación de las campañas anteriores, se tiene que en la parte norte del acuífero se encuentran las mayores concentraciones, principalmente en los municipios de Meoqui y Julimes, en donde se registró un aumento en la concentración promedio de F^- de 0.37 mg/L con respecto a las mediciones del año 2006, es decir, que la tendencia en esta parte del acuífero es al alza. Los pozos que presentan las mayores concentraciones corresponden a la Col. San José (J9) del municipio de Julimes y la Col. 10 de Mayo (M5) del municipio de Meoqui, con concentraciones de 7.93 mg/L y 7.05 mg/L respectivamente; otras localidades que presentan altas concentraciones corresponden a Progreso (M42) y Guadalupe Victoria (M21) del municipio de Meoqui con concentraciones de 6.45 mg/L, 5.63 mg/L cada una, así como La Regina (J10), Esperanza (J11) y Julimes (J15) con concentraciones de 5.63 mg/L, 5.15 mg/L y 4.84 mg/L respectivamente. Es importante mencionar que algunas localidades ubicadas al costado noroeste continúan presentando disminución en las concentraciones con respecto al año 2006; tal es el caso de las localidades de Rosales: Orinda (R38) la cual pasó de una concentración de 1.98 mg/L a 1.84 mg/L y Santa Rita de Casia (R3) que pasó de 1.99 mg/L a 1.78 mg/L, así como Buenavista (M39) del municipio de Meoqui cuya concentración era de 2.13 mg/L y actualmente es de 1.9 mg/L. Por otra parte, en la parte central del acuífero también se observa un leve aumento en la concentración promedio de F^- y en el número de pozos que sobrepasan el límite máximo permisible, debido a que se registró un aumento de 0.22 mg/L en la concentración de F^- y también se evidencia un incremento de 23% en el número de pozos que superan el límite, pasando de 36% en el 2006 a 59% en el 2021. Los pozos que presentan las mayores concentraciones en la zona central corresponden al municipio de Delicias, en donde el Ejido El Diez (D137) y Armendáriz (D136) presentan concentraciones de 3.63 mg/L y 2.61 mg/L respectivamente. También se destaca que en el



costado oeste de Delicias ha aumentado la concentración de fluoruro. Por último, en la parte sur del acuífero no se observan cambios considerables en las concentraciones con respecto al año 2006; se destaca también que ningún pozo del municipio de La Cruz sobrepasa el límite máximo permisible de 1.5 mg/L.



ACUÍFERO MEOQUI-DELICIAS
ISOCONCENTRACIONES FLUORURO AÑO 2020-2021

Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 13N
 Projection: Transverse Mercator
 Datum: WGS 1984
 False Easting: 500.000.0000
 False Northing: 0.0000
 Central Meridian: -105.0000
 Scale Factor: 0.9996
 Latitude Of Origin: 0.0000
 Units: Meter

FECHA: OCTUBRE DE 2021
 ESCALA: 1:380.000

1 cm = 4 km

0 2 4 8 12 16 Km




Universidad Autónoma de Chihuahua
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ingeniería en Hidrología

Ing. Daniel Fernando Rodríguez Lozano

Figura 22 Isoconcentraciones fluoruro, año 2020-2021



5.5 Configuraciones piezométricas

Las configuraciones piezométricas establecidas en el área de estudio a partir del conjunto de datos medidos y registrados históricamente proporcionan una representación gráfica de la superficie de las capas de agua subterránea y se realizaron con el fin de seguir su evolución en el tiempo e identificar su sentido de flujo.

La elaboración de las configuraciones piezométricas del acuífero Meoqui-Delicias se realizó partiendo del censo de aprovechamiento de agua subterránea del año 2005, a partir del cual se seleccionaron los pozos a monitorear durante los meses de abril y agosto de 2021. Cabe expresar que los pozos escogidos para realizar las configuraciones piezométricas fueron los de uso público urbano y por esta razón los niveles de agua se consideraron dinámicos, debido a que en esta clase de pozos el equipo de bombeo generalmente se encuentra en continuo funcionamiento. Con respecto a la piezometría del año 2005, se incluyeron 123 pozos con datos de elevación y profundidad al nivel dinámico y en el caso de la piezometría del año 2021 fueron seleccionados 30 pozos que abarcaran una buena distribución espacial en el acuífero (Tabla 4). La tabla de piezometría de las mediciones de nivel actual como los datos históricos del año 2005 se muestran en el Anexo 3.

Tabla 4 Datos piezométricos de pozos monitoreados, año 2021

Nombre	X	Y	Localidad	Brocal	Prof_2021	Elev_2021
D129	465078	3124726	La Merced	1183	41,30	1141,70
D133	462807	3120081	Las Virginias	1209	46,00	1163,00
D137	452468	3111476	Ejido El Diez	1220	46,00	1174,00
D139	448350	3113056	Col. Campesina	1190	45,00	1145,00
J9	456780	3139556	San José	1126	27,20	1098,80
J11	455773	3147069	Esperanza	1104	21,20	1082,80
J15	459416	3144253	Julimes	1129	27,00	1102,00
LC63	477569	3090023	Las Pintas	1209	24,30	1184,70
LC64	480704	3081709	Panamericana	1200	15,80	1184,20
LC67	481387	3077721	Est. La Cruz	1219	20,10	1198,90
LC69	482863	3076832	Corraleño de Juárez	1209	14,20	1194,80



M1	439073	3140319	Lázaro Cárdenas	1200	50,10	1149,90
M5	445350	3144000	Col. 10 de Mayo	1179	36,00	1143,00
M21	457525	3133215	Gpe. Victoria	1129	10,10	1118,90
M22	457125	3136518	Los García	1134	18,90	1115,10
M22.2	458361	3136846	Los García	1119	13,10	1105,90
M23	456754	3131379	Loreto	1132	9,30	1122,70
M27	460584	3127421	Nuevo Loreto	1180	36,70	1143,30
M40	441139	3134094	Est. Consuelo	1196	33,10	1162,90
M41	444107	3136683	Nvo. San Lucas	1160	18,50	1141,50
R2	440062	3146120	Barranco Bco.	1191	63,50	1127,50
R35	443051	3113372	La Garita	1189	45,00	1144,00
S45	464772	3120961	Bella Vista	1200	41,30	1158,70
S47	466204	3117179	Orranteño	1176	15,20	1160,80
S50	465559	3111542	Altamirano	1190	16,20	1173,80
S54	469061	3106082	Gomeño	1178	18,20	1159,80
S56-3	470670	3101259	Saucillo P3	1189	50,00	1139,00
S56-8	470666	3099631	Saucillo P8	1198	65,00	1133,00
S57	469088	3101208	Col. Vicente Gro.	1205	80,00	1125,00
S98	468780	3100212	Est. Saucillo	1217	85,00	1132,00

5.5.1 Profundidad al nivel dinámico

En la configuración de la profundidad al nivel dinámico (pnd) para el año 2005 (Figura 23) se observó que los mayores valores se registraron en la parte central del acuífero, específicamente en la zona urbana del municipio de Delicias, donde se identificaron valores de hasta 90 m; en esta parte del acuífero se tiene un régimen de explotación intensivo de agua subterránea generado por actividades de riego superficial a nivel parcelario. Los valores medios oscilan entre los 30 a 60 m de profundidad, y se hayan principalmente hacia los piedemontes de las sierras localizadas tanto al este como al oeste del acuífero, como es el caso de la Sierra Humboldt y la Sierra Alta, respectivamente.

Por otra parte, las menores profundidades se observan en el sector norte, en el tramo del valle del río Conchos aguas abajo de la confluencia con el río San Pedro, donde se registran valores de pnd en un rango de 10 a 20 m. Con respecto al sur del acuífero, se observa



que hacia el sector del municipio de La Cruz se registran profundidades someras, aproximadamente de 20 m; sin embargo, hacia el costado oeste del municipio de Saucillo, específicamente en la Col. Vicente Guerrero y Estación Saucillo, se identificó una profundidad del orden de 80 m.

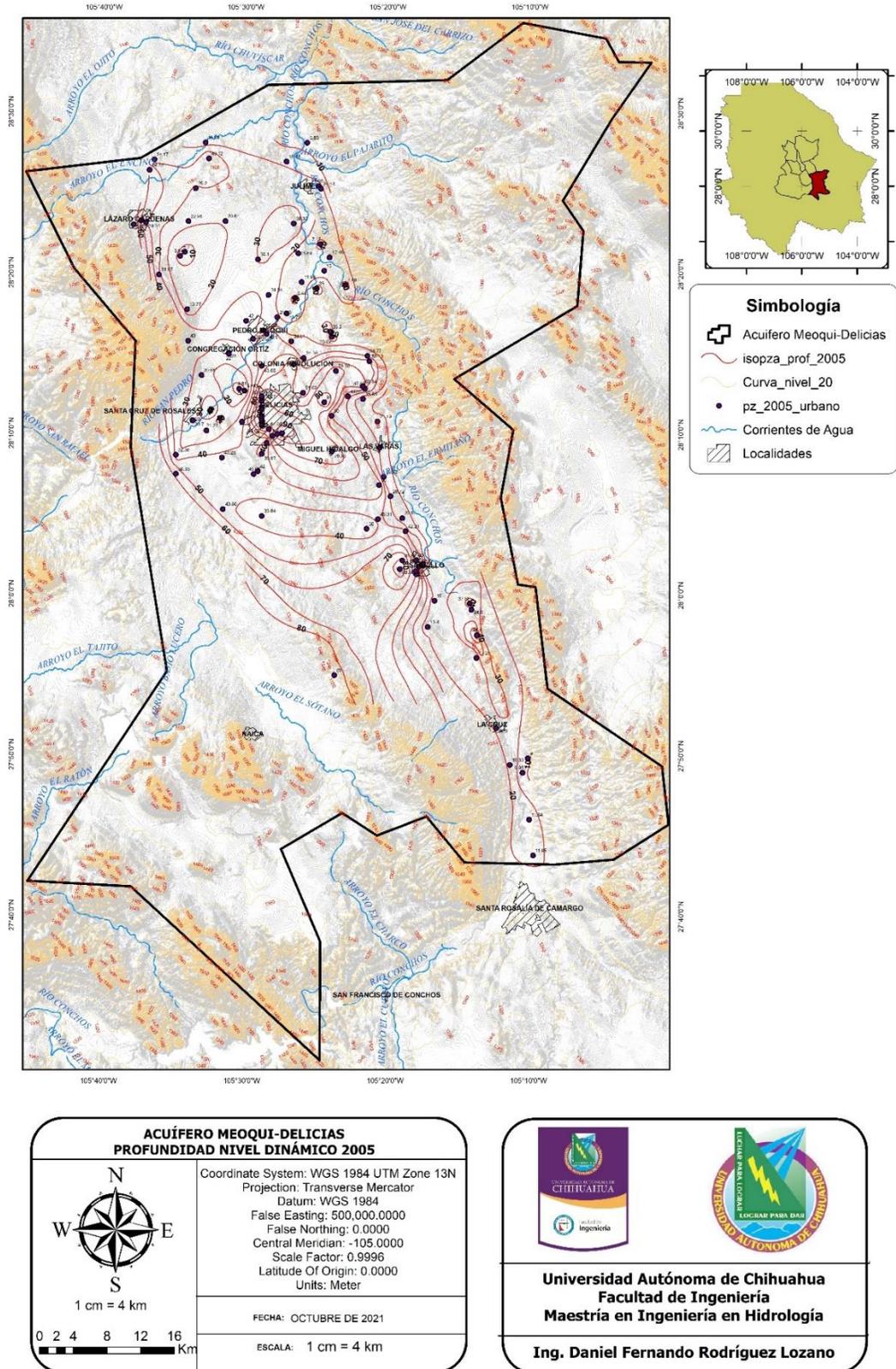


Figura 23 Profundidad del nivel dinámico, año 2005



Con respecto a la configuración de la profundidad al nivel dinámico del año 2021 (Figura 24) es importante mencionar que fue realizada con una densidad de pozos menor (30 pozos), por lo que a diferencia de la configuración del año 2005 no se observan aprovechamientos puntuales donde se tienen altos valores de profundidad. Sin embargo, se observa un comportamiento similar ya que hacia el sector norte del acuífero, sobre el valle aluvial del río Conchos y aguas abajo de la junta de los ríos principales, se registran las menores profundidades, las cuales oscilan entre 10 a 20 m. Por otra parte, debido a que no se monitoreó el nivel dinámico en varias localidades pertenecientes al municipio de Delicias, no es posible observar el comportamiento en dicha zona, ya que para el año 2005 correspondía a la zona con mayores profundidades; por lo tanto no es posible saber si actualmente la tendencia sigue igual o si, debido al intenso bombeo para realizar actividades de riego a nivel parcelario, se ha producido una recarga por retornos de riego y los niveles se han recuperado. Hacia el costado noroeste, en el piedemonte de la Sierra Alta, se identificaron profundidades entre 40 y 50 m y por último, hacia el sur del acuífero se sigue presentando una profundidad puntual de 80 m en el pozo de la Estación Saucillo; no obstante, las localidades circundantes tienen profundidades menores, en un rango entre 30 y 60 m.

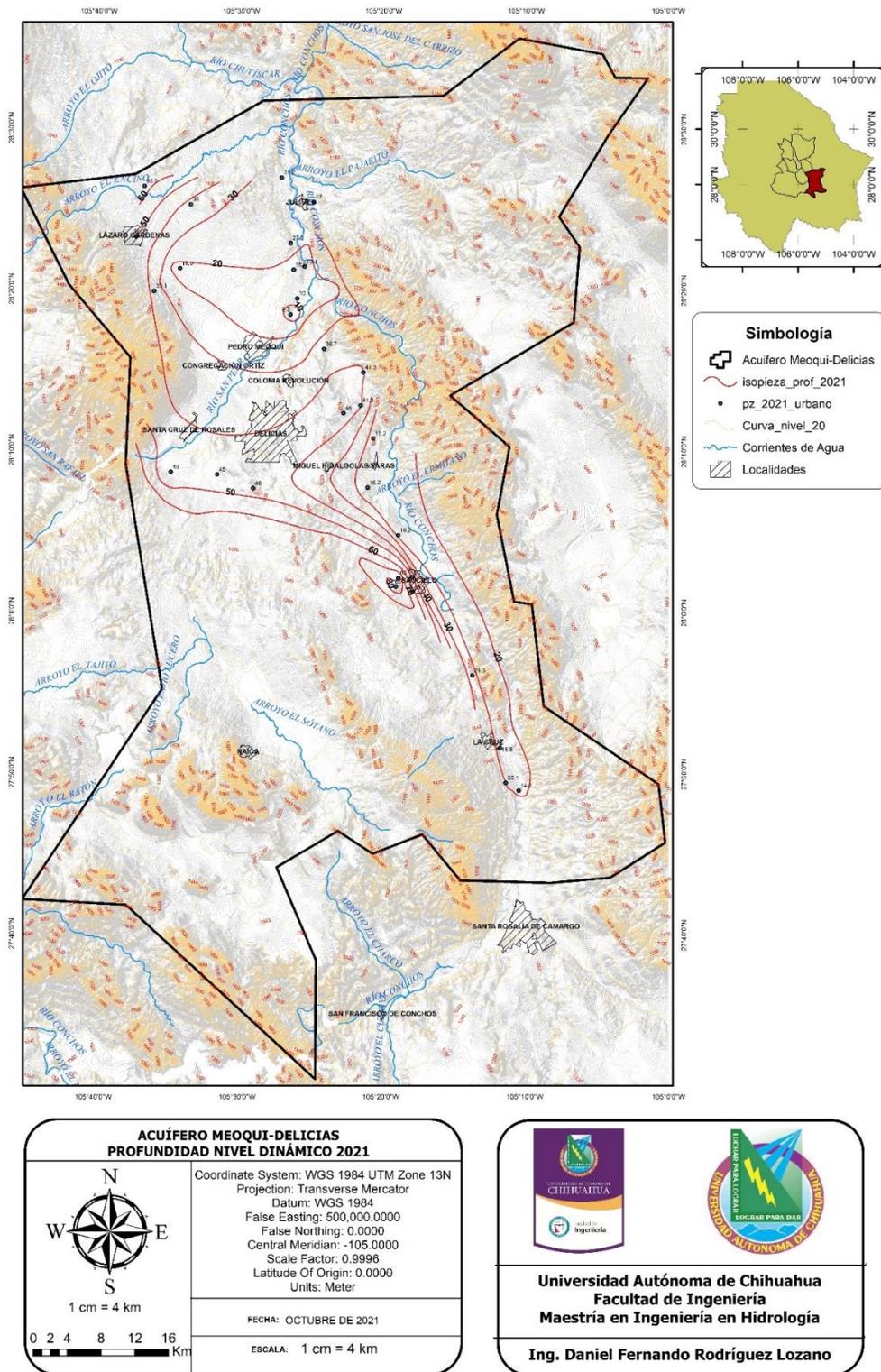


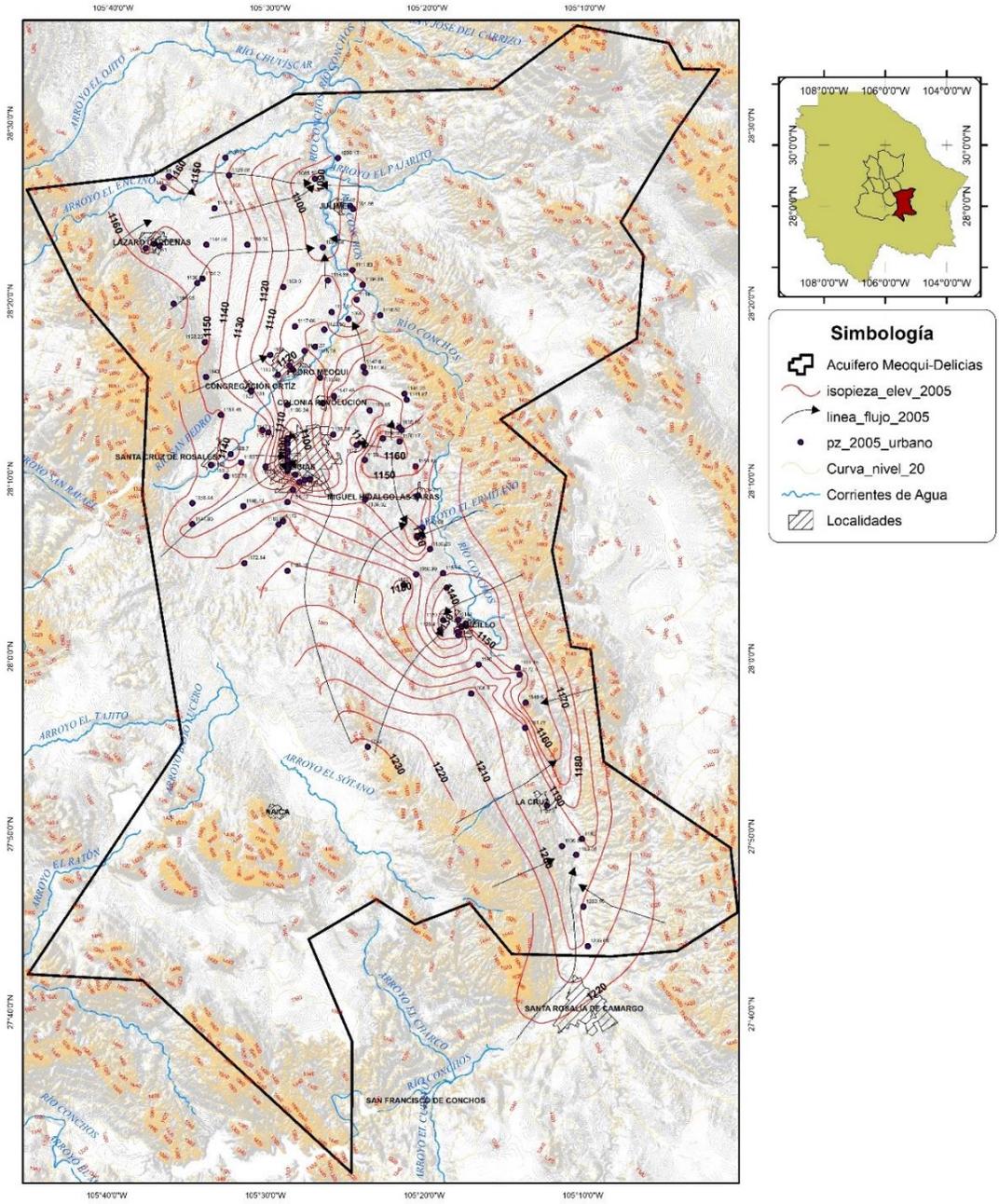
Figura 24 Profundidad del nivel dinámico, año 2021



5.5.2 *Elevación al nivel dinámico*

Con respecto a la elevación de los niveles dinámicos (end), la configuración para el año 2005 (Figura 25) muestra que hacia el norte del acuífero la tendencia regional de flujo va en sentido oeste-noreste, es decir, desde la Sierra Alta hacia el valle aluvial del río Conchos aguas abajo de su confluencia con el río San Pedro, lo que indica que dicha sierra constituye una de las principales zonas de recarga por precipitación pluvial del acuífero y cuyos volúmenes de recarga se dirigen hacia el noreste. En las sierras localizadas al este del valle aluvial también se observan direcciones de flujo hacia dicho valle por lo que también constituyen zonas de recarga. Cuantitativamente, hacia el piedemonte de la Sierra Alta se registran elevaciones al nivel dinámico del orden de 1160 m, mientras que el valle aluvial presenta elevaciones mínimas de 1090 m.

En la parte central, en zonas aledañas al municipio de Delicias, se observa que la elevación del nivel dinámico ha sido distorsionada como consecuencia del intenso bombeo generado para riego superficial parcelario, lo que ha desarrollado conos de abatimiento puntuales que han provocado flujos radiales hacia estos aprovechamientos de agua subterránea. Los pozos con mayor estrés hidráulico generado por el bombeo están ubicados en zona urbana del municipio de Delicias y presentaron una elevación de 1090 m, mientras que en las partes serranas la elevación asciende hasta 1140 m. En el sector sur del acuífero se observan direcciones de flujo del oeste hacia el centro del valle y lo mismo ocurre con respecto a las sierras ubicadas al este ya que también aportan volúmenes de recarga hacia el valle. Cabe expresar que también se observó un cono de abatimiento sobre el pozo de la Estación Saucillo, localizado al oeste del municipio de Saucillo. De manera general, se observa que la tendencia regional de flujo es de sur a norte con importantes aportes de volúmenes de recarga desde el oeste.



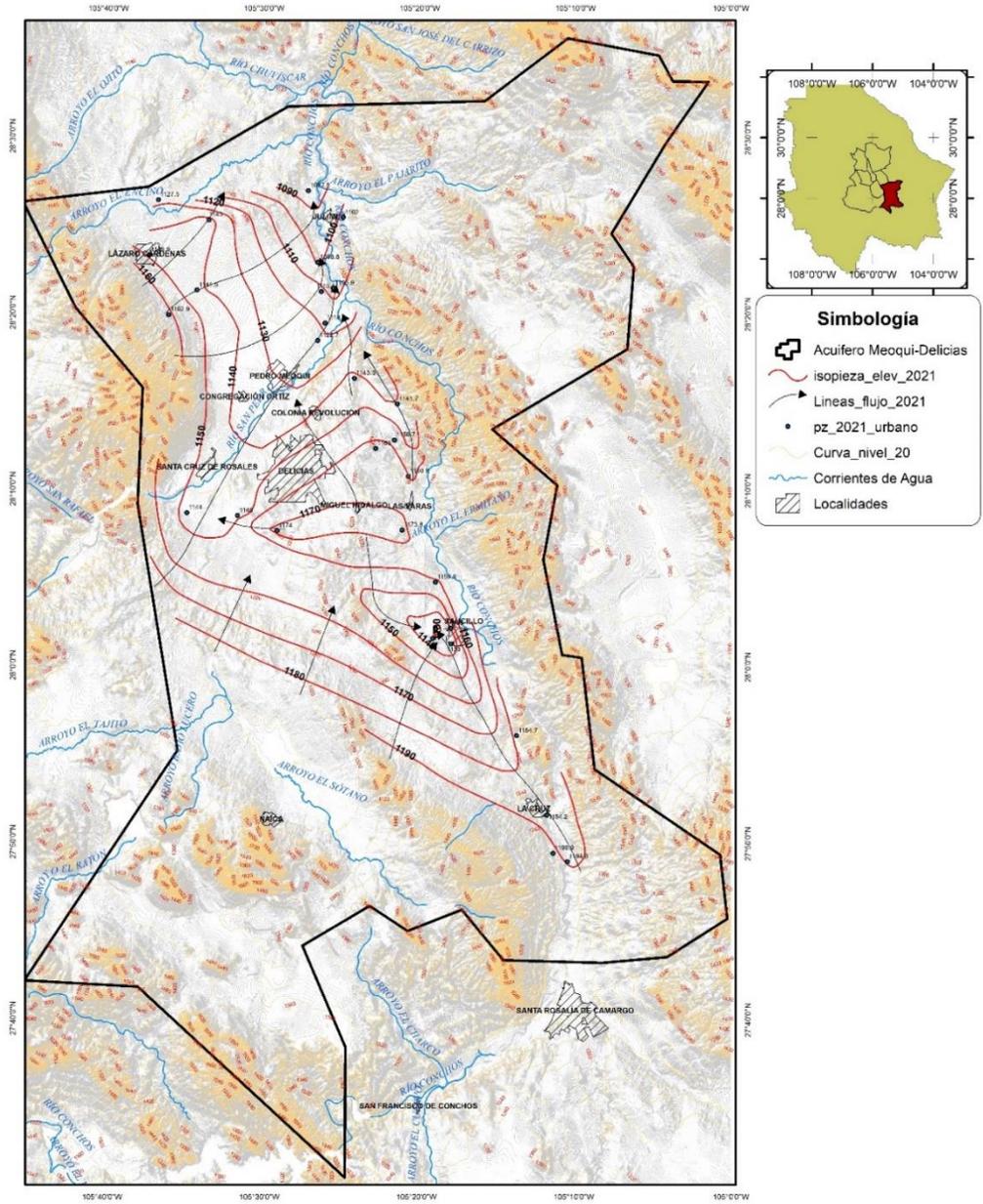
ACUÍFERO MEOQUI-DELICIAS ELEVACIÓN NIVEL DINÁMICO 2005	
<p>1 cm = 4 km</p>	<p>Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 13N Projection: Transverse Mercator Datum: WGS 1984 False Easting: 500,000.0000 False Northing: 0.0000 Central Meridian: -105.0000 Scale Factor: 0.9996 Latitude Of Origin: 0.0000 Units: Meter</p>
	<p>FECHA: OCTUBRE DE 2021 ESCALA: 1 cm = 4 km</p>

<p>Universidad Autónoma de Chihuahua Facultad de Ingeniería Maestría en Ingeniería en Hidrología</p>	
<p>Ing. Daniel Fernando Rodríguez Lozano</p>	

Figura 25 Elevación del nivel dinámico, año 2005



Con respecto a la configuración de la elevación del año 2021 (Figura 26) es importante mencionar que, debido a que se consideró una menor densidad de pozos en el análisis, no se observan muchas distorsiones de la elevación del nivel dinámico hacia la parte central como ocurre en la configuración del año 2005. Hacia el sector norte del acuífero de nuevo se evidencia que el flujo subterráneo ocurre en sentido oeste-noreste, es decir, desde la Sierra Alta hacia el valle aluvial del río Conchos, por lo que la tendencia se ha mantenido constante con respecto al año 2005. En la parte central del acuífero, a la altura de Ciudad Delicias el flujo general prosigue hacia el norte, recibiendo aportaciones de otra zona de recarga localizada hacia el occidente. Por último, hacia el costado sur del acuífero, el flujo prosigue hacia el centro del acuífero, sin embargo, es distorsionado en el pozo de la Estación Saucillo a causa de un cono de abatimiento hallado en este sector. En resumen, se observa que el flujo regional es en sentido sur-norte con importantes aportaciones desde el oeste del acuífero.



ACUÍFERO MEOQUI-DELICIAS ELEVACIÓN NIVEL DINÁMICO 2021	
 1 cm = 4 km 	Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 13N Projection: Transverse Mercator Datum: WGS 1984 False Easting: 500,000.0000 False Northing: 0.0000 Central Meridian: -105.0000 Scale Factor: 0.9996 Latitude Of Origin: 0.0000 Units: Meter
	FECHA: OCTUBRE DE 2021 ESCALA: 1 cm = 4 km

Universidad Autónoma de Chihuahua Facultad de Ingeniería Maestría en Ingeniería en Hidrología	
Ing. Daniel Fernando Rodríguez Lozano	

Figura 26 Elevación del nivel dinámico, año 2021



5.5.3 Evolución del nivel dinámico

Para analizar la evolución del nivel dinámico se consideró un periodo de 16 años comprendido entre el 2005 al 2021 (Figura 27). Se observa que los mayores abatimientos se presentaron en el sector noroeste del acuífero, principalmente en la Colonia Barranco Blanco (R2) del municipio de Rosales, con una disminución de 14 m durante todo el periodo, lo que representa un descenso promedio de 0.87 m por año. Le sigue en magnitud la colonia Nuevo San Lucas (M41) del municipio de Meoqui con un abatimiento de 13 m en total o 0.81 m por año. En general el sector noroeste se caracteriza por presentar los mayores abatimientos. Como rasgo importante se debe mencionar que algunas localidades de este sector quedan por fuera del Distrito de Riego 005 por lo que no reciben aportes de recarga inducida por retornos de riego superficial, y por otra parte, presentan concentraciones bajas de fluoruro. En contraste, hacia la parte central del acuífero no se observan abatimientos de gran magnitud debido a que la recarga más importante se genera por la infiltración de excedentes del riego superficial a nivel parcelario, así como a través de los canales de conducción y distribución sin revestir por lo que se ha mantenido constante registrando abatimientos máximos de 4 m durante todo el periodo de tiempo considerado; sin embargo, es importante mencionar que no se tomaron en cuenta los pozos localizados en zona urbana de ciudad Delicias, por lo que no se conoce con exactitud el comportamiento en esa área. Por último, en el sector sur del acuífero se observan abatimientos de hasta 6 m en localidades adyacentes al municipio de La Cruz durante el periodo de 16 años considerado (0.37 m/año).

Es importante mencionar que no existe una relación clara entre el abatimiento del nivel dinámico y la concentración de fluoruro, ya que aunque hipotéticamente se esperaba que los pozos con menores niveles tuvieran las concentraciones más altas de fluoruro, esto no se observa; por el contrario, se constata que las altas concentraciones encontradas principalmente hacia el sector noreste están más relacionados con la presencia de estratos mineralizados someros, los cuales son lixiviados con agua de recarga natural y también con



volúmenes de agua de recarga inducida proveniente de los retornos de riego que atraviesan capas del aluvión en el valle.

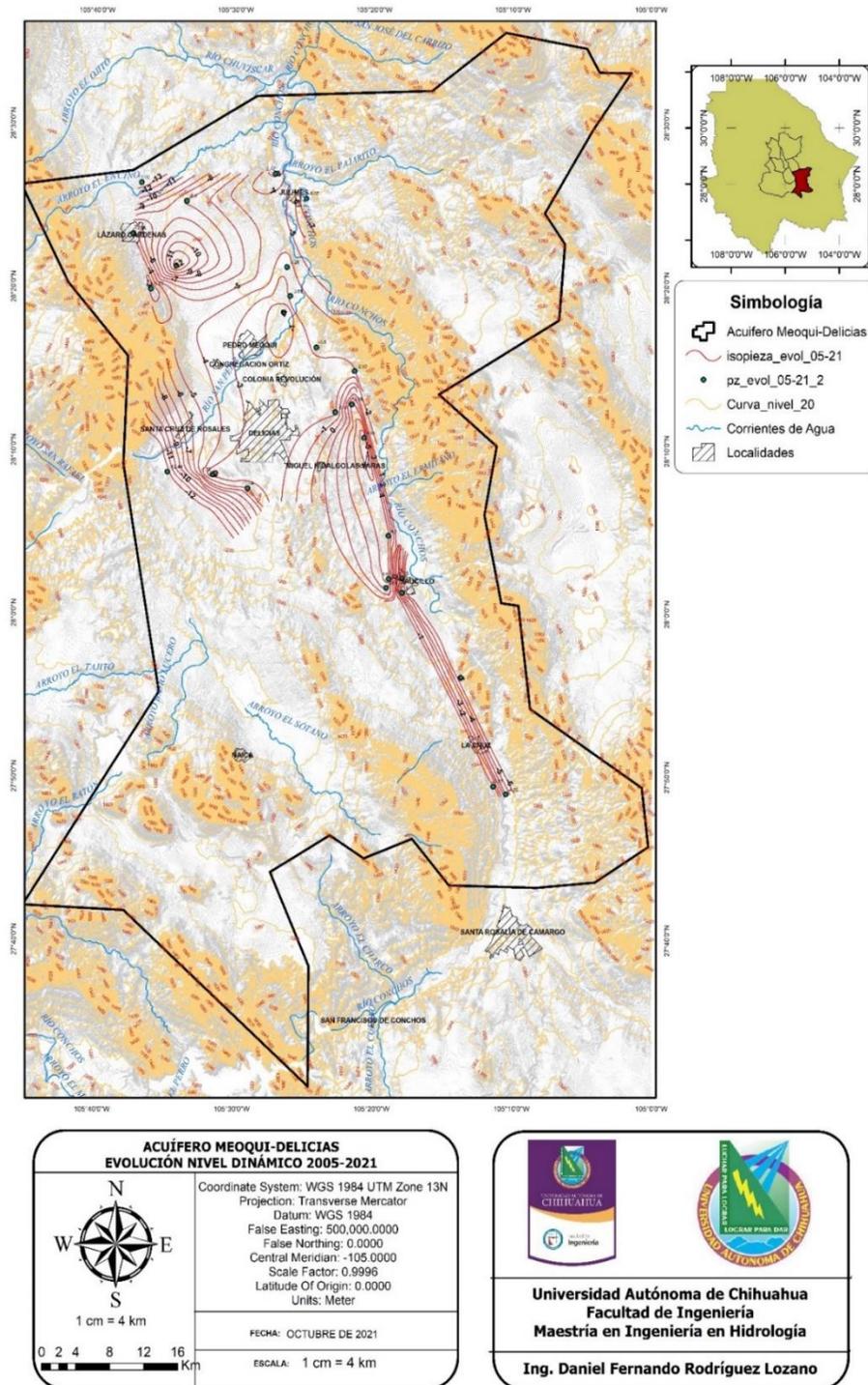


Figura 27 Evolución del nivel dinámico, periodo 2005-2021



5.6 Discusión de resultados de evolución espacial y temporal de la concentración de fluoruros

Con base en los resultados de las isolíneas de concentración de F^- realizadas para los años 2003, 2006 y 2021 se puede inferir que hacia la parte norte del acuífero, específicamente sobre el valle aluvial del río Conchos, aguas abajo de su confluencia con el río San Pedro donde están la mayoría de las localidades del municipio de Julimes, se encuentran las mayores concentraciones de F^- y la tendencia en esta zona ha estado en alza continuamente.

Una de las principales razones se debe a la litología y granulometría que presenta dicho valle aluvial en este sector norte centro. La composición granulométrica corresponde a depósitos no consolidados de gravas y arenas constituidas por fragmentos de rocas ígneas félsicas extrusivas del periodo Terciario que fueron erosionadas de las sierras circundantes, principalmente de las sierras Humboldt y El Carrizo ubicadas al este del valle aluvial del río Conchos, cuya composición litológica predominante corresponde a riolitas y tobas riolíticas fracturadas, deleznales y con presencia de alteraciones mineralógicas debido a la constante meteorización química y física a la que han sido expuestas.

Es importante mencionar que este tipo de rocas ígneas félsicas y los depósitos hidrotermales pueden contener fluorita (CaF_2) como mineral accesorio (ganga), el cual es considerado el principal mineral de flúor y por lo tanto la fuente principal de F^- al disolverse CaF_2 en el agua subterránea.

En relación al fenómeno de termalismo localizado la zona del manantial El Pandeño del municipio de Julimes, Galarza (2011) señaló que las altas concentraciones de fluoruro en algunas localidades de dicho municipio, como La Regina y El Entronque, se relacionan con la influencia del fenómeno de termalismo (manantiales) de esta zona, donde el agua se encuentra recirculando a través de rocas que contienen grandes cantidades de sales como el cloruro de sodio (halita), fluoruros, magnesio y potasio, entre otros; esto coincide con los altos valores de SDT registrados en el área recientemente (Tabla 3 y Figura 19).



Por otra parte, la zonificación espacial de las concentraciones de fluoruros, se correlaciona en parte con el estudio de vulnerabilidad a la contaminación acuífera aplicado por Barrera (2008) y Rascón (2011) a través de la metodología DRASTIC, la cual permite deducir la susceptibilidad que tiene un acuífero de ser afectado por contaminantes provenientes de la superficie y se basa en la asignación de índices que van de 1 (mínima vulnerabilidad) a 10 (máxima vulnerabilidad), de acuerdo a las características y el comportamiento de las variables consideradas en el acrónimo DRASTIC: D (profundidad del nivel freático), R (recarga neta), A (litología del acuífero), S (tipo de suelo), T (topografía o pendiente del terreno), I (impacto de la litología de la zona no saturada), C (conductividad hidráulica).

Los mapas de isolíneas de concentración muestran que a lo largo del tiempo las mayores concentraciones de fluoruro se han mantenido al costado noreste del acuífero a excepción de la Col. 10 de Mayo en Meoqui ubicada en la porción noroeste del mismo, la cual desde el 2003 ha sido uno de los principales focos de contaminación por fluoruro. Por esta razón el comportamiento espacial de la concentración de fluoruro se relaciona en parte con la zonificación obtenida por medio de la metodología DRASTIC, ya que en el sector noreste se encuentra la principal zona de descarga del acuífero, debido a que presenta la topografía más baja y geomorfológicamente corresponde al valle aluvial del acuífero y por lo tanto muchas de las variables involucradas en el análisis de vulnerabilidad tienen mayor magnitud que hacia las zonas serranas. En el caso de la Col. 10 de Mayo, la cual no se encuentra dentro de una zona de alta vulnerabilidad a la contaminación, probablemente sus altas concentraciones de fluoruro a lo largo del tiempo están relacionadas a factores geológicos como por ejemplo la existencia de estratos someros con presencia de fluorita que por medio de recarga inducida por retornos de riego ha lixiviado y movilizado iones fluoruro al agua subterránea.

La profundidad del nivel freático es inversamente proporcional a la vulnerabilidad, de manera que cuanto mayor sea la profundidad del agua, mayor tiempo tomará al



contaminante llegar al acuífero, lo que significa una mayor posibilidad de atenuación por la zona no saturada. Según las configuraciones de profundidad de los niveles dinámicos (Figura 23 y Figura 24) se observa que en la región del valle aluvial que sigue la trayectoria del río Conchos localizado al costado noreste de la zona de estudio se estimaron los niveles más someros (entre 10 m y 20 m) y por lo tanto presenta la mayor vulnerabilidad de que los contaminantes alcancen la zona saturada desde la superficie incluyendo los fluoruros que se lixivian de las rocas que lo contienen por procesos de intemperismo químico.

En el caso de la recarga, la ponderación es más alta a mayor volumen, ya que se tiene mayor infiltración desde la superficie y por ende mayor es la vulnerabilidad para que el contaminante se movilice a través de dispersión hidrodinámica desde la superficie. Según los resultados de Barrera (2008) se tienen los mayores volúmenes de recarga hacia la zona de descarga que coincide con el valle aluvial del río Conchos, en la cual también se cuantifica un volumen importante producto de recarga inducida por los retornos de riego del DR-005.

Por su parte, la litología del acuífero se pondera considerando que a mayor granulometría y fracturación, se tiene mayor permeabilidad y por tanto un grado de vulnerabilidad más elevado. En el caso del valle aluvial donde se registraron las más altas concentraciones de fluoruros, predominan las gravas y arenas del río Conchos que constituyen los rellenos granulares de los valles, engloban a los conglomerados y se encuentran formados por materiales como son las guijas, guijarros, gravas, arenas y arcillas. En general estos depósitos presentan valores de permeabilidad media a alta y por lo tanto favorecen la infiltración desde la superficie de contaminantes incluyendo los fluoruros que se disocian de los minerales contenidos en fragmentos líticos volcánicos presentes en los rellenos de los valles (Barrera, 2008).

En el caso del tipo de suelo, se observa que hacia el costado noreste, predomina el tipo de suelo litosol, el cual corresponde a suelos extremadamente delgados, someros, pedregosos y poco desarrollados con escasa profundidad. Por esta razón son suelos



permeables y, por lo tanto, más vulnerables a la infiltración de contaminantes desde la superficie, incluyendo los fluoruros lixiviados de fragmentos líticos volcánicos.

Con respecto a la topografía, se considera la pendiente del terreno y su variación espacial. Esta variable controla la posibilidad de que un contaminante participe en el escurrimiento o permanezca en la superficie el tiempo suficiente para su infiltración. Las pendientes (bajas) que favorecen la infiltración se asocian a una alta vulnerabilidad. El valle se distingue por su alta vulnerabilidad debido a que sus porcentajes de pendiente oscilan en el rango de 0 a 2% por lo que la retención de agua e infiltración será mayor que el escurrimiento y por lo tanto es probable que se lixivie mayor cantidad de minerales con contenido de fluoruro desde la superficie.

En el caso del impacto de la zona no saturada, el cual hace referencia al nivel de atenuación del material que está debajo del suelo y por encima de la lámina de agua. El impacto estimado está determinado en función de los materiales geológicos existentes en el área de estudio. Según la interpretación de cortes litológicos reportados por Barrera (2008) en la zona del valle aluvial al costado noreste del acuífero, en donde se tienen las mayores concentraciones de fluoruro, fueron identificadas arenas y gravas con contenido de arcilla significativo.

La fuente del fluoruro al agua subterránea en esta región está en las rocas que conforman las sierras circundantes a la planicie. El fluoruro es liberado al agua subterránea por el proceso del intemperismo químico de rocas ígneas de composición félsica. El F^- es liberado de ellos desde su posición hidroxilo, lo que aumenta los niveles de F^- disuelto, los cuales son movilizados por el proceso de dispersión hidrodinámica.

En contraste, las zonas con menores concentraciones de fluoruros se observan en la parte central del acuífero, al este del municipio de Delicias sobre algunas localidades como Vicente Guerrero, Santa Fe y Las Virginias y hacia el sur del acuífero sobre algunas localidades de Saucillo y La Cruz. Si bien en estas zonas del acuífero la litología predominante no difiere mucho de la que se presenta al norte del mismo ya que en la mayoría



corresponde a depósitos aluviales constituido por fragmentos líticos volcánicos tamaño grava que han sido erosionados de las sierras que constituyen parte de los rellenos granulares de los valles. Sin embargo, la profundidad de los niveles dinámicos es mayor por lo que el contaminante, en este caso el fluoruro que es lixiviado desde la superficie, tarda mayor tiempo en alcanzar la zona saturada.

En conclusión, se observa una relación parcial entre los resultados del estudio de vulnerabilidad a la contaminación intrínseca y las isolíneas de concentración de fluoruro, ya que en el caso del costado noreste del acuífero existe una alta correlación dado a que presenta tanto una vulnerabilidad media-alta como pozos con altas concentraciones de fluoruro, lo que indica que los parámetros evaluados en el estudio de vulnerabilidad favorecen el flujo descendente de agua con contenido de iones fluoruro disueltos producto del intemperismo químico dado en superficie o en estratos someros con presencia de minerales de ganga de flúor como fluorita u otros minerales como micas, hornblendas que por lo general están contenidos en rocas ígneas félsicas. No obstante, se observan algunas excepciones como en el caso de Col. 10 de Mayo (M5) ubicado al noroeste y que corresponde a un foco a la contaminación por fluoruro dado a que históricamente ha presentado altos niveles de concentración de este elemento y sin embargo el estudio de vulnerabilidad arrojó una clasificación media-baja, esto debido a que algunas de los parámetros evaluados a través de esta metodología no propician que esta zona tenga una clasificación más alta a la vulnerabilidad como por ejemplo la topografía y la profundidad al nivel dinámico que es más alta que hacia las zonas del valle aluvial; sin embargo, las altas concentraciones posiblemente indican mayor relevancia de factores de tipo geológico asociado a la presencia de litologías y minerales fuente de flúor que se lixivian y alcanzan a recargar el agua subterránea .

Adicionalmente, al costado sureste (localidades de La Cruz y Saucillo), se observa un comportamiento totalmente contrario, es decir, con un grado de vulnerabilidad media-alta y niveles bajos de concentración de fluoruro, lo que indica que aunque se cumplen las condiciones para que dichas zona presente altas concentraciones de fluoruro dado a factores



como la topografía plana (valle aluvial) y la profundidad somera de los niveles dinámicos que favorecen el flujo vertical de contaminantes, esta zona presenta bajas concentraciones por dicho elemento, debido a factores geológicos, ya que si bien las rocas félsicas lo contienen, existen cuerpos de estas rocas que lo contienen en mayor concentración. Adicionalmente, es importante evaluar otros factores que no están involucrados en la metodología DRASTIC pero que condicionan la concentración de fluoruro en el agua subterránea, como por ejemplo, el tiempo de residencia del agua con la roca, la temperatura debido a la profundidad de circulación, y el pH (Carrillo et al., 2002).

5.7 Relación entre profundidad al nivel dinámico y concentración de fluoruro

La alta concentración de F^- en los acuíferos más profundos en comparación con los acuíferos poco profundos podría deberse a su alto tiempo de residencia en el sistema acuífero; por lo tanto, tiene un tiempo de contacto más largo para la disolución de los minerales portadores de F^- presentes (Ramakrishnan, 1998 en Babu et al., 2015).

Sin embargo, no se observa correlación entre las concentraciones de fluoruro en el agua subterránea y la profundidad de los niveles dinámicos que fueron graficadas para el año 2021 (Tabla 5 y Figura 28) y 2006 (Tabla 6 y Figura 29). No obstante, la línea de tendencia en ambas fechas muestra un comportamiento descendente de las concentraciones de fluoruro a medida que aumenta la profundidad al nivel dinámico, lo que indica que el principal control de las altas concentraciones se debe a lixiviación vertical de flúor desde la zona vadosa hasta la zona saturada, el F^- es liberado hacia el agua subterránea por el proceso del intemperismo químico de las rocas, en donde el proceso más importante es la hidrólisis, siendo esta hipótesis contraria a lo que se sugiere en diversos estudios en donde las altas concentraciones de fluoruro son producto de la interacción del basamento con flujos regionales más profundos y por lo tanto que han tenido mayor tiempo de residencia con la roca.



Tabla 5 Concentración de fluoruros año 2021 Vs Profundidad al nivel dinámico año 2021

Pozo	X	Y	Localidad	F (mg/L) 2021	Profundidad al nivel dinámico (m) 2021
D129	465077.52	3124726.45	La Merced	1.56	41.30
D133	462806.72	3120080.53	Las Virginias	1.29	46.00
D139	448349.95	3113055.50	Col. Campesina	1.90	45.00
LC63	477568.99	3090022.93	Las Pintas	1.14	24.30
LC64	480703.92	3081709.43	Panamericana	1.74	15.80
LC67	481386.92	3077720.53	Est.la Cruz	1.08	20.10
LC69	482862.89	3076832.16	Corraleño de Juárez	1.45	14.20
M1	439072.87	3140319.39	Lázaro Cárdenas	1.61	50.10
M22	457125.14	3136517.68	Los García	3.47	13.90
M22.2	458361.12	3136845.61	Los García	3.01	13.10
M23	456753.56	3131378.66	Loreto	3.39	9.30
M27	460583.74	3127421.44	Nuevo Loreto	1.67	36.70
M40	441138.51	3134093.76	Est. Consuelo	1.85	33.10
M41	444106.85	3136683.50	Nvo. San Lucas	1.49	18.50
R2	440062.50	3146119.62	Barranco Bco.	1.60	63.50
R35	443050.72	3113372.38	La Garita	0.94	45.00
S45	464772.06	3120960.79	Bella Vista	1.55	41.30
S47	466203.83	3117179.03	Orranteño	1.31	15.20
S50	465559.32	3111542.19	Altamirano	1.14	16.20
S54	469060.99	3106082.30	Gomeño	1.52	18.20
S56-3	470670.32	3101259.42	Saucillo P3	0.75	50.00
S56-8	470666.34	3099631.00	Saucillo P8	0.62	65.00
S57	469087.70	3101208.01	Col. Vicente Gro.	0.89	80.00
S98	468780.41	3100211.81	Est. Saucillo	1.32	85.00

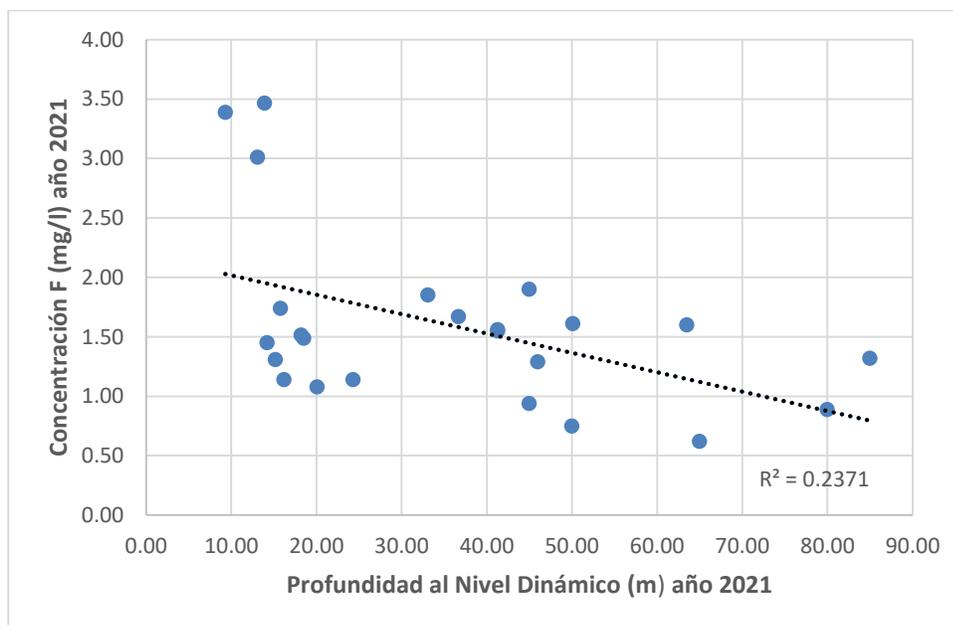


Figura 28 Concentración de fluoruros año 2021 Vs profundidad al nivel dinámico año 2021



Tabla 6 Concentración de fluoruros año 2006 Vs Profundidad al nivel dinámico año 2005

Pozo	X	Y	Localidad	F ⁻ (mg/L) 2006	Profundidad al nivel dinámico (m) 2005
D126	457660.10	3124407.15	Fco. I.Madero	2.25	34.35
D127	461442.87	3123186.75	Col. Morelos	0.70	78.35
D129	465077.52	3124726.45	La Merced	1.67	38.77
D130	460935.59	3118092.47	Santa Fe	0.82	50.00
D131	457994.52	3119099.52	Vicente Guerrero	1.10	92.73
D133	462806.72	3120080.53	Las Virginias	0.58	43.65
D134	460951.46	3113949.23	Hidalgo	1.48	78.98
D136	463059.05	3106487.06	Armendariz	2.50	33.84
D137	452467.93	3111476.37	Ejido El Diez	2.50	42.00
D138	448423.46	3107338.85	Col. Nicolas Bravo	1.79	40.86
D139	448349.95	3113055.50	Col. Campesina	0.77	43.28
J13	455670.17	3151383.44	La Boquilla	2.32	5.83
J16	459617.92	3137550.27	ExH Humboldt	3.28	7.17
J17	461424.08	3135494.74	El Gramal	2.59	17.45
J18	462504.39	3133098.35	Las Arenillas	2.45	7.48
LC63	477568.99	3090022.93	Las Pintas	1.10	17.25
LC67	481386.92	3077720.53	Est.la Cruz	1.00	19.33
LC69	482862.89	3076832.16	Corraleño de Juárez	0.90	9.95
M1	439072.87	3140319.39	Lázaro Cárdenas	1.54	45.55
M6	446816.48	3147660.38	Potrero del Llano	3.16	40.12
M19	459170.01	3132699.48	El Torreón	2.58	35.00
M22	457125.14	3136517.68	Los García	2.13	15.64
M23	456753.56	3131378.66	Loreto	3.04	8.44
M24	455774.99	3129609.00	Las Puentes	2.40	10.72
M25	455026.55	3129137.32	Gran Morelos	2.95	21.63
M26	455725.27	3126441.53	Fco. Portillo	0.98	34.51
M27	460583.74	3127421.44	Nuevo Loreto	1.53	33.20
M40	441138.51	3134093.76	Est. Consuelo	1.77	31.07
M41	444106.85	3136683.50	Nvo. San Lucas	1.43	5.70
M43	454078.43	3131765.39	Lomas Consuelo	1.55	24.34
R2	440062.50	3146119.62	Barranco Bco.	1.50	49.48
R3	441069.19	3147687.74	Santa Rita de Casia	1.99	24.17
R30	450288.06	3120979.28	San Valentín	1.06	4.81
R35	443050.72	3113372.38	La Garita	0.97	32.56
R38	444426.84	3126688.47	Orinda	1.98	43.00
S44	465566.72	3124281.89	Ampliación la Merced	1.80	55.13
S45	464772.06	3120960.79	Bella Vista	1.70	44.85
S47	466203.83	3117179.03	Orranteño	1.30	21.19
S52	466231.61	3106178.57	Fco. I. Mad. (Gato N.)	1.40	45.01
S54	469060.99	3106082.30	Gomeño	1.30	22.50
S56-3	470670.32	3101259.42	Saucillo P3	0.70	45.00
S57	469087.70	3101208.01	Col. Vicente Gro.	1.00	84.67
S58	472763.60	3096790.18	Fco.Mezquital	1.70	15.00
S59	477574.16	3092792.30	Pto.del Toro	1.10	64.40
S62	471969.48	3093579.49	Est.Conchos	1.70	13.40

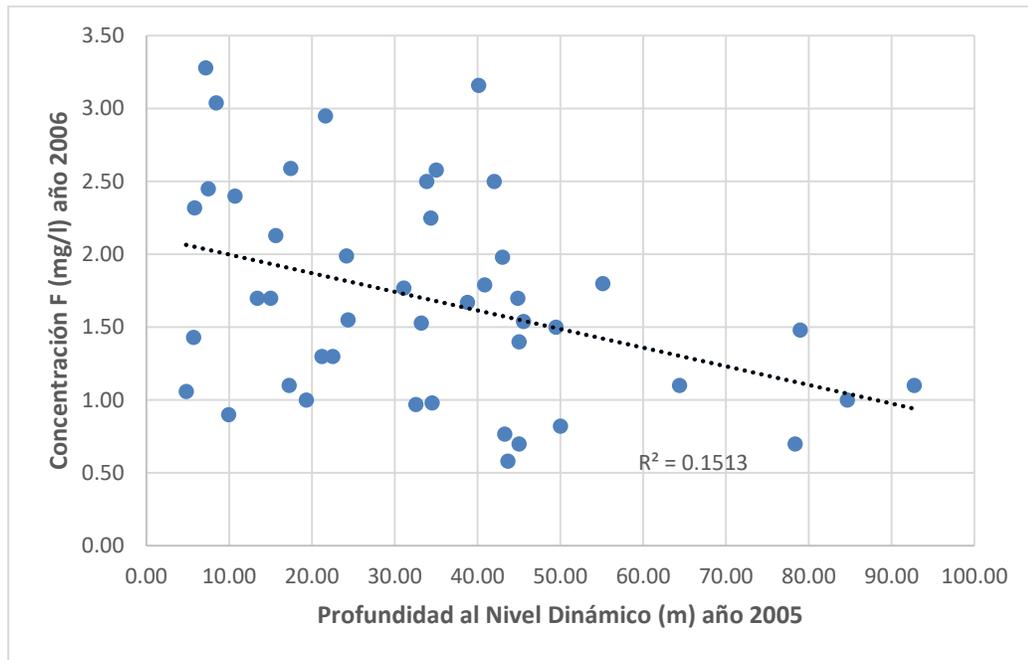


Figura 29 Concentración de fluoruros año 2006 Vs profundidad al nivel dinámico año 2005

5.8 Relación entre profundidad de pozos y concentración de fluoruro

La relación entre la concentración de iones F^- y la profundidad del pozo es importante. Apambire et al. (1997) en Babu et al. (2015) han demostrado que F^- en el agua subterránea aumenta con la profundidad, principalmente por prolongados tiempos de interacción de flujos regionales profundos con basamentos que contienen minerales fuente de fluoruro como por ejemplo los de composición ígnea félsica.

Huízar et al. (2014) y Carrillo et al. (2012) documentan que para un sistema de flujo en particular (local, intermedio o regional) la concentración de F^- se incrementa desde la zona de recarga alcanzando valores máximos en la zona de descarga. Asimismo, se ha definido una relación entre el contenido de F^- y el sistema de flujo de agua subterránea incrementándose en los sistemas regionales (con mayor tiempo de residencia y temperatura).

Con el fin de determinar la relación que existe entre la profundidad de los pozos y los niveles de concentración de fluoruro, se recopiló información de cada uno de los pozos con



datos tanto de concentraciones por cada fecha como de profundidad al nivel dinámico y profundidad total (Tabla 7).

Tabla 7 Pozos con datos de concentración de fluoruros, profundidad total y profundidad al nivel dinámico

Pozo	Coordenadas		Localidad	F ⁻	F ⁻	F ⁻	Profundidad	Profundidad	Profundidad Total Pozo	Zona
	X	Y		(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	Nivel Dinámico (m)	Nivel Dinámico (m)		
				2003	2006	2021	2021	2005		
D129	465078	3124726	La Merced	1.70	1.67	1.56	41.3	38.8	70	Recarga
D130	460936	3118092	Santa Fe	0.69	0.82	0.94		50.0	320	Transición
D136	463059	3106487	Armendáriz	2.89	2.50	2.61		33.8	200	Transición
J15	459416	3144253	Julimes	3.84	4.13	4.84	27.0	18.9	79	Descarga
J16	459618	3137550	Ex. Hacienda Humboldt	2.93	3.28	3.57		7.2	15	Descarga
M6	446816	3147660	Potrero del Llano	3.38	3.16	3.39		40.1	181	Transición
M19	459170	3132699	El Torreón	1.86	2.58	3.12		35.0	60	Recarga
M24	455775	3129609	Las Puentes	2.46	2.40	2.85		10.7	36	Descarga
M26	455725	3126442	Fco. Portillo	1.09	0.98	0.91		34.5	150	Transición
M27	460584	3127421	Nuevo Loreto	1.65	1.53	1.67	36.7	33.2	150	Transición
M40	441139	3134094	Est. Consuelo Barranco	1.95	1.77	1.85	33.1	31.1	150	Transición
R2	440062	3146120	Bco.	1.54	1.50	1.60	63.5	49.5	152	Recarga
S47	466204	3117179	Orranteño	1.63	1.30	1.31	15.2	21.2	90	Descarga
S54	469061	3106082	Gomeño	1.55	1.30	1.52	18.2	22.5	60	Descarga
S56-3	470670	3101259	Saucillo P3	0.00	0.70	0.75	50.0	45.0	185	Recarga
S56-8	470666	3099631	Saucillo P8	0.00	0.00	0.62	65.0	60.0	250	Recarga
S57	469088	3101208	Col. Vicente Gro.	1.02	1.00	0.89	80.0	84.7	180	Recarga
S98	468780	3100212	Est. Saucillo	1.40	2.40	1.32	85.0	88.6	137	Recarga

Se aplicó el diagrama de la Figura 30 el cual fue desarrollado por Freeze y Cherry, (1979) con el objetivo de definir las áreas (recarga, descarga o transición) donde se espera que se ubiquen los pozos de acuerdo a sus valores de profundidad total y del nivel estático. (en este caso se empleó el nivel dinámico).

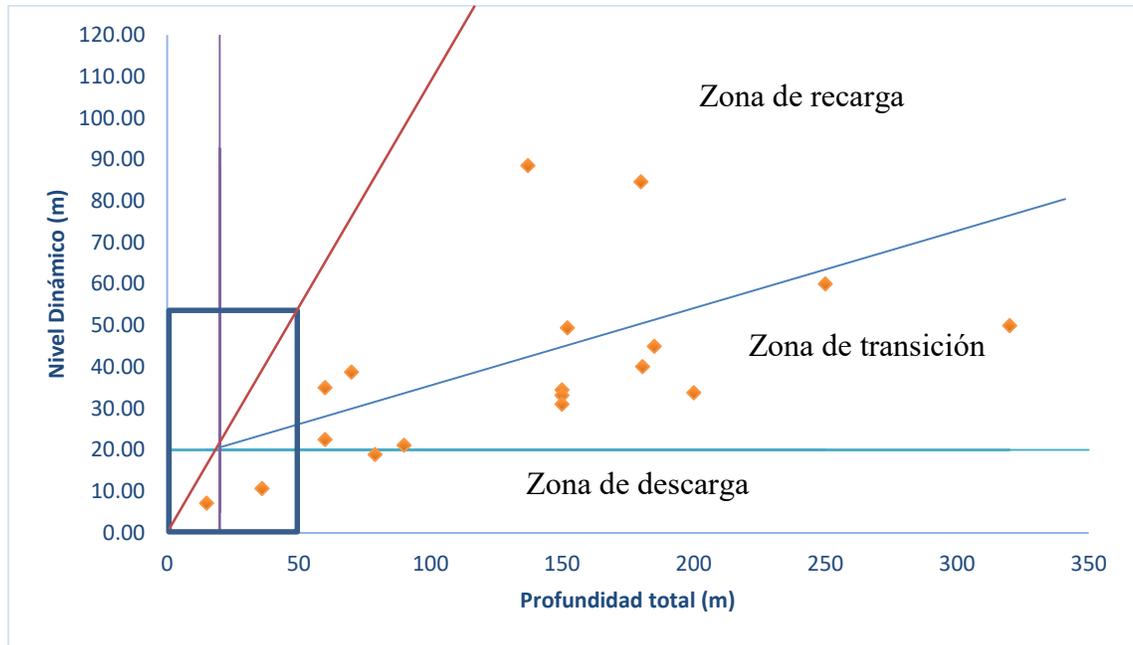


Figura 30 Profundidad de pozo vs profundidad a nivel de agua estático, modificado de Freeze & Cherry (1979).

Por último, se graficó la profundidad total de cada pozo frente a la concentración de fluoruro para cada una de los años (2021, 2006 y 2003). El análisis gráfico muestra una alta correlación entre las dos variables evaluadas, obteniendo coeficientes de correlación de Pearson (r) de 0.85 para el 2021, 0.75 para el 2006 y 0.85 para el 2003 (Figura 31, Figura 32 Figura 33)

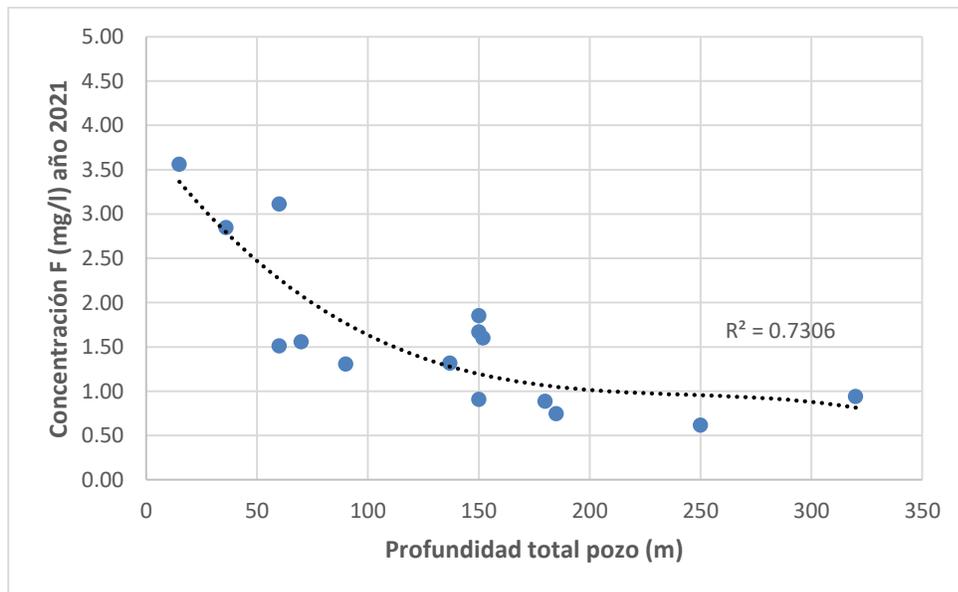


Figura 31 Profundidad total de pozos Vs Concentración de fluoruros año 2021

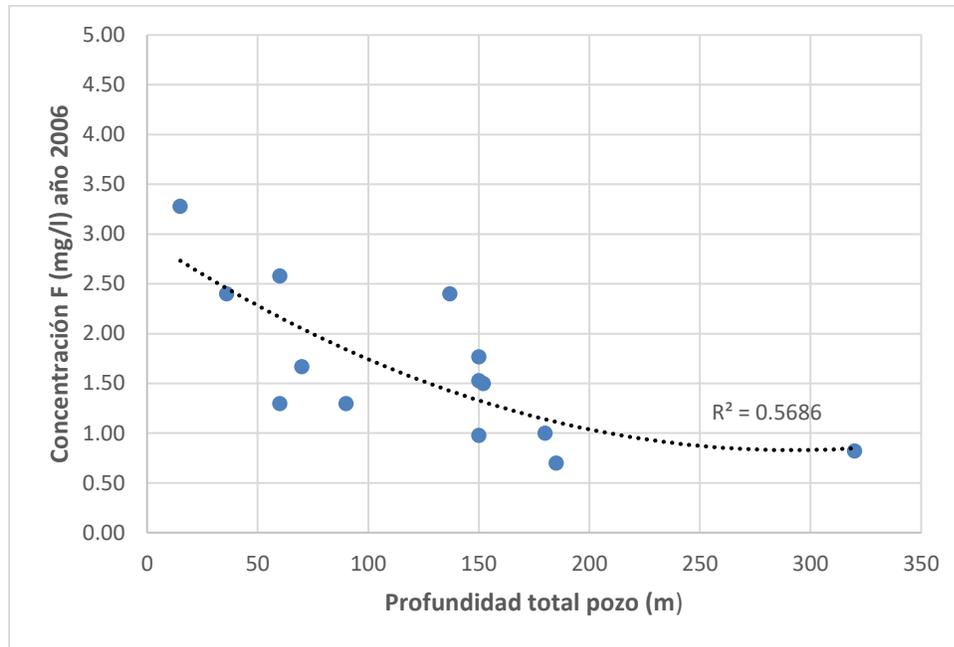


Figura 32 Profundidad total de pozos Vs Concentración de fluoruros año 2006

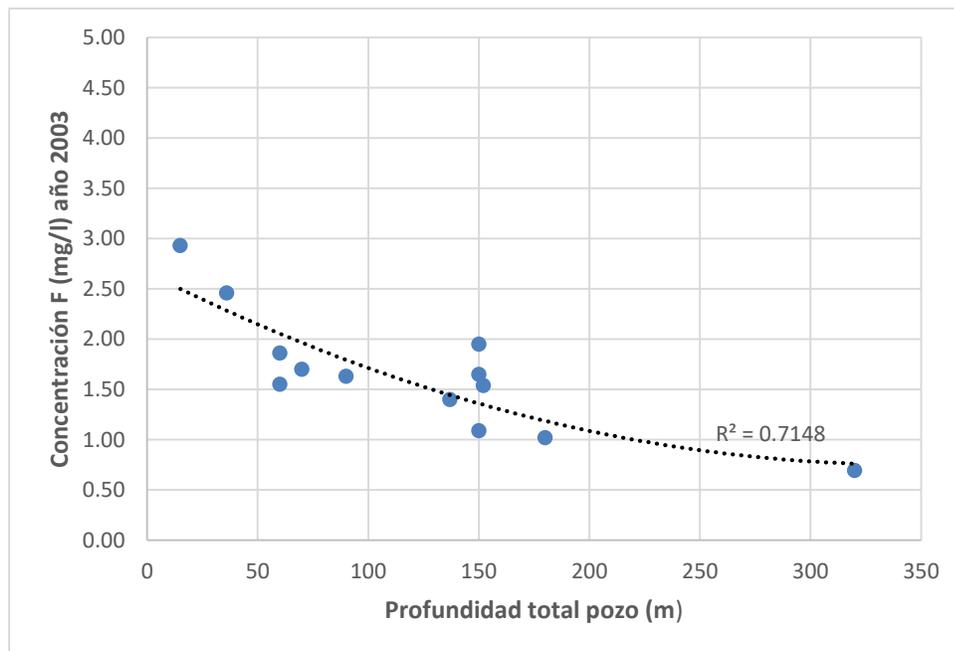


Figura 33 Profundidad total de pozos Vs Concentración de fluoruros año 2003

Con base en los resultados de las gráficas de dispersión de concentración de fluoruro contra la profundidad total de los pozos y la aplicación del diagrama de Freeze y Cherry, (1979), se observa una fuerte tendencia a la baja de las concentraciones de fluoruro a medida



que aumenta la profundidad de los pozos. Adicionalmente se constata lo establecido por Guo *et al.* (2007) quienes informaron que las altas concentraciones de F^- en el agua subterránea se encuentra en las áreas de descarga, especialmente en los lugares donde el acuífero se encuentra en un nivel poco profundo. Esto debido a que en zonas de descarga se ha tenido mayor tiempo de interacción agua-roca y también al tener niveles someros, los flujos verticales descendentes desde la zona vadosa hasta la zona saturada se completan en menor tiempo; cabe expresar que estos flujos contienen altas concentraciones de fluoruro debido a los procesos de intemperismo químico a través del hidrolisis y la posterior movilización en forma iónica por medio del mecanismo de dispersión hidrodinámica.

5.9 Análisis de tendencias en el tiempo de la concentración de fluoruros

En esta sección se realiza el análisis de las tres bases de datos sobre fluoruros (2003, 2006 y 2021) para identificar el comportamiento de este parámetro con respecto al tiempo en cada pozo estudiado.

El Anexo 2 contiene las gráficas de cada localidad en donde se comparan las concentraciones de F^- correspondientes a cada año. En la Tabla 8 se muestra la pendiente de la línea de tendencia resultante de la aplicación del análisis de regresión lineal a los datos de cada pozo. Tomando en cuenta los valores de dichas pendientes se estableció un criterio para clasificar los pozos en 4 categorías, dependiendo de la condición que muestran las concentraciones de fluoruros vs el tiempo, es decir: al alza (alta, equivalente a una pendiente positiva entre 0.04 y 0.11), incremento muy leve con el tiempo (media alta, pendiente entre 0.01 y 0.04), sin cambio (igual, pendiente entre -0.01 y 0.01), disminución notable (baja, con pendiente negativa entre -0.06 y -0.01). Los resultados de dicha clasificación se muestran en la Figura 28, representando con diferentes colores la evolución en el tiempo observada en cada pozo estudiado.



Tabla 8 Resultado de pendiente de línea de tendencia para cada pozo del acuífero Meoqui-Delicias

Muestra	Municipio	Localidad	Pendiente F ²
D126	Delicias	Fco. I. Madero	-0,024
D136	Delicias	Armendáriz	-0,016
R3	Rosales	Santa Rita de Casia	-0,016
R7	Rosales	Salón de Actos	-0,024
R35	Rosales	La Garita	-0,055
R38	Rosales	Orinda	-0,018
S45	Saucillo	Bella Vista	-0,021
S47	Saucillo	Orranteño	-0,012
S52	Saucillo	Fco. I. Mad. (Gato N.)	-0,017
S58	Saucillo	Fco. Mezquital	-0,011
S59	Saucillo	Pto.del Toro	-0,025
S60	Saucillo	Parritas	-0,011
S62	Saucillo	Est. Conchos	-0,011
S98	Saucillo	Est. Saucillo	-0,026
D127	Delicias	Col. Morelos	-0,004
D129	Delicias	La Merced	-0,006
D134	Delicias	Hidalgo	-0,003
D131	Delicias	Vicente Guerrero	0,004
D138	Delicias	Col. Nicolás Bravo	0,003
M1	Meoqui	Lázaro Cárdenas	-0,004
M26	Meoqui	Fco. Portillo	-0,008
M27	Meoqui	Nuevo Loreto	-0,001
M39	Meoqui	Buenavista	-0,007
M40	Meoqui	Est. Consuelo	-0,002
M40.2	Meoqui	Est. Consuelo	-0,002
M6	Meoqui	Potrero del Llano	0,005
M25	Meoqui	Gran Morelos	0,005
M41	Meoqui	Nvo. San Lucas	0,005
S46	Saucillo	Santa Rosa	-0,004
S50	Saucillo	Altamirano	-0,005
S57	Saucillo	Col. Vicente Gro.	-0,007
S44	Saucillo	Ampliación La Merced	0,009
S54	Saucillo	Gomeño	0,003
S56-3	Saucillo	Saucillo P3	0,003
LC67	La Cruz	Est. La Cruz	-0,004
LC63	La Cruz	Las Pintas	0,007
LC64	La Cruz	Panamericana	0,009
R2	Rosales	Barranco Bco.	0,005
D130	Delicias	Santa Fe	0,011
D133	Delicias	Las Virginias	0,036
D137	Delicias	Ejido El Diez	0,023
J12	Julimes	Labor Nueva	0,022
J14	Julimes	El Carrizo	0,035
J16	Julimes	ExH Humboldt	0,029
LC69	La Cruz	Corraleño de Juárez	0,027
M5	Meoqui	Col. 10 de Mayo	0,026
M21	Meoqui	Gpe. Victoria	0,028
M22.2	Meoqui	Los García	0,018
M23	Meoqui	Loreto	0,012
M24	Meoqui	Las Puentes	0,024
M42	Meoqui	Progreso	0,015
M43	Meoqui	Lomas Consuelo	0,027
D139	Delicias	Col. Campesina	0,068
J9	Julimes	San José	0,061
J10	Julimes	La Regina	0,108
J11	Julimes	Esperanza	0,088
J13	Julimes	La Boquilla	0,055



J15	Julimes	Julimes	0,050
J17	Julimes	El Gramal	0,051
J18	Julimes	Las Arenillas	0,044
M19	Meoqui	El Torreón	0,059
M22	Meoqui	Los García	0,045
R30	Rosales	San Valentín	0,053

Los resultados de dicha clasificación se comentan a continuación.

a) Alta. El 15.9% de las muestras consideradas para este estudio se encuentran en esta condición (círculos rojos en el mapa de la Figura 34). Al comparar los resultados obtenidos en las 3 campañas de muestreo se tiene que la pendiente es positiva (ente 0.04 y 0.11), es decir que la concentración de fluoruros en el tiempo va aumentando; esto sucede principalmente en la parte norte del acuífero sobre el valle aluvial del río Conchos, aguas abajo de su confluencia con el río San Pedro, el cual transcurre en sentido sur-norte y es adyacente a las laderas oeste de las Sierras Humboldt y El Carrizo. La mayoría de las localidades observadas en esta categoría pertenecen al municipio de Julimes como es el caso de San José (J9) y La Regina (J10), otras dos localidades son de Meoqui: (El Torreón (M19) y Los García (M22) y una del municipio de Rosales correspondiente a San Valentín (R30).

b) Media alta. El 23.8% de las muestras consideradas se encuentran en esta categoría (círculos rosa pálido en la Figura 34), y se trata de las comunidades en donde el comportamiento de los fluoruros en el tiempo presenta un leve incremento (pendiente positiva entre 0.01 y 0.04), por esto se considera que los valores están a la alza pero no de una manera tan notable como los de la categoría anterior. Se observa que los pozos que integran esta categoría presentan una mayor dispersión en el acuífero ya que abarca localidades ubicadas hacia el norte, como es el caso de Loreto (M23) y Las Puentes (M24) del municipio de Meoqui, y Labor Nueva (J12) y El Carrizo (J14) del municipio de Julimes. Hacia la parte central del acuífero se registran localidades como Santa Fe (D130) y Las Virginias (D133) del municipio de Delicias, y hacia el sector sur se observa la localidad Corraleño de Juárez (LC69) del municipio de La Cruz.



c) Igual. La mayoría de los pozos (38.1%) se encuentra en esta clasificación, cuyo comportamiento se refiere a las comunidades que han tenido una tendencia estable con el tiempo, (señalados con círculos azules), presenta un rango de pendiente entre -0.01 y 0.01. Al igual que la categoría anterior, también presenta una alta dispersión debido a que abarca localidades ubicadas hacia el costado noroeste del acuífero en el pie de monte de la Sierra Alta, como es el caso de Buenavista (M39) y Estación Consuelo (M40) del municipio de Meoqui. Hacia la parte central se registran localidades como Col. Morelos (D127) y Vicente Guerrero (D131) del municipio de Delicias y hacia el sector sur se observan localidades pertenecientes a los municipios de Saucillo y La Cruz como es el caso de Altamirano (S50) y Las Pintas (LC63) respectivamente.

e) Baja. El 22.2% de los pozos censados para este estudio mostraron una tendencia a la baja, es decir que ha disminuido la cantidad de fluoruros presentes en el agua subterránea (círculos verdes mostrados en la Figura 34), la pendiente es negativa y oscila entre -0.06 y -0.01. Esta condición se presenta principalmente hacia el sur del acuífero, con ocho localidades en el municipio de Saucillo como es el caso de Parritas (S60) y Estación Conchos (S62). En la parte central se observan dos localidades en esta categoría pertenecientes al municipio de Delicias como es el caso de Fco. I. Madero (D126) y Armendáriz (D136) y cuatro localidades ubicadas en el pie de monte de la Sierra Alta al noroeste del acuífero, las cuales corresponden a Santa Rita de Casia (R3), Salón de Actos (R7), La Garita (R35) y Orinda (R38) del municipio de Rosales.

En resumen, del análisis anterior se infiere que aproximadamente el 40% de casos analizados se encuentran al alza, ya sea con pendiente alta o media-alta con relación al tiempo. La mayoría de los pozos con tendencia alcista se encuentran ubicados en zona de descarga y transición, es decir, sobre el valle aluvial del río Conchos aguas debajo de su confluencia con el río San Pedro, al costado noreste del acuífero. Por otra parte, con una cantidad de pozos similar en porcentaje (38%), se observan pozos con un comportamiento estable en la concentración de fluoruros con respecto al tiempo, es decir, sin cambios



significativos en su concentración. Dichos pozos presentan una alta dispersión por todo el acuífero abarcando localidades desde el norte hasta el sur del mismo; sin embargo, se concentran principalmente en la parte central sobre las localidades del municipio de Delicias. Por último, con un porcentaje mucho menor (22%), se tienen los pozos que han presentado descensos en la concentración de fluoruros a través del tiempo. La mayoría de las fuentes que integran esta categoría están ubicadas en las cercanías de las áreas de recarga natural, específicamente sobre el pie de monte de la Sierra Alta localizada al noroeste del acuífero, así como en la zona sur del mismo.

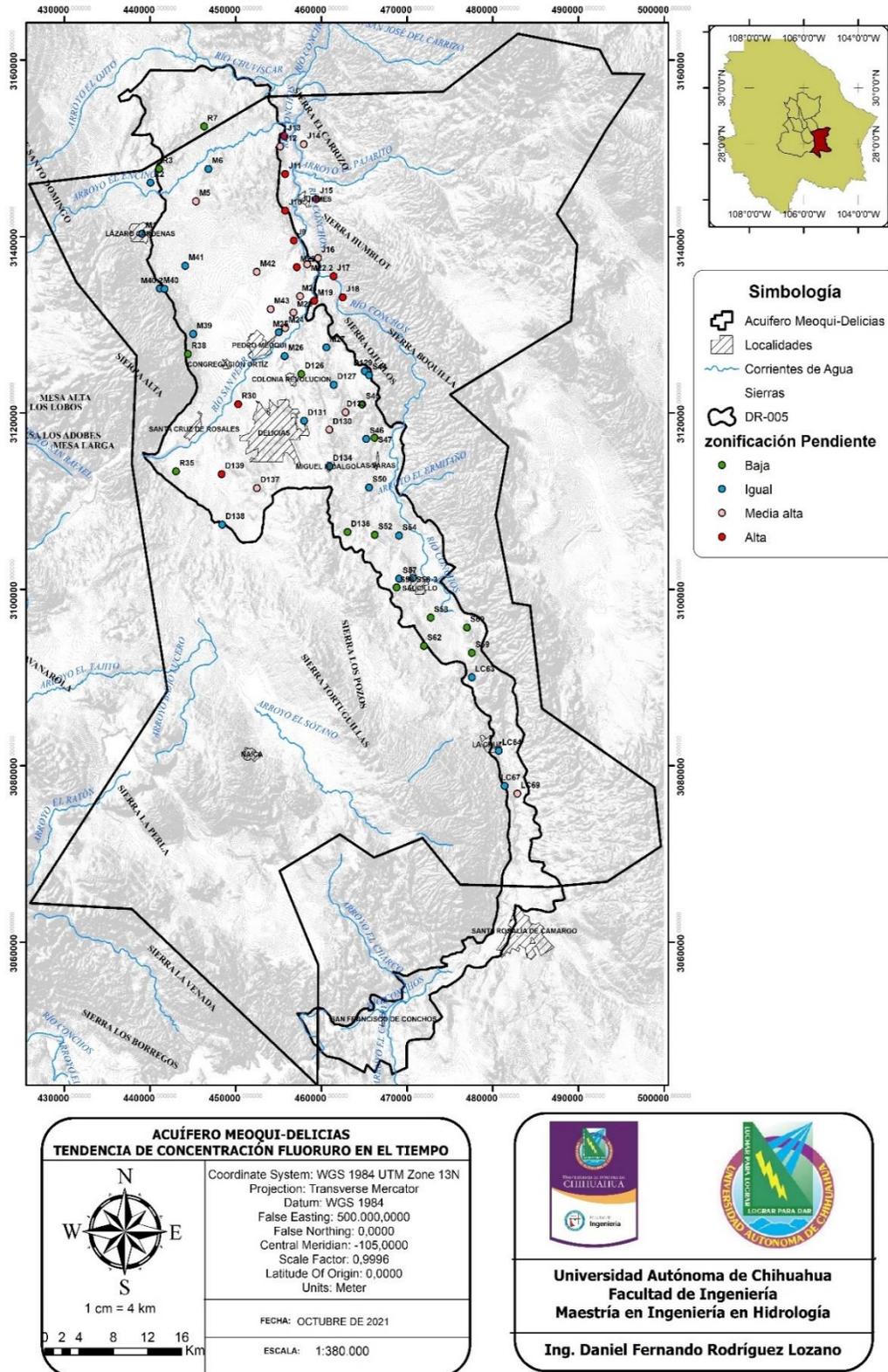


Figura 34 Tendencia de concentración de fluoruros en acuífero Meoqui-Delicias, año 2020



5.10 Consideraciones estadísticas

Respecto al análisis estadístico, que es de gran apoyo para el análisis del comportamiento de contaminantes en el agua subterránea, se obtuvo el gráfico de frecuencias para cada año en que se registró el contenido de fluoruros en el agua potable del acuífero de interés (Figura 35, Figura 36 y Figura 37). Para el año 2003 la mayor frecuencia de datos se encuentra en el rango de concentración de 1.5-2.5 mg/L, en donde 26 de los 60 pozos considerados en ese año correspondiente a 43.3% de las muestras se encuentran dentro de este rango. Es seguido por el rango de 0.5-1.5 mg/L con 16 registros. Se observa que en el máximo rango de concentración, el cual oscila entre 6.5-7.5 mg/L, se reportan sólo dos muestras correspondientes a la localidad Salón de Actos (R7) del municipio de Rosales y Col. San José (J9) del municipio de Julimes. En resumen, se observa que el 73.3% de los pozos correspondientes a 44 de 60 muestras analizadas contienen fluoruros por encima de lo establecido por la Modificación a la NOM 127 (Figura 35).

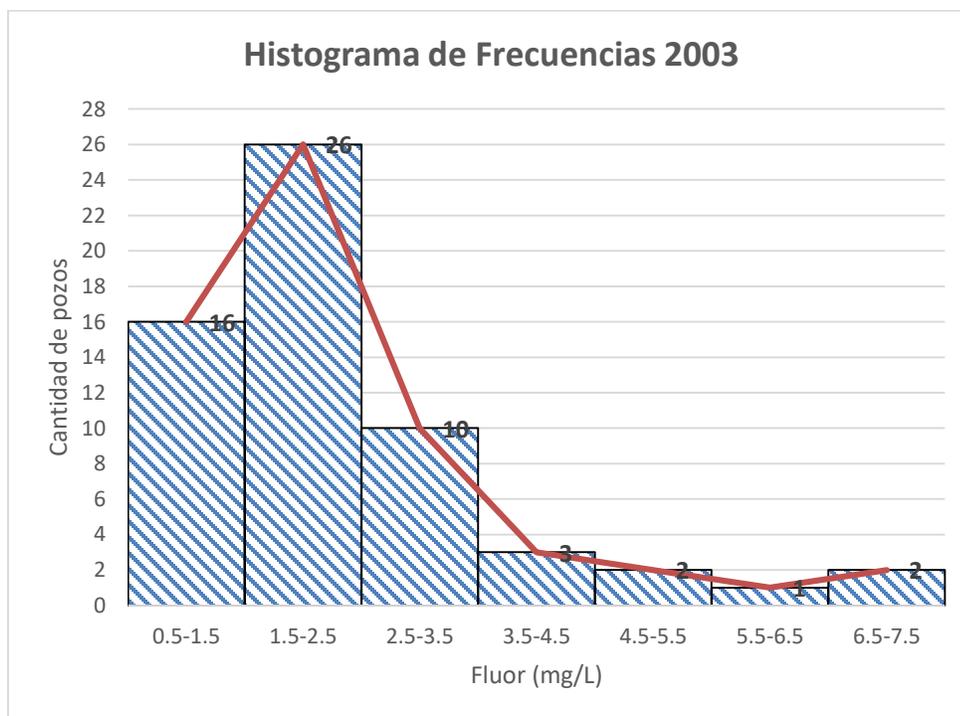


Figura 35 Gráfica de frecuencia de datos, concentración de F año 2003



El registro de datos del 2006 presenta una ligera diferencia con respecto al año 2003, ya que el rango de datos que se encuentra entre 0.5 y 1.5 mg/L de F^- presenta la mayor frecuencia. En esta categoría se registraron 24 de los 63 pozos del estudio, es decir, el 38.1% de las localidades investigadas. Se observa una disminución de pozos ubicados en la categoría de 1.5 a 2.5 mg/L, en la que están registradas 23 localidades (36.5% del total), una de las cuales se ubica en el rango de 8.5-9.5 mg/L (Col. 10 de Mayo (M5) del municipio de Meoqui). En resumen, el 61.9% de las muestras se encuentran por encima de 1.5 mg/L de F^- permitidos para agua potable por la NOM 127 lo que corresponde a 39 de los 63 pozos analizados (Figura 36).

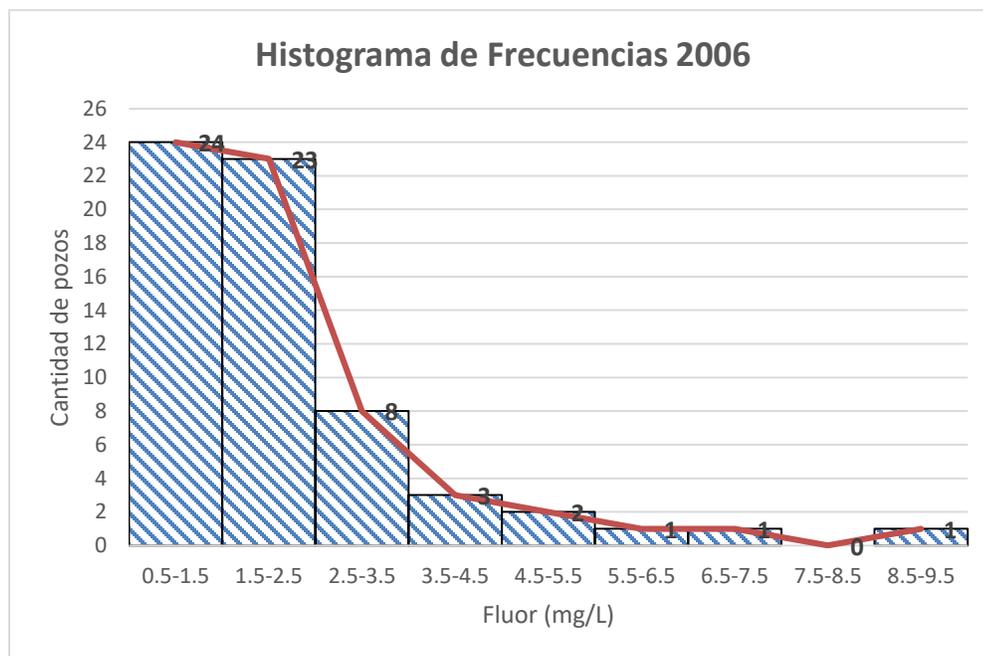


Figura 36 Gráfica de frecuencia de datos, concentración de F^- año 2006

Los resultados de flúor obtenidos en la campaña de 2021 presentan una disminución de frecuencia en los dos primeros rangos de concentración, ya que para la primera categoría (0.5-1.5 mg/L) se tienen 19 muestras, en comparación con 24 que presentaba en el 2006. Por otra parte, en la categoría de 1.5-2.5 mg/L, la cual es la que tiene la mayor frecuencia de datos en el año 2021, se reportan 21 muestras frente a 23 muestras obtenidas en el año 2006.



El rango que presentó el mayor aumento en el número de muestras es el de 2.5-3.5 mg/L, con una frecuencia de 13 datos frente a 8 que presentaba en el 2006. Tan solo una muestra alcanza el máximo rango de 7.5-8.5 mg/L, misma que corresponde a la colonia San José (J9) del municipio de Julimes. En resumen, el 70.3% de las muestras, correspondientes a 45 de las 64 muestras analizadas, sobrepasan lo máximo permitido por la Modificación a la NOM 127 (Figura 37).

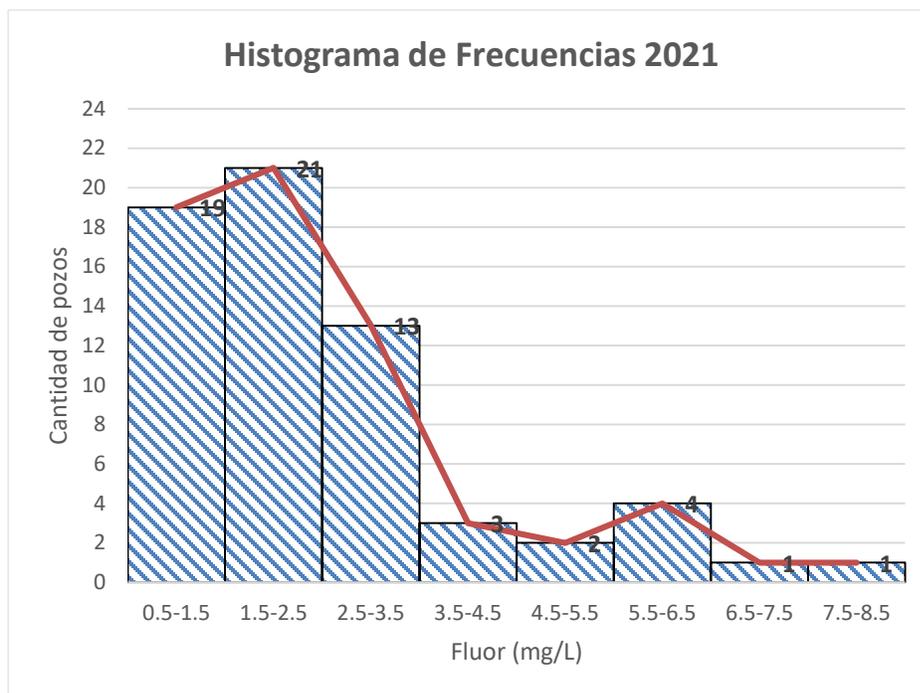


Figura 37 Gráfica de frecuencia de datos, concentración de F⁻ año 2021

Después de analizar las 3 gráficas de frecuencias se observa que la cantidad de localidades en el rango de 1.5 a 2.5 mg/L contiene la mayor frecuencia desde el 2003 al 2021, a pesar que en el 2006 fue la segunda categoría debido a que la mayor correspondió al rango entre 0.5-1.5 mg/L. Los valores elevados (mayor a 1.5 mg/L de F⁻ permitido por la NOM 127) presentaron una disminución en el 2006 con respecto al 2003; sin embargo, en el 2021 se observó un aumento frente a la cantidad de muestras del 2006. Los valores para cada año que están por encima de la NOM-127 corresponden a 44, 39 y 45 muestras respectivamente.



Se realizó el cálculo de dispersión (rango, varianza y desviación estándar) de los datos de concentración de flúor para cada localidad. Estos parámetros tienen como objetivo analizar el grado de separación de los valores con respecto a la media aritmética (promedio) o la mediana. Así mismo se obtuvo la significancia estadística, la cual sirve para determinar si el valor obtenido muestra que las variables “X”- “Y” están relacionadas o sólo presentan relación como consecuencia del azar. Dichos cálculos se realizaron con los datos de concentración registrados para cada aprovechamiento de agua, mismos que se presentan en el Anexo 4. Debido a que sólo se cuenta con tres registros de datos (tres fechas), se encontró que éstos no son suficientes para realizar un análisis estadísticamente representativo de persistencia, lo que indica que es necesario contar con una serie de tiempo de datos con una mayor cantidad de registros para que se pueda evaluar la significancia en la correlación de los mismos.



Capítulo 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A continuación, se presentan las **conclusiones** derivadas del análisis de datos de campo y de concentración de F⁻ en alrededor de 60 pozos de agua potable en el acuífero Meoqui-Delicias en el Estado de Chihuahua, durante los años 2003, 2006 y 2021.

Sobre la evolución de concentración en los mapas de isolíneas se concluye que:

- La mancha del contaminante (alta concentración de fluoruro) persiste y ha estado en alza a través del tiempo en la porción noreste de la zona de estudio, específicamente sobre el valle aluvial del río Conchos, aguas abajo de su confluencia con el río San Pedro donde están la mayoría de las localidades del municipio de Julimes y algunas del municipio de Meoqui.
- En la zona central del acuífero también se observa un leve aumento en la concentración promedio de F⁻ y en el número de pozos que sobrepasan el límite máximo permisible. Se destaca que en el costado oeste de Delicias ha aumentado la mancha de concentración de fluoruro con respecto a los registros históricos.
- En la parte sur del acuífero no se observan cambios considerables en las concentraciones con respecto a los años anteriores en que se tiene registro (2003 y 2006); se destaca que ningún pozo del municipio de La Cruz sobrepasa el límite máximo permisible para agua de consumo humano establecido por la Modificación a la NOM-127 (1.5 mg/L de F⁻).

Según las configuraciones piezométricas elaboradas en esta investigación es posible observar lo siguiente:

- La elevación del nivel dinámico y por ende la dirección regional de flujo va en sentido oeste-noreste, es decir, desde la Sierra Alta hacia el valle aluvial del río Conchos aguas abajo de su confluencia con el río San Pedro, lo que



indica que dicha sierra constituye una de las principales zonas de recarga por precipitación pluvial del acuífero.

- En la parte central, en zonas aledañas al municipio de Delicias, la elevación del nivel dinámico ha sido distorsionada como consecuencia del intenso bombeo generado para riego superficial parcelario, lo que ha desarrollado conos de abatimiento puntuales que han provocado flujos radiales hacia estos aprovechamientos de agua subterránea.
- La tendencia regional de flujo es de sur a noreste con importantes aportes de volúmenes de recarga desde el oeste, lo cual se obtuvo por medio de la configuración de elevación de los niveles dinámicos.

Con respecto a la evolución de los niveles dinámicos:

- El sector noroeste se caracteriza por presentar los mayores abatimientos, principalmente en la Colonia Barranco Blanco (R2) del municipio de Rosales, con un descenso de 14 m durante todo el periodo considerado (2005-2021), lo que representa un abatimiento promedio de 0.87 m por año.
- Hacia la parte central del acuífero no se observan abatimientos de gran magnitud debido a que la recarga más importante se genera por la infiltración de excedentes del riego superficial a nivel parcelario, así como a través de los canales de conducción y distribución sin revestir por lo que se ha mantenido constante registrando abatimientos máximos de 4 m durante todo el periodo de tiempo considerado.
- No existe correlación entre el abatimiento del nivel dinámico y la concentración de fluoruro, ya que aunque hipotéticamente se esperaba que los pozos con mayor abatimiento tuvieran las concentraciones más altas de fluoruro, este comportamiento no se observa.
- Se infiere que en los pozos de uso público-urbano localizados hacia el sector noreste, mismos que no presentan abatimientos considerables, las altas



concentraciones de fluoruro están más relacionado con la geología superficial, es decir, por la presencia de depósitos aluviales permeables y con contenido de fragmentos líticos volcánicos erosionados de las sierras circundantes que lixivian F^- de la estructura mineralógica de las rocas, por ejemplo de fluorita, biotita y anfíboles asociados a rocas ígneas félsicas como las riolitas; dicho fluoruro se infiltra a través de las capas del aluvión por dispersión hidrodinámica a través del agua de recarga natural y también con volúmenes de agua de recarga inducida proveniente de los retornos de riego que atraviesan capas del aluvión en el valle.

Con respecto a las profundidades de los pozos frente a la concentración de fluoruros:

- Se observa una fuerte tendencia a la baja de las concentraciones de fluoruro a medida que aumenta la profundidad de los pozos, adicionalmente se constata lo establecido por Guo et al. (2007) quienes informaron que las altas concentraciones de F^- en el agua subterránea se encuentra en las áreas de descarga, especialmente en los lugares donde el acuífero se encuentra en un nivel poco profundo
- Las isolíneas de concentración de sólidos disueltos totales (SDT) indican que las mayores concentraciones se localizan tanto al noreste del acuífero como al costado centro-oriental del acuífero, lo que coincide con la dirección de flujo regional (oeste-noreste) y también con flujos locales generados por conos de abatimiento en la parte central del acuífero. Esto corrobora la relación directa que existe entre la distancia recorrida del agua de recarga a través de medios granulares y/o fracturados y la concentración de SDT, como consecuencia de la incorporación de iones disueltos debido a las interacciones que generan procesos de disolución de minerales.
- Para el año 2021 la cantidad de pozos que superan el límite máximo permisible de SDT disminuyó con respecto al 2006, debido probablemente a



un proceso de dilución generado por la ocurrencia de la mezcla de los retornos de riego agrícola, la recarga del flujo subterráneo procedente de la Sierra Alta en la porción occidental, así como las aportaciones superficiales al riego con agua proveniente de las presas Francisco I. Madero y La Boquilla.

- Se observa una correlación entre la zonificación espacial de las isolíneas de concentración de fluoruro y los resultados de la metodología DRASTIC aplicada por Barrera (2008) y Rascón (2011) con el fin de estimar la vulnerabilidad a la contaminación intrínseca del acuífero. Es posible observar que las altas concentraciones de fluoruro se encuentran en su mayoría en la zona de descarga, es decir, siguiendo la trayectoria del Río Conchos que atraviesa el valle aluvial, lo que coincide con una de las áreas clasificadas como de mayor vulnerabilidad (media-alta) en el acuífero. Dicha zona presenta características que facilita el flujo vertical de contaminantes hacia el acuífero incluyendo el fluoruro que es lixiviado y movilizado a través del agua de infiltración. Entre dichas características se identifica un nivel freático somero, con profundidades entre 10 y 20 m, la presencia de mayor volumen de recarga al acuífero por la influencia de retornos de riego que coinciden con el DR-005 y la litología, ya que dicha zona está albergada en los depósitos de aluvión de río de granulometría alta constituida por guijarros y gravas, con presencia de fragmentos líticos volcánicos que puede contener minerales como fluorita, biotita, apatita, entre otros minerales de mena de flúor.
- De acuerdo al análisis de tendencia de la concentración de fluoruro con respecto al tiempo en cada uno de los pozos estudiados, se infiere que en aproximadamente el 40% de casos analizados dicha concentración se ha incrementado con relación al tiempo. La mayoría de los pozos con tendencia



alcista se encuentran ubicados en zona de descarga, es decir, sobre el valle aluvial del río Conchos aguas debajo de su confluencia con el río San Pedro, al costado noreste del acuífero. Entre las posibles razones que pueden justificar dicho incremento se encuentra, la granulometría, la composición mineralógica de los fragmentos líticos, el nivel freático somero y el fenómeno de termalismo.

- Una cantidad de pozos similar en porcentaje (38%) no presentan cambios significativos en su concentración con el paso del tiempo. Dichos pozos presentan una alta dispersión por todo el acuífero, pero se concentran principalmente en la parte central sobre las localidades del municipio de Delicias.
- El 22% de los pozos presentaron descensos en la concentración de fluoruros a través del tiempo. La mayoría de las fuentes que integran esta categoría están ubicadas en las cercanías de las áreas de recarga natural, específicamente sobre el piedemonte de la Sierra Alta localizada al noroeste del acuífero. Se atribuye dicho comportamiento a un efecto de dilución causado por los volúmenes de recarga natural que se tienen en esta zona.
- La mayoría de los resultados obtenidos en las diferentes campañas de muestreo se encuentran en el rango de 1.5 a 2.5 mg/L de F⁻.
- El porcentaje de pozos con concentración de fluoruro por encima de la norma de agua potable varió de 72% a 65% y a 75% para los respectivos períodos estudiados (2003, 2006 y 2021).

Con base en las conclusiones antes expuestas se generan las siguientes **recomendaciones** para futuras investigaciones:

- Establecer una red de monitoreo tanto de calidad de agua subterránea como de piezometría, con el fin de realizar periódicamente campañas de medición de niveles y de muestreo que permitan consolidar una base de datos más



completa con respecto al comportamiento en el tiempo de los niveles estáticos y la concentración de elementos como fluoruro y otros elementos considerados como contaminantes del agua subterránea, dada la gran importancia de este acuífero ubicado en el estado de Chihuahua, tanto desde el punto de vista hidrogeológico como ambiental y socioeconómico.

- Efectuar un análisis fisicoquímico a los sedimentos y depósitos aluviales con el fin de monitorear concentraciones tanto de fluoruro como de otros elementos contaminantes que se encuentran en la superficie o en estratos someros del suelo y que pueden llegar por infiltración al agua subterránea.
- Efectuar un análisis petrográfico a dichos depósitos aluviales, es decir, tomar muestras en diferentes sectores del valle para realizar secciones delgadas y poder identificar minerales mena de flúor como la fluorita principalmente.
- Solicitar el muestreo de suelo de futuras perforaciones que se realicen para la construcción de pozos de agua profundos, con el fin de consolidar una columna litológica del subsuelo a través de actividades de logeo geológico, con el fin de identificar minerales mena de flúor y enviar muestras al laboratorio a diferentes profundidades para realizar análisis fisicoquímico con el fin de localizar estratos con mayor concentración de fluoruro y otros elementos considerados como nocivos para la salud humana.



Bibliografía Consultada

- Alarcón-Herrera, M.T., Martín-Domínguez, A., & Martín-Domínguez, I. (2002). Concentración de Flúor en el Agua Potable: Su Relación con la Fluorosis Dental. XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Cancún, México: Centro de Investigación en Materiales Avanzados
- Alarcón-Herrera, M. T., Bundschuh, J., Nath, B., Nicolli, H. B., Gutierrez, M., Reyes-Gomez, V. M., Nuñez, D., Martín-Domínguez, I. R., & Sracek, O. (2013). Co-occurrence of arsenic and fluoride in groundwater of semi-arid regions in Latin America: Genesis, mobility and remediation. *Journal of Hazardous Materials*, 262, 960–969. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.08.005>
- Amini, M., Mueller, K., Abbaspour, K. C., Rosenberg, T., Afyuni, M., Møller, K. N., Sarr, M., & Johnson, C. A. (2008). Statistical modeling of global geogenic fluoride contamination in groundwaters. *Environmental Science and Technology*, 42(10), 3662–3668. <https://doi.org/10.1021/es071958>
- Anglés M. (2006). Los cursos de agua compartida entre México y los Estados Unidos de América y la variable medioambiental. Una aproximación. *Anuario Mexicano de Derecho Internacional* 6, 89-166
- Apambire, W. B., Boyle, D. R., and Michel, F. A. (1997). Geochemistry, genesis and health implications of fluoriferous ground waters in the upper regions of Ghana. *Environmental Geology*, vol. 33, no.1, pp. 13-24.
- Armienta, M. A., & Segovia, N. (2008). Arsenic and fluoride in the groundwater of Mexico. *Environmental Geochemistry and Health*, 30(4), 345–353. <https://doi.org/10.1007/s10653-008-9167-8>
- Ayoob, S., & Gupta, A. K. (2006). Fluoride in drinking water: A review on the status and stress effects. In *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* (Vol. 36, Issue 6). <https://doi.org/10.1080/10643380600678112>
- Babu, S., Kumar, S., Roychowdhury, T., Vidyadharan, V., Roychowdhury., Juin Samanta, J., Bhowmick, S. (2015). OCCURRENCE AND IMPACTS OF FLUORIDE IN DRINKING WATER—A REVIEW. VOL V, July 2015 : INDIAN GROUNDWATER
- Banks, D., Reimann, C., Royset, O., Skarphagen, H. (1995). Natural concentrations of major and trace elements in some Norwegian bedrock groundwaters. *Applied Geochemistry*, vol. 10, pp. 1-16, no.1, 1995.
- Barrera, Y. (2008). Estudio hidrogeoquímico y de vulnerabilidad a la contaminación del acuífero Mecoqui-Delicias del Estado de Chihuahua. Tesis de maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Chihuahua.
- Bencomo, M. (2013). Comportamiento del Arsénico mediante un modelo hidrogeoquímico en el acuífero Mecoqui-Delicias. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Chihuahua.



- Brindha, K., & Elango, L. (2011). Fluoride in groundwater: Causes, implications and mitigation measures. *Fluoride: Properties, Applications and Environmental Management*, January 2011, 113–136.
- Brudevold, F., & Soremark, R. (1967). In "Structural and Chemical Organisation of Teeth", Vol. 2, edited by A. G. W. Miles (Academic Press, New York and London, 1967), 247.
- Calderón, M.L. (2006). Alternativas de depuración de agua para consumo humano en el estado de Chihuahua. México. IV Foro Mundial del Agua. 31 p.
- Carrillo-Rivera, J.J., A. Cardona, and W.M. Edmunds, (2002), Use of abstraction regime and knowledge of hydrogeological conditions to control high-fluoride concentration in abstracted groundwater: San Luis Potosí basin, Mexico. *Journal of Hydrology*, volume 261, issue 1-4, pages 24-47, doi: 10.1016/S0022-1694(01)00566-2
- Comisión Nacional del Agua (CNA). (2006). La gestión del agua en México. Avances y retos. México. CONAGUA. 249 p.
- 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 (CONAGUA). (2020). Actualización de la disponibilidad media anual en el acuífero Meoqui-Delicias (0831), estado de Chihuahua. 0831. https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/chihuahua/DR_0831.pdf
- Chávez, R. (2006). Disponibilidad de agua subterránea en México. CONAGUA. IV Foro Mundial del Agua. 13 p.
- Chávez, S. M. J. (2010). Evaluación del riesgo por la presencia de contaminantes en agua destinada al uso y consumo humano del acuífero del Valle del Guadiana. Tesis de Maestría. Instituto Politécnico Nacional.
- Diario Oficial de la Federación. (2020). ACUERDO por el que se actualiza la disponibilidad media anual de agua subterránea de los 653 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, mismos que forman parte de las regiones hidrológico-administrativas que se indican
- Díaz-Barriga, F., Leyva, R., Quistian, J., Loyola-Rodríguez, J.B., Pozos, A., Grimaldo, M. (1997). Endemic fluorosis in San Luis Potosi, Mexico. *Fluoride* 30:219–222
- Edmunds, M. and Smedley, P. (2005). Fluoride in natural waters – occurrence, controls and health aspects. In: Selinus O, Alloway B, Centeno JA, Finkelman RB, Fuge R, Lindh U, Smedley P (eds) *Essentials of Medical Geology*. Elsevier, Amsterdam, pp 301–329
- Edmunds, M. and Smedley, P. (2012). Fluoride in natural waters. *Essentials of medical geology: Revised edition*. *Essentials of Medical Geology: Revised Edition*, 1–805. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-4375-5>
- Espino-Valdés, M. S., Barrera-Prieto, Y., & Herrera-Pedraza, E. (2009). Presencia de arsénico en la sección norte del acuífero Meoqui-Delicias del estado de Chihuahua, México. *TECNOCENCIA Chihuahua Vol. III, No. 1, III (1)*, 8–18.



- Fawell, J., Bailey, K., Chilton, J., Dahi, E., Fewtrell, L., Magara, Y. (2006). Fluoride in Drinking-Water; WHO/IWA Publishing: Cornwall, UK
- Finkelman, R.B., Belkin, H.E., Zheng, B. (1999). Health impacts of domestic coal use in China. *Proc Natl Acad Sci USA* 96:3427–3431
- Fleischer, M., Robinson, W.O. (1963) Some problems of the geochemistry of fluorine, In: Shaw D.M. (ed): *Studies in Analytical Geochemistry*, Royal Society of Canada Special Publication, 6: 58–75
- Freeze, R., & Cherry, J. (1979). *Groundwater*. New Jersey: Prentice-Hall, Inc.
- Frengstad, B., Banks, D., and Siewers, U. (2001). The chemistry of Norwegian groundwaters: IV. The dependence of element concentrations in crystalline bedrock groundwaters. *Science of the Total Environment*, vol. 277, no.1, pp. 101-117.
- Fuge, R., Andrews, M.J. (1988). Fluorine in the UK environment. *Environ Geochem Health* 10:96–104
- Fuhong, R., Shuquin, J. (1988) Distribution and formation of highfluorine groundwater in China. *Environ Geol Water Sci* 12:3–10
- Galarza, O. (2011). Caracterización Hidrogeoquímica y Geológica del área del manantial El Pandeño en el municipio de Julimes, Chihuahua. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Chihuahua (UACH).
- García, E. (2006). El manejo del agua en La Laguna, México. 4º. Foro Mundial del Agua. 6 p.
- Guan, Z. Z., Wang, Y. N., Xiao, K. Q., Dai, D. Y., Chen, Y. H., Liu, J. L., Sindelar, P., & Dallner, G. (1999). Influence of chronic fluorosis on membrane lipids in rat brain. *Neurotoxicology and Teratology*, 20, 537–542.
- Guo, Q., Wang, Y., Ma, T., and Ma, R. (2007). Geochemical processes controlling the elevated fluoride concentrations in ground waters of the Taiyuan Basin, Northern China,” *Journal of Geochemical Exploration*, vol. 93, no.1, pp. 1-12.
- Gutiérrez, M., Reyes-Gómez, V., Alarcón-Herrera, M.T., Núñez-López, D. (2016). Acuíferos en Chihuahua: estudios sobre sustentabilidad. *TECNOCENCIA*. Chihuahua. Vol. X, Núm. 2
- Hattab, F. (1980). Fluoride in drinking water. In *Community dentistry and oral epidemiology* (Vol. 8, Issue 4). <https://doi.org/10.1111/j.1600-0528.1980.tb01289.x>
- Hem, J.D. (1989) *Study and Interpretation of Chemical Characteristics of Natural Waters*. 3rd Edition, US Geological Survey Water Supply Paper 2254.
- Hem, J.D. (1985) *Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water*. 3rd Edition, US Geological Survey Water-Supply Paper 2254, University of Virginia, Charlottesville, 263 p.
- Huízar, R., Carrillo, J., & Juárez, F. (2016). Fluoride in groundwater: levels, origin and natural control at the Tenextepango region, Morelos, Mexico. *Investigaciones Geográficas*, 2016(90), 40–58. <https://doi.org/10.14350/rig.47374>



- Jiménez S. B. (2005). Problemas compartidos México-Estado Unidos: Cuenca hidrológica Río Bravo/Río Grande” en Manejo Costero en México (Rivera E. Villalobos G. J., Azuz I. y Rosado F). Universidad Autónoma de Campeche, SEMARNAT, CETYS-Universidad, Universidad de Quintana Roo, Campeche, México, pp 507-516. ISBN: 968-5722-12-9
- Kidd, J. (2002). Agua subterránea: un recurso de América del Norte. Taller de expertos en agua dulce de America del Norte. CEC-MCIS-Universidad de Toronto. 22 p.
- Kumar, S., Roychowdhury, T., Nair, V. V, & Bhowmick, S. (2015). — A REVIEW. February 2016.
- Lavado, R.S. and Reinaudi, N. (1979) Fluoride in salt affected soils of La Pampa (Republica Argentina). Fluoride 12:28–32
- Li, Y., Dunipace, A. J., & Stookey, G. K. (1988). Genotoxic effects of fluoride: a controversial issue. Mutation Research, 195, 127-136.
- López, B. F. (2000). El riesgo de desertificación. En: F.M. de Santa Olalla M. (ed.). Agricultura y desertificación. Mundi-Prensa. España. P.15-38.
- Madhnure, P., Sirsikar, D. Y., Tiwari, N., Ranjan, B., & Malpe, D. B. (2007). Occurrence of fluoride in the groundwaters of Pandharkawada area, Yavatmal district, Maharashtra, India. Current Science, 92(5), 675-679.
- Meenakshi, A., and Maheshwari, R. C. (2006). Fluoride in drinking water and its removal. Journal of Hazardous Materials, vol. 137, no.1, pp. 456-463.
- Murray, J.J. (1986). Appropriate Use of Fluorides for Human Health, World Health Organization, Geneva.
- Nommik, H. (1953). Fluorine in Swedish agricultural products, soil, and drinking water, Acta Polytech. 127.
- Olivas, A.C., (2015). Aspectos geológicos del flúor y su presencia en acuíferos del Estado de Chihuahua. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma de Chihuahua.
- Précoma, A. Y. (2007). Caracterización Hidrogeoquímica y Presencia de Flúor en la Porción Noroeste del Estado de Chihuahua, México.
- Ramamohana, N. V., Rao, N., Rao, K. S. P., and Schuiling R. D. (1993). Fluoride distribution in waters of Nalgonda District, Andhra Pradesh, India. Environmental Geology, 21:84-89.
- Ramakrishnan, S. (1998). Groundwater, Ramakrishnan Publ., Chennai,761.
- Rascón, B. (2011). Estudio hidrogeoquímico y de vulnerabilidad a la contaminación de la porción Sur del acuífero Meoqui-Delicias, del Estado de Chihuahua. Tesis de maestría de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Chihuahua.
- Rastogi, R. and Gaumat, M. M. (1999). Hydrochemistry of Fluoride in Phreatic Zone of Unna Dist., U.P”. Bhujal News, Vol. 9, No 344.
- Rocha, E. L., (2002). Tratamiento de agua para cumplimiento de la norma de agua potable en comunidades rurales del estado de Chihuahua, Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental.



- Saucedo, R. (1996). La Calidad del Agua y el Uso de Fertilizantes y Plaguicidas en los Municipios de Delicias, Rosales y Meoqui del Estado de Chihuahua. Tesis de Maestría. Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de Chihuahua
- Saxena, V.K. and Ahmed, S. (2003) Inferring the chemical parameters for the dissolution of fluoride in groundwater. *Environ Geol* 43:731–736
- Secretaría de Salud. (1993). NORMA OFICIAL MEXICANA. NOM-014-SSA1-1993 "PROCEDIMIENTOS SANITARIOS PARA EL MUESTREO DE AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO EN SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA PUBLICOS Y PRIVADOS". México D.F.
- Secretaría de Salud. (2000). 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. México D.F.
- Secretaría de Economía. (2001). Norma Mexicana NMX-AA-077-SCFI-2001. Análisis de Aguas- Determinación de Fluoruros en Aguas Naturales, Residuales y Residuales Tratadas.
- SGM, Servicio Geológico Mexicano (2000). Carta Geológico Minera de la Ciudad de Delicias Chihuahua, H13-11.
- Shanker, R., Thussu, J. L., and Prasad, J. M. (2003). Geothermal studies at Tattapani hot spring area, Sarguja district, central India," *Geothermics*, vol. 16, no.1, pp. 61-76.
- Shawe, D.R. (1976). Geology and resources of fluorine in the United States, Geological Survey Professional Paper 933, Washington DC.
- Sreedevi, P. D., Ahmed, S., Made, B., Ledoux, E., and Gandolfi, J. M. (2006). Association of hydrogeological factors in temporal variations of fluoride concentration in a crystalline aquifer in India," *Environmental Geology*, vol. 50, no.1, pp. 1-11,
- Tang, Q., Du, J., Ma, H., Jiang, S., & Zhou, X. (2008). Fluoride and Children's Intelligence: A Meta-analysis. *Biol Trace Elem Res*, 126, 115–120.
- Trivedi, M.H., Verma, R.J., Chinoy, N.J. (2007). Effect of high fluoride water on intelligence of school children in India. *Fluoride*, 40, 178–183.
- Wang, S. X., Wang, Z. H., Cheng, X. T., Li, J., Sang, Z. P., Zhang, X. D., Han, L. L., Qiao, X. Y., Wu, Z. M., & Wang, Z. Q. (2007). Arsenic and fluoride expose in drinking water: Children's IQ and growth in Shanyin Country, Shanxi Province, China. *Environmental Health Perspectives*, 115(4), 643–647. <https://doi.org/10.1289/ehp.9270>
- World Health Organization (WHO). (2004). Fluoride in Drinking-water. Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality.
- Zárate, B. (2006). El manejo de las aguas transfronterizas México-EUA. Tesis de licenciatura. El Colegio de San Luis A.C., San Luis Potosí, México, 1



Anexo 1

Datos de campo año 2021, contenido de Fluoruros para 2003, 2006 y 2021.

MUESTRA	COORDENADAS X	COORDENADAS Y	MUNICIPIO	LOCALIDAD	TEMP. °C	pH	SDT	CE µmohs/cm	F 2003	F F_2006	F F_2021
D126	457660.103	3124407.15	DELICIAS	FRANCISCO I. MADERO	21,34	7,26	775	1107/1030	2.04	2.25	1.65
D127	461442.873	3123186.75	DELICIAS	COL. MORELOS	23,45	7,35	1333	1905/1845	0.56	0.70	0.55
D129	465077.521	3124726.45	DELICIAS	LA MERCED	26,12	6,39	794	1134/1158	1.70	1.67	1.56
D130	460935.587	3118092.47	DELICIAS	SANTA FE	18,23	7,3	2059	2942/2565	0.69	0.82	0.94
D131	457994.522	3119099.52	DELICIAS	VICENTE GUERRERO	18,18	7,13	1128	1611/1403	1.13	1.10	1.21
D133	462806.719	3120080.53	DELICIAS	LAS VIRGINIAS	24,04	6,72	1307	1867/1833	0.72	0.58	1.29
D134	460951.456	3113949.23	DELICIAS	COL. MIGUEL HIDALGO	24,73	7,48	862	1231/1225	1.56	1.48	1.52
D-136	463059.051	3106487.06	DELICIAS	COL. ARMENDARIZ	25,74	7,19	863	1233/1251	2.89	2.50	2.61
D137	452467.933	3111476.37	DELICIAS	EJ. EL DIEZ	20	7,34	519	744/674	2.92	2.50	3.63
D138	448423.461	3107338.85	DELICIAS	COL. NICOLAS BRAVO	21,42	5,98	1057	1510/1409	1.64	1.79	1.75
D139	448349.95	3113055.5	DELICIAS	COL. CAMPESINA	25,03	7,7	520	743/744	0.82	0.77	1.90
J9	456779.66	3139556.41	JULIMES	SAN JOSE	18,27	8,27	1056	1510/1313	6.73	7.15	7.93
J10	455786.953	3142937.04	JULIMES	LA REGINA	22,86	7,09	1587	2267/2175	3.63	3.70	5.63
J11	455773.079	3147069.4	JULIMES	LA ESPERANZA	23,11	7,46	1031	1474/1419	3.52	3.93	5.15
J12	455193.584	3150201.52	JULIMES	LABOR NUEVA	22,26	7,11	1429	2043/1948	2.85	2.87	3.17
J13	455670.173	3151383.44	JULIMES	BOQUILLA	22,2	7,11	1429	2043/1948		2.32	3.15
J14	457939.327	3150462.58	JULIMES	CARRIZO	18,98	7,32	1221	1741/1543	3.19	3.40	3.86
J15	459415.586	3144253.42	JULIMES	JULIMES	23,54	7,04	1193	1704/1659	3.84	4.13	4.84
J16	459617.915	3137550.27	JULIMES	EX. H. HUMBOLDT	19,8	7,43	890	1271/1146	2.93	3.28	3.54
J17	461424.078	3135494.74	JULIMES	EL GRAMAL	13,73	7,51	720	1029/808	2.40	2.59	3.33
J18	462504.393	3133098.35	JULIMES	ARENILLAS	25,48	7,19	840	1200/1210	2.10	2.45	3.24
LC63	477568.994	3090022.93	LA CRUZ	LAS PINTAS	18,63	7,3	762	1068/961	1.11	1.10	1.14
LC64	480703.915	3081709.43	LA CRUZ	PANAMERICANA	21,9	7,76	914	1304/1223	1.63	1.50	1.74
LC67	481386.919	3077720.53	LA CRUZ	EST. LA CRUZ	21,63	7,2	739	1056/993	1.22	1.00	1.08
LC69	482862.894	3076832.16	LA CRUZ	CORRALEÑO DE JUAREZ	25,1	7,35	88	1264/1268	1.04	0.90	1.45
M1	439072.866	3140319.39	MEOQUI	L. CARDENAS	20,92	7,27	401	572/528	1.77	1.54	1.61
M5	445350.417	3144000.03	MEOQUI	10 DE MAYO	24,49	8,25	469	670/664	5.03	9.40	7.05
M6	446816.484	3147660.38	MEOQUI	POTRERO DEL LLANO	18,73	7,91	953	1361/1199	3.38	3.16	3.39
M19	459170.006	3132699.48	MEOQUI	EL TORREON	14,12	7,98	701	1051/794	1.86	2.58	3.12
M21	457524.893	3133214.87	MEOQUI	GPE. VICTORIA	22,13	7,21	739	1055/998	5.12	5.23	5.63
M22	457125.141	3136517.68	MEOQUI	LOS GARCIA	25,17	7,48	842	1203/1207	3.04	2.13	3.47
M22.2	458361.12	3136845.61	MEOQUI	LOS GARCIA	13,5	7,23	1000	1428/1117	3.04	2.13	3.01
M23	456753.558	3131378.66	MEOQUI	LORETO	18,67	8,04	690	986/877	3.27	3.04	3.39
M24	455774.993	3129609	MEOQUI	LAS PUENTES	21,87	7,43	539	769/722	2.46	2.40	2.85
M25	455026.552	3129137.32	MEOQUI	GRAN MORELOS	22,02	7,29	604	863/814	3.14	2.95	3.15
M26	455725.265	3126441.53	MEOQUI	LOS JÁQUES	27,18	7,54	355	507/528	1.09	0.98	0.91
M27	460583.74	3127421.44	MEOQUI	NVO. LORETO	27,71	7,12	675	964/1011	1.65	1.76	1.67
M39	445040.599	3128946	MEOQUI	BUENAVISTA	10,78	7,93	383	547/399	2.01	2.13	1.93
M40	441138.511	3134093.76	MEOQUI	EST. CONSUELO	21,77	7,03	398	567/533	1.95	1.77	1.85
M40.2	441687.275	3134057.8	MEOQUI	EST. CONSUELO	21,77	7,03	398	567/533	1.95	1.77	1.76
M41	444106.847	3136683.5	MEOQUI	SAN LUCAS	17,49	7,37	434	620/531	1.39	1.43	1.49
M42	452458.071	3135981.6	MEOQUI	PROGRESO	22,27	7,51	618	883/837	6.27	6.08	6.45
M43	454078.433	3131765.39	MEOQUI	LOMAS DE CONSUELO	24,29	7,36	727	1039/1025	1.64	1.55	1.96



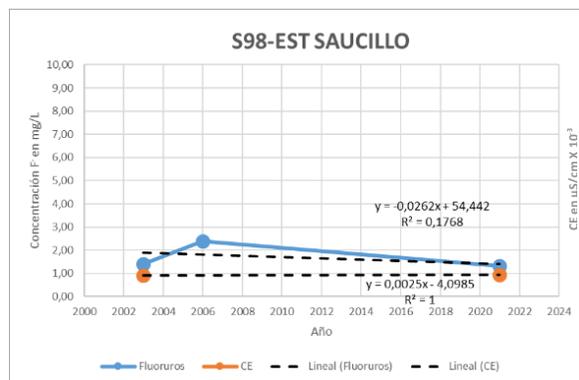
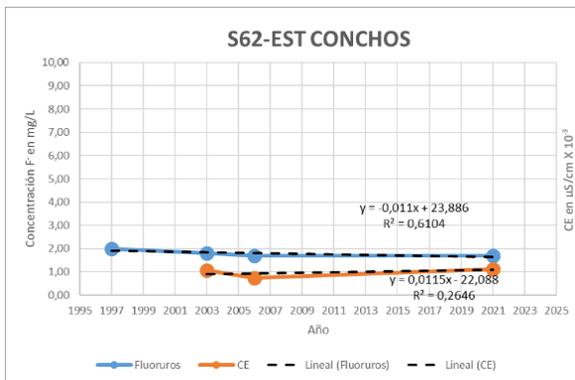
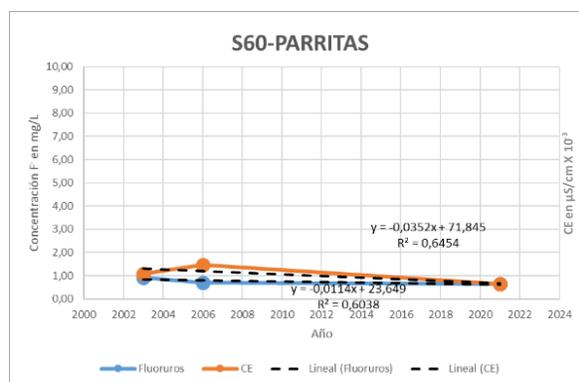
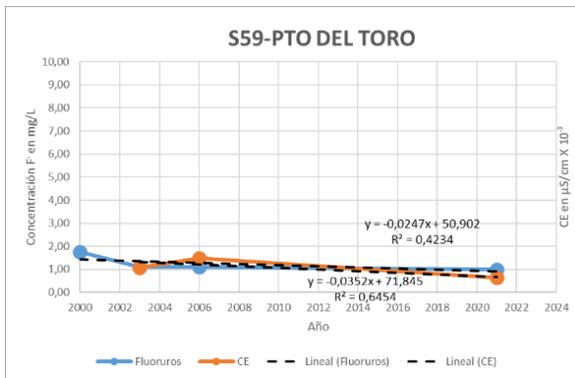
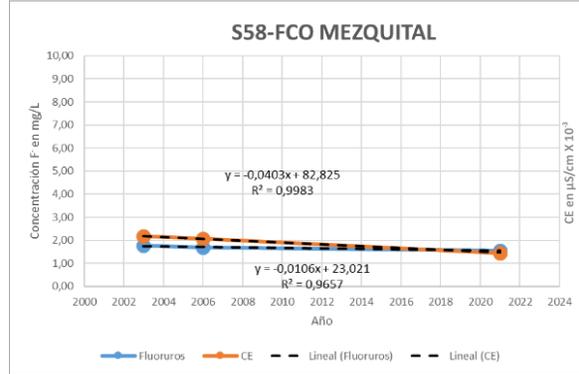
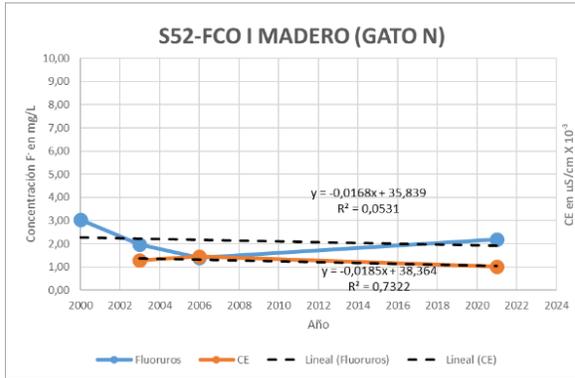
R2	440062.497	3146119.62	ROSALES	BARRANCO BLANCO	22,38	7,38	587	838/796	1.54	1.50	1.60
R3	441069.186	3147687.74	ROSALES	SANTA RITA	17,51	7,49	429	613/526	2.03	1.99	1.78
R7	446312.556	3152476.91	ROSALES	SALÓN DE ACTOS	24,29	8,11	490	699/690	6.52	5.00	5.57
R30	450288.06	3120979.28	ROSALES	R. SAN VALENTIN	15,85	8,15	418	597/493	1.99	1.06	2.55
R35	443050.716	3113372.38	ROSALES	LA GARITA	23,14	6,9	951	1357/1308	2.39	0.97	0.94
R38	444426.836	3126688.47	ROSALES	ORINDA	12,77	7,58	330	471/362	2.23	1.98	1.84
S44	465566.724	3124281.89	SAUCILLO	AMPLIACION LA MERCED	19,87	7,55	583	833/752	1.65	1.80	1.85
S45	464772.064	3120960.79	SAUCILLO	BELLA VISTA	21,1	7,76	575	820/759	2.03	1.70	1.55
S46	465241.476	3117048.86	SAUCILLO	STA. ROSA	21,17	6,97	817	1167/1080	1.01	1.00	0.94
S47	466203.829	3117179.03	SAUCILLO	ORRANTEÑO	22,44	7,03	735	1049/998	1.63	1.30	1.31
S50	465559.321	3111542.19	SAUCILLO	ALTAMIRANO	23	7,48	581	833/792	1.03	1.10	1.14
S52	466231.613	3106178.57	SAUCILLO	FRANCISCO I. MADERO	22,98	7,56	755	1029/1039	1.98	1.40	2.18
S54	469060.989	3106082.3	SAUCILLO	GOMEÑO	21,03	7,31	786	1122/1038	1.55	1.30	1.52
S56	470670.322	3101259.42	SAUCILLO	SAUCILLO P3	24,61	6,74	834	1191/1182		0.70	0.75
S56.2	470666.337	3099631	SAUCILLO	SAUILLO P8	27,01	7,23	843	1206/1249			0.62
S57	469087.705	3101208.01	SAUCILLO	VICENTE GUERRERO	24,94	7,58	456	651/650	1.02	1.00	0.89
S58	472763.596	3096790.18	SAUCILLO	FCO. MEZQUITAL	15,43	7,15	1020	1457/1192	1.77	1.70	1.57
S59	477574.159	3092792.3	SAUCILLO	PUERTO DEL TORO	22,42	7,62	444	634/602	1.09	1.10	0.99
S60	476989.521	3095673.57	SAUCILLO	PARRITAS	22,43	7,28	454	649/615	0.91	0.70	0.64
S62	471969.484	3093579.49	SAUCILLO	EST. CONCHOS	23,44	7,37	793	132/1101	1.80	1.70	1.69
S98	468780.406	3100211.81	SAUCILLO	EST. SAUCILLO	22,17	7,22	668	954/904	1.40	2.40	1.32

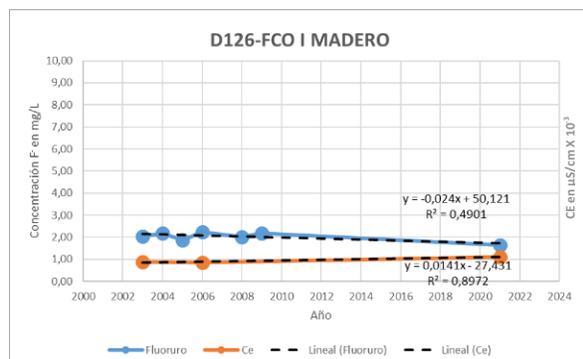
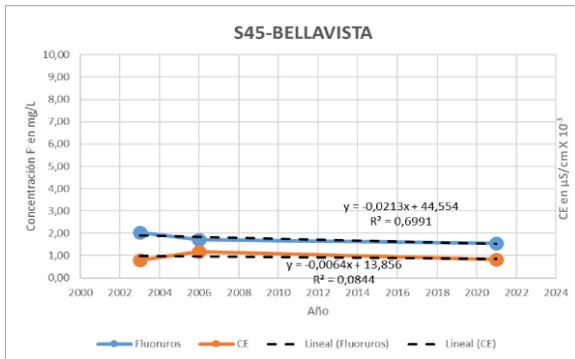
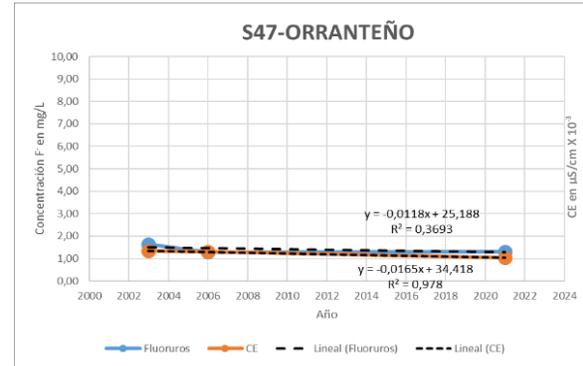
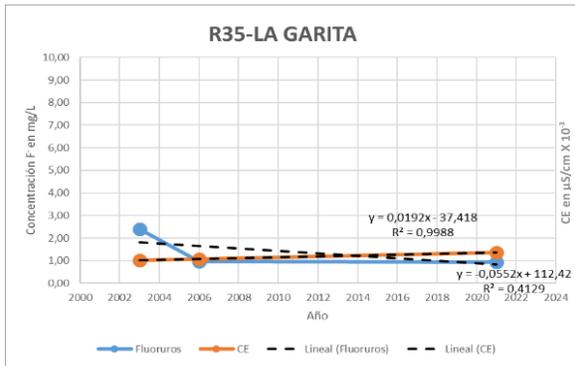
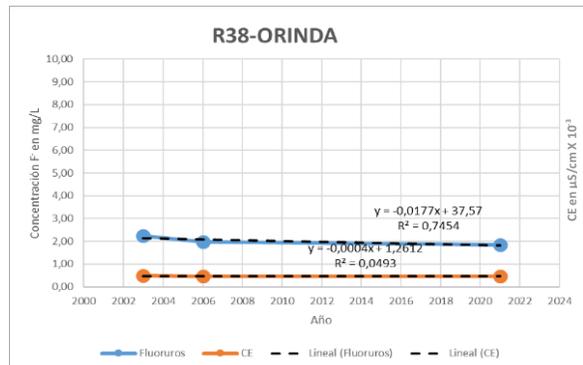
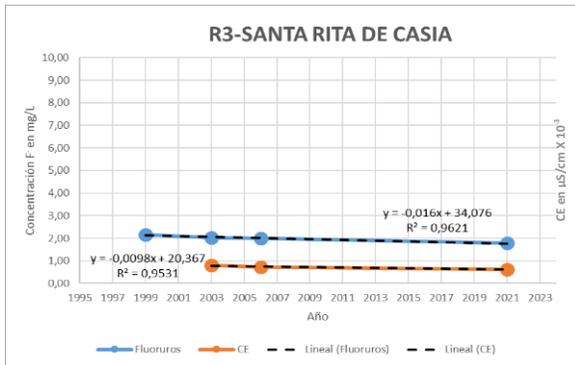
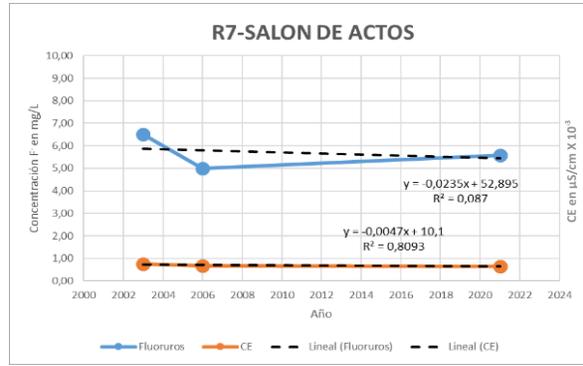
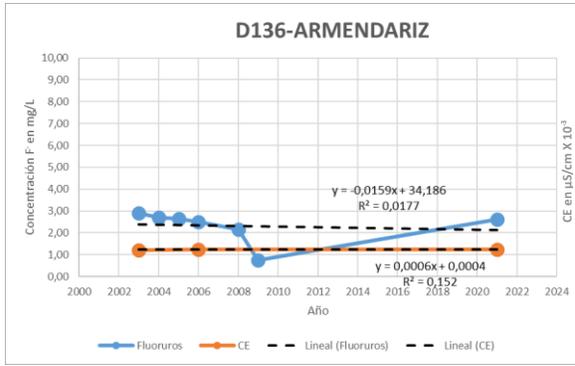


Anexo 2

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

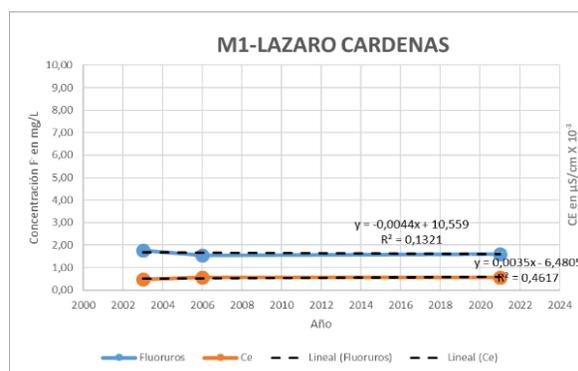
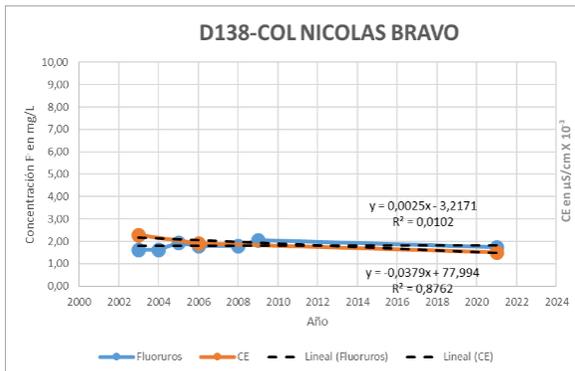
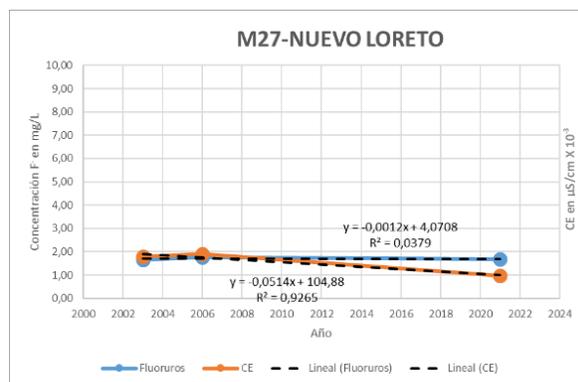
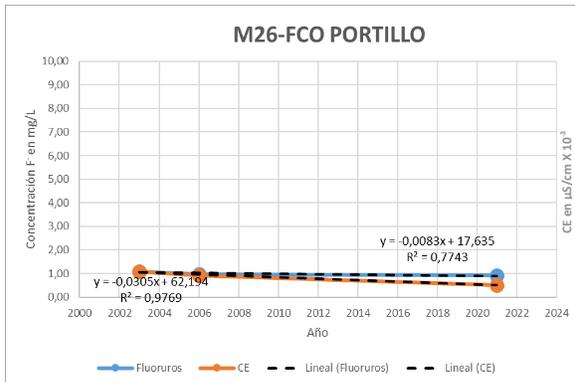
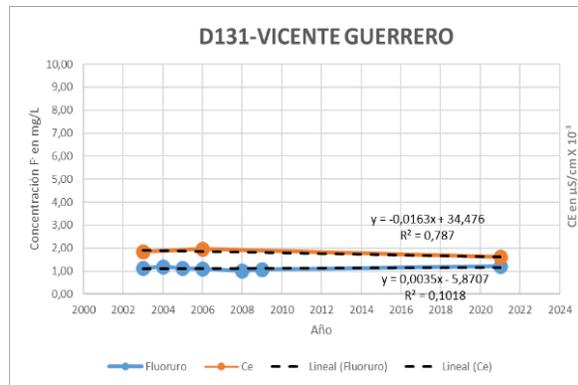
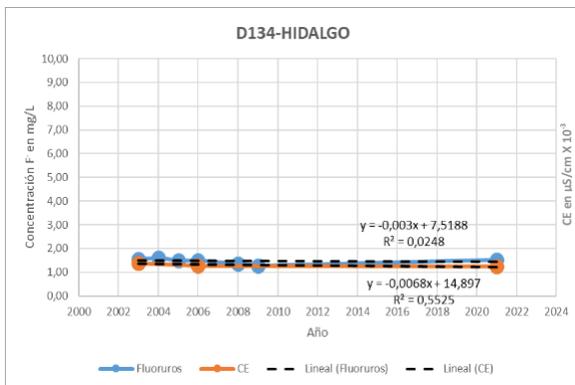
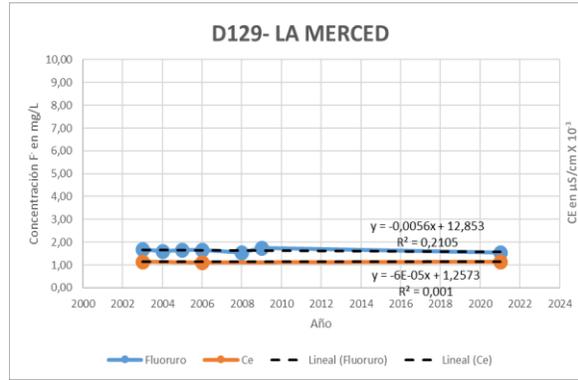
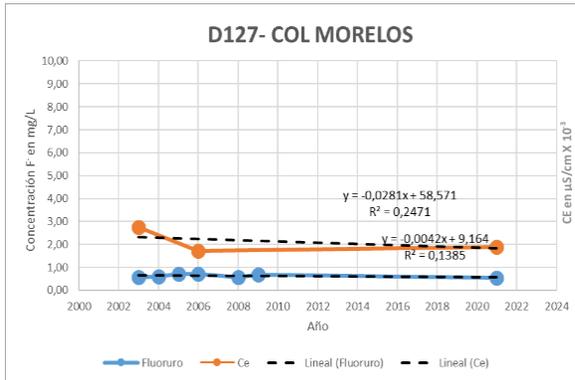
a) Pendiente Negativa (Concentración de F⁻ a la Baja)

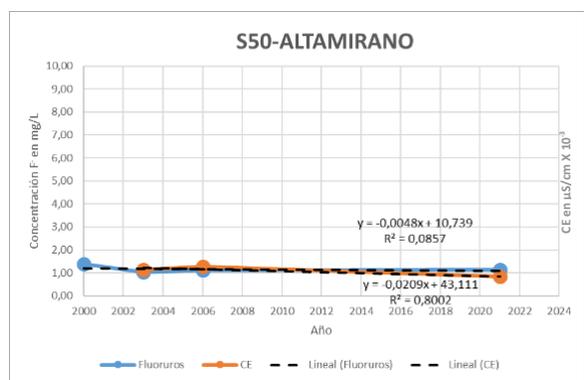
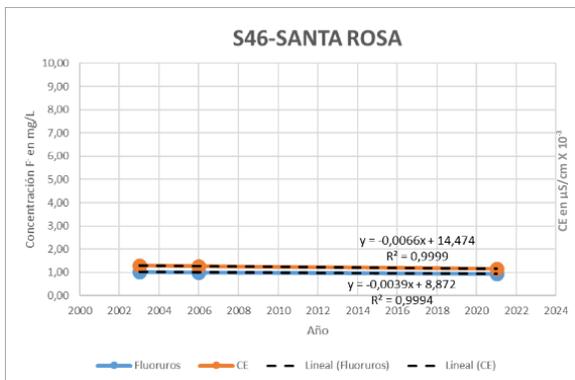
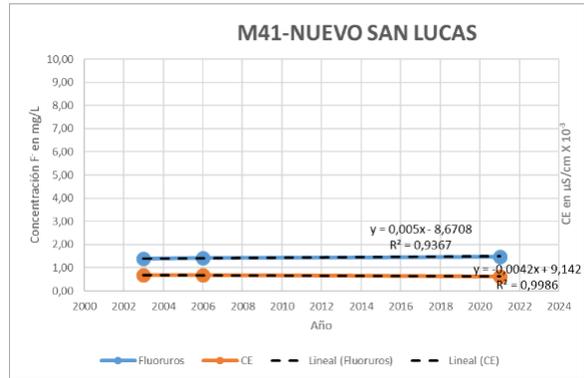
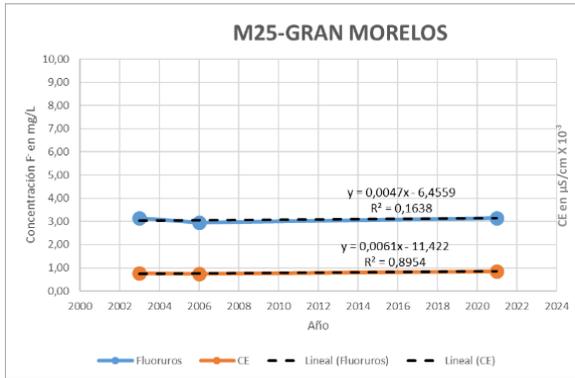
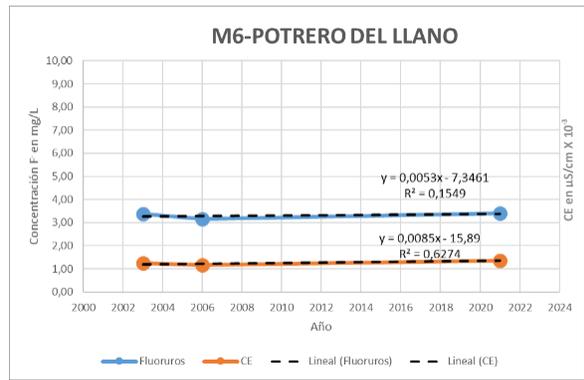
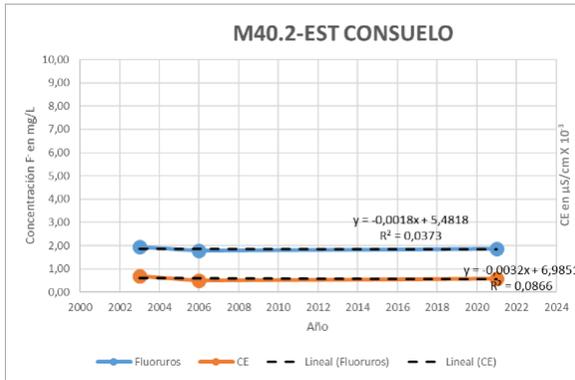
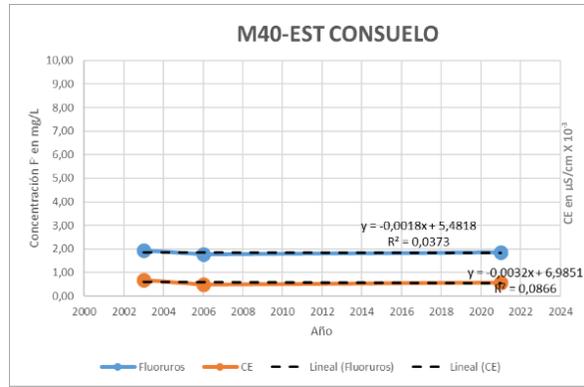
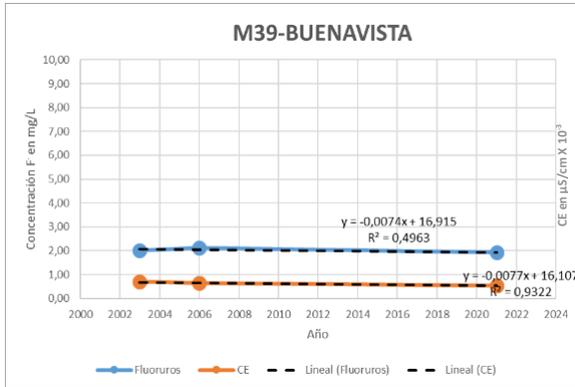


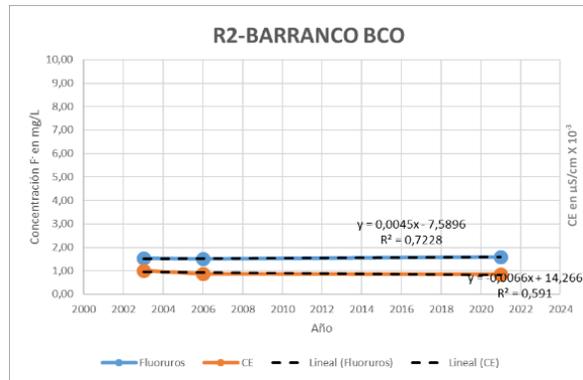
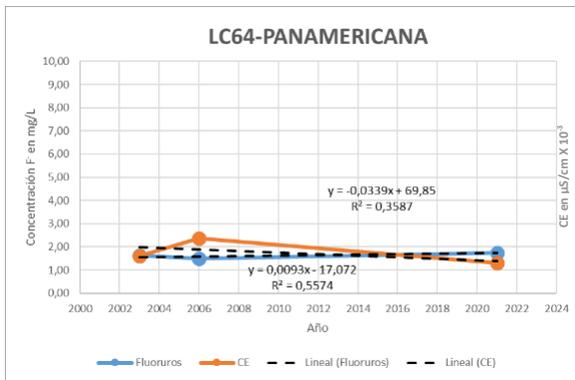
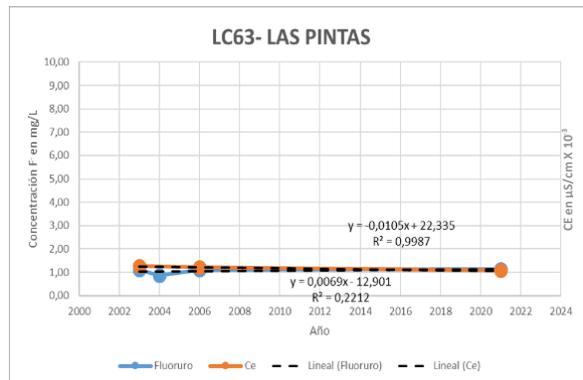
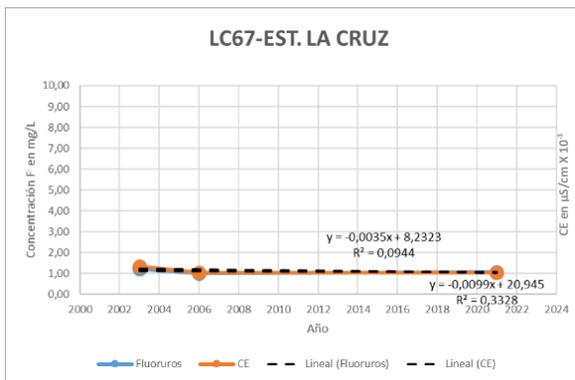
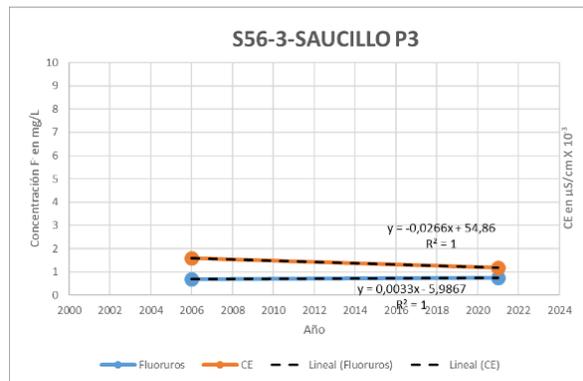
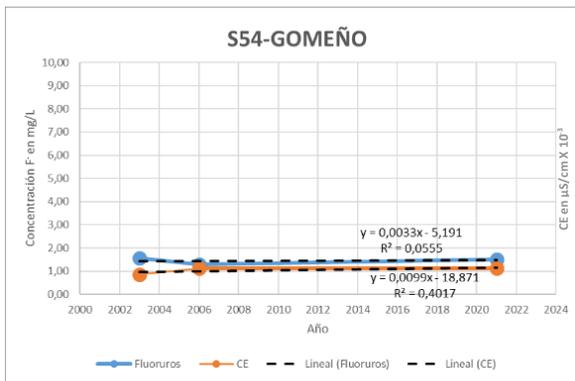
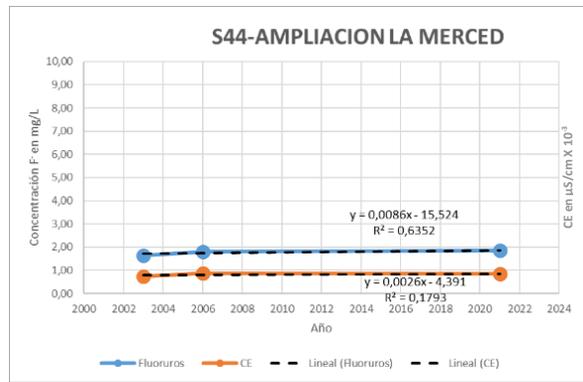
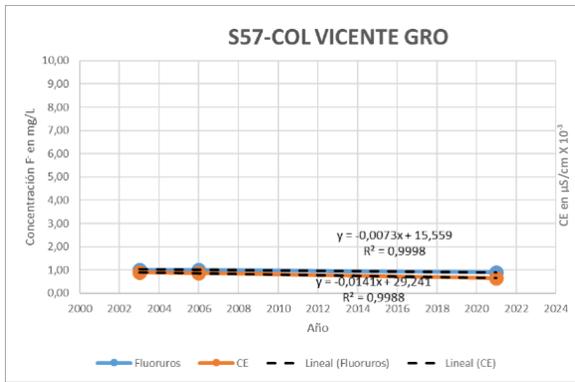




b) Pendiente Cero (Concentración de F⁻ Igual)

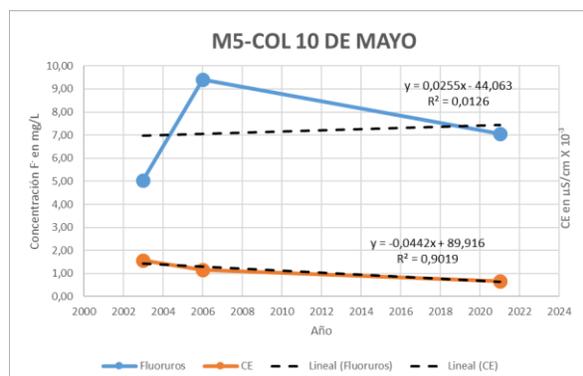
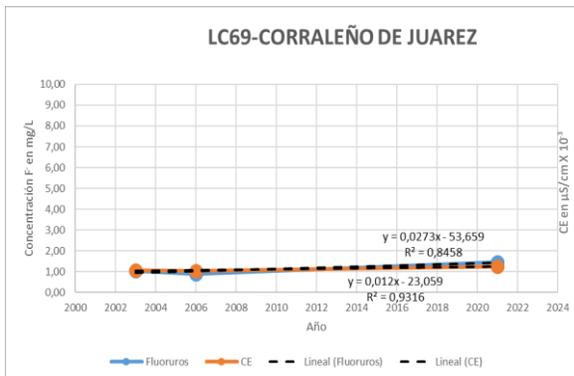
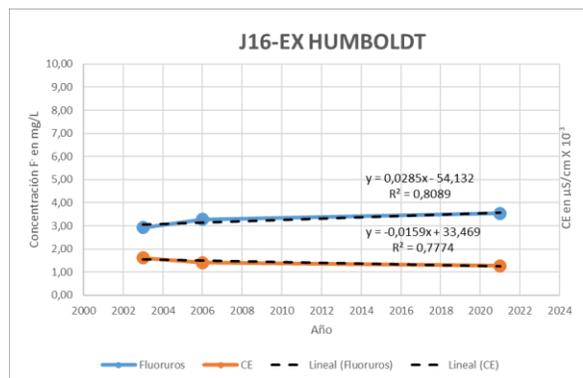
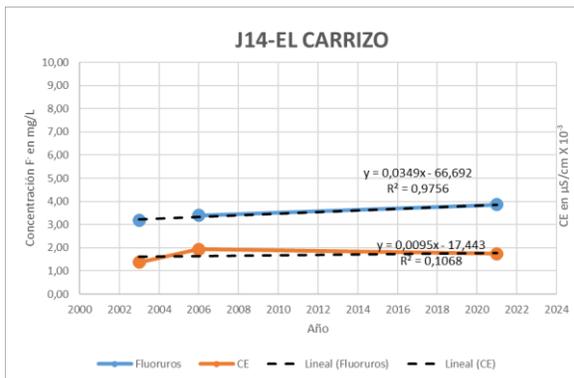
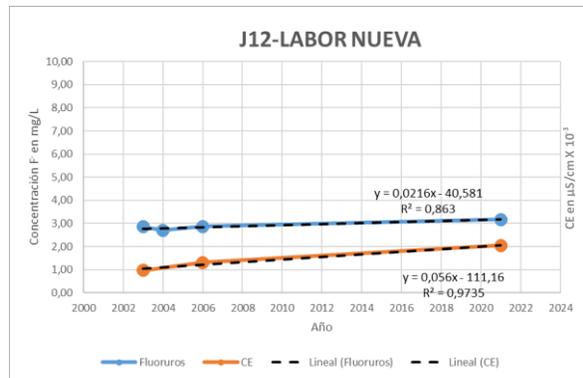
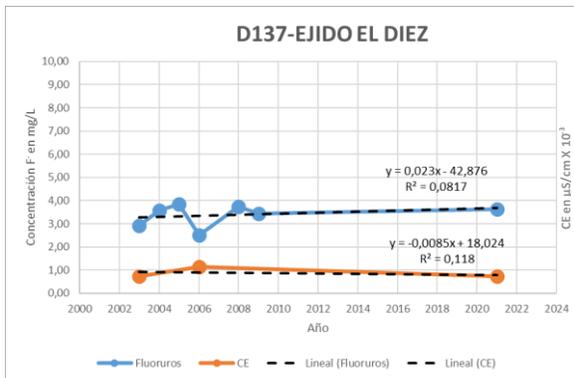
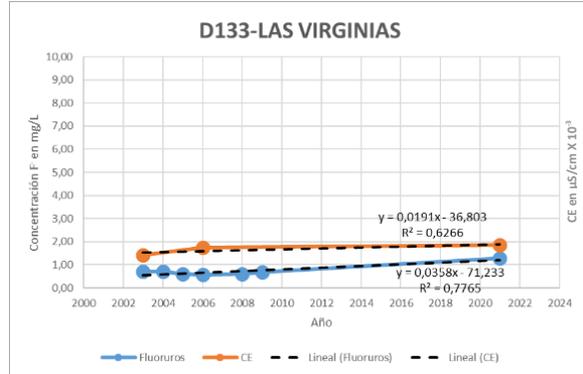
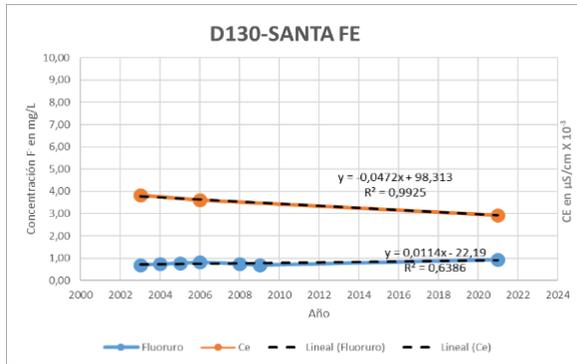


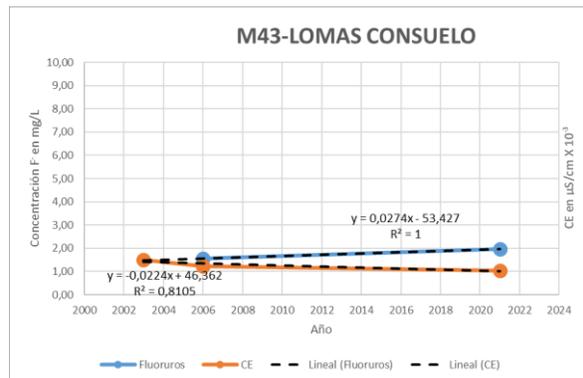
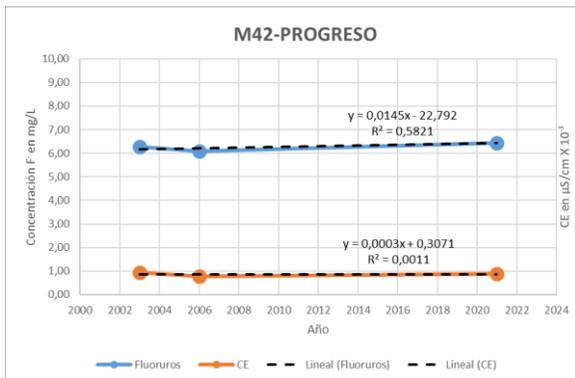
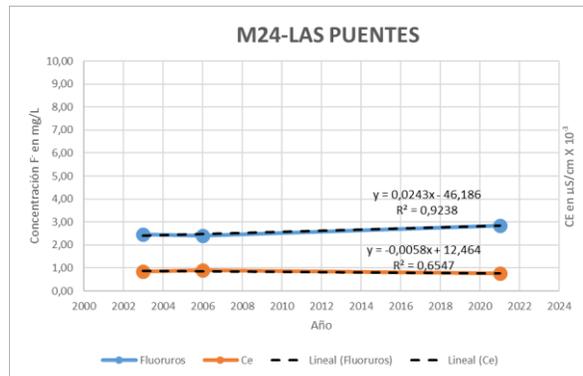
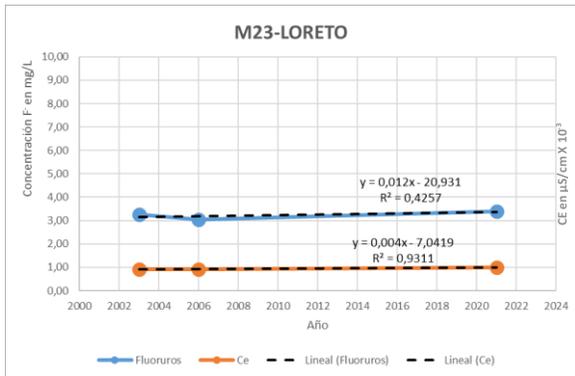
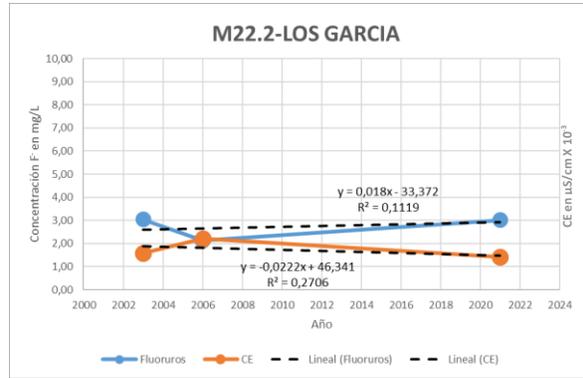
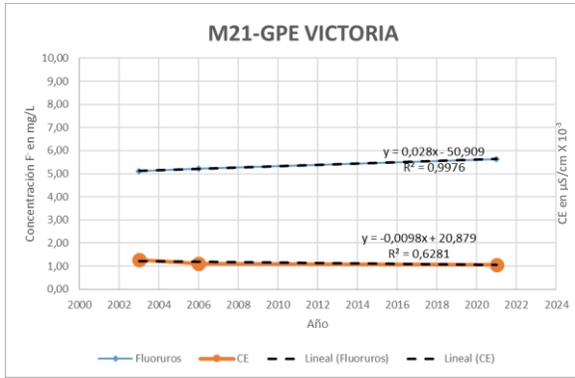




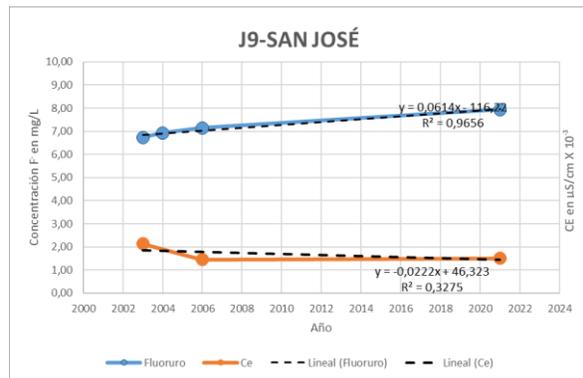
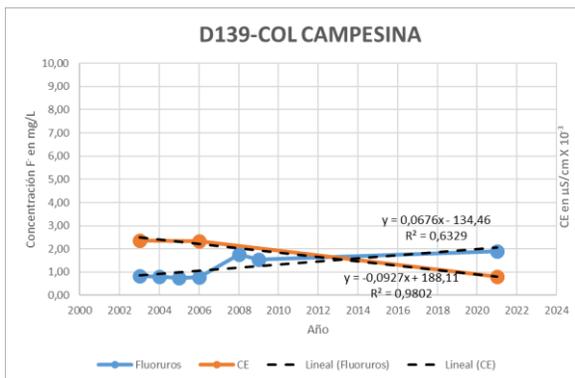


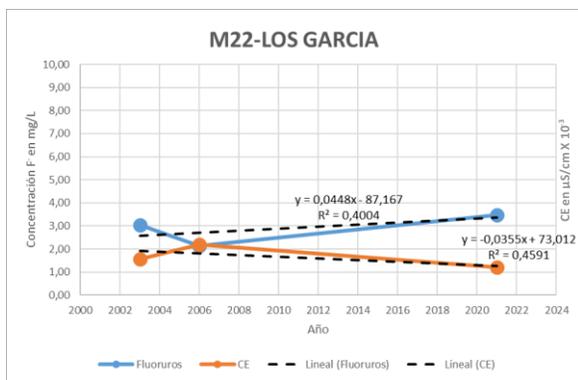
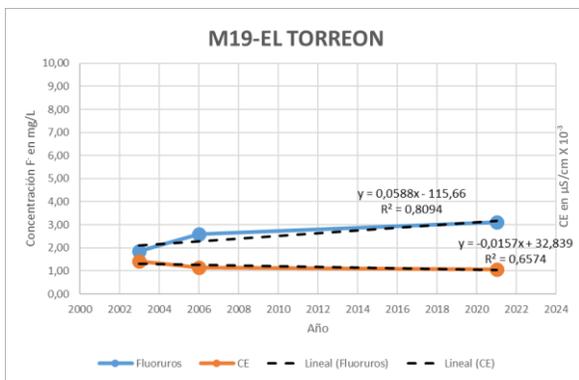
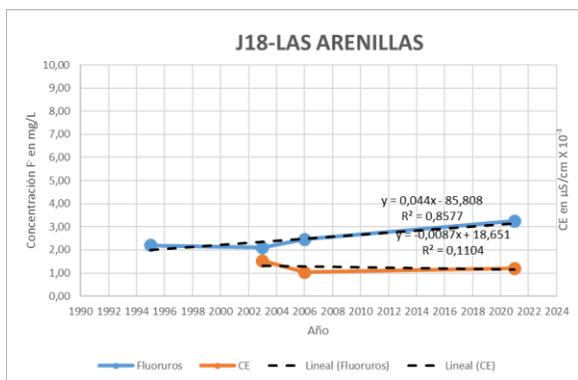
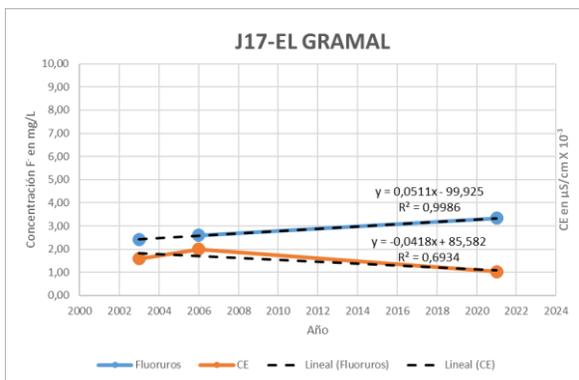
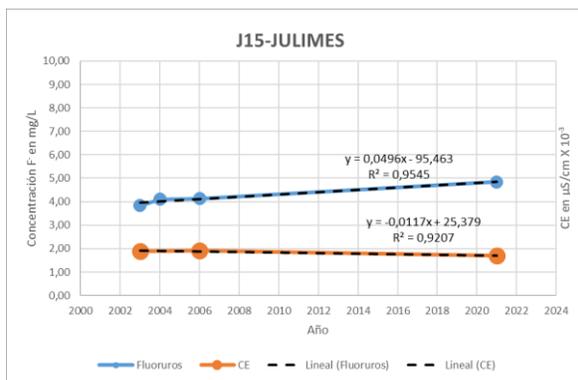
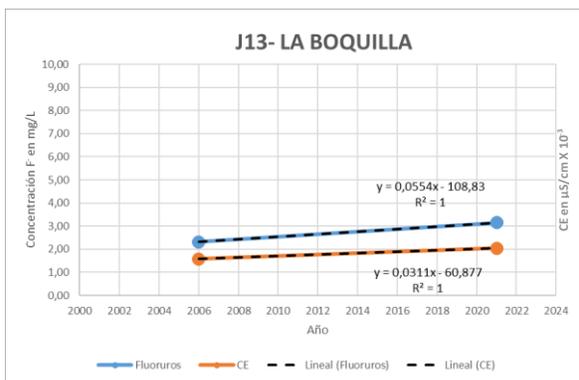
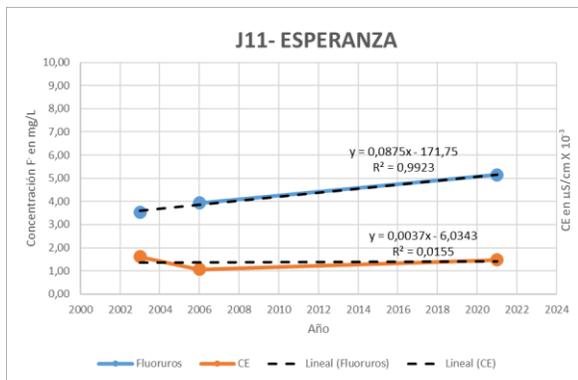
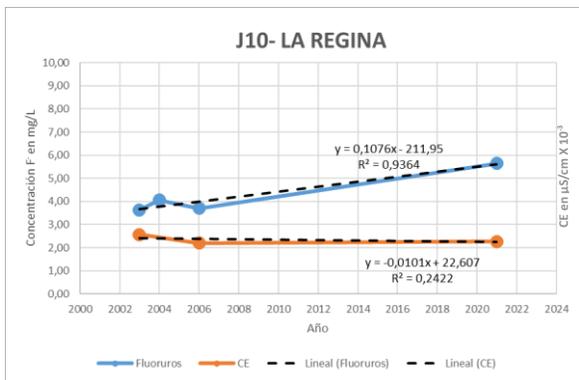
c) Pendiente Media-Alta (Concentración de F⁻ a la alza ligera)

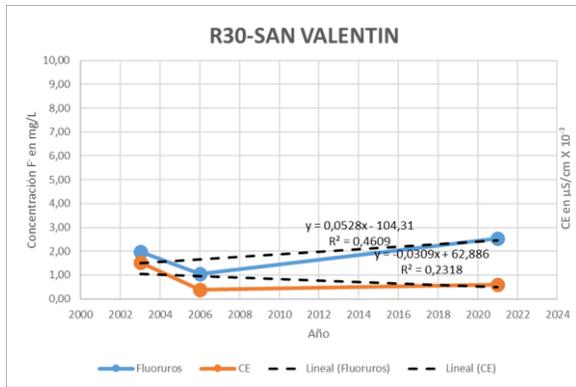




d) Pendiente Alta (concentración de F⁻ a la alza)









Anexo 3

Historial piezométrico año 2021 (Fuente: Elaboración propia)

Nombre	Coordenadas		Localidad	Brocal	2021	2021	2005	2005	2005-2021	Profundidad Pozo
	X	Y			Profundidad ND	Elevación ND	Profundidad ND	Elevación ND	Evolución	
D129	465078	3124726	La_Merced	1183.0	41.3	1141.7	38.8	1144.2	-2.5	70.0
D133	462807	3120081	Las_Virginias	1209.0	46.0	1163.0	43.7	1165.4	-2.4	
D137	452468	3111476	Ejido_El_Diez	1220.0	46.0	1174.0	42.0	1178.0	-4.0	
D139	448350	3113056	Col._Campesina	1190.0	45.0	1145.0	43.3	1146.7	-1.7	
J9	456780	3139556	San_Jose	1126.0	27.2	1098.8				
J11	455773	3147069	Esperanza	1104.0	21.2	1082.8	18.5	1085.5	-2.7	
J15	459416	3144253	Julimes	1129.0	27.0	1102.0	18.9	1110.1	-8.1	79.0
LC63	477569	3090023	Las_Pintas	1209.0	24.3	1184.7	17.3	1191.8	-7.1	
LC64	480704	3081709	Panamericana	1200.0	15.8	1184.2				
LC67	481387	3077721	Est.la_Cruz	1219.0	20.1	1198.9	19.3	1199.7	-0.8	
LC69	482863	3076832	Corraleo_de_Juarez	1209.0	14.2	1194.8	10.0	1199.1	-4.3	
M1	439073	3140319	Lazaro_cardenas	1200.0	50.1	1149.9	45.6	1154.5	-4.6	
M5	445350	3144000	Col._10_de_Mayo	1179.0	36.0	1143.0	29.2	1149.8	-6.8	
M21	457525	3133215	Gpe._Victoria	1129.0	10.1	1118.9	6.4	1122.6	-3.7	
M22	457125	3136518	Los_Garcia	1134.0	18.9	1115.1	15.6	1118.4	-3.3	
M22.2	458361	3136846	Los_Garcia	1119.0	13.1	1105.9				
M23	456754	3131379	Loreto	1132.0	9.3	1122.7	8.4	1123.6	-0.9	
M27	460584	3127421	Nuevo_Loreto	1180.0	36.7	1143.3	33.2	1146.8	-3.5	150.0
M40	441139	3134094	Est._Consuelo	1196.0	33.1	1162.9	31.1	1164.9	-2.0	150.0
M41	444107	3136683	Nvo._San_Lucas	1160.0	18.5	1141.5	5.7	1154.3	-12.8	
R2	440062	3146120	Barranco_Bco.	1191.0	63.5	1127.5	49.5	1141.5	-14.0	152.0
R35	443051	3113372	La_Garita	1189.0	45.0	1144.0	32.6	1156.4	-12.4	
S45	464772	3120961	Bella_Vista	1200.0	41.3	1158.7	44.9	1155.2	3.6	
S47	466204	3117179	Orranteño	1176.0	15.2	1160.8	21.2	1154.8	6.0	90.0
S50	465559	3111542	Altamirano	1190.0	16.2	1173.8				
S54	469061	3106082	Gomeño	1178.0	18.2	1159.8	22.5	1155.5	4.3	60.0
S56-3	470670	3101259	Saucillo_P3	1189.0	50.0	1139.0	45.0	1144.0	-5.0	185.0
S56-8	470666	3099631	Saucillo_P8	1198.0	65.0	1133.0	60.0	1138.0	-5.0	250.0
S57	469088	3101208	Col._Vicente_Gro.	1205.0	80.0	1125.0	84.7	1120.3	4.7	180.0
S98	468780	3100212	Est._Saucillo	1217.0	85.0	1132.0	88.6	1128.4	3.6	137.0

Historial piezométrico año 2005 (Fuente: CONAGUA, 2005)

No Pozo	Predio	Municipio	Coordenadas			Profundidad ND	Elevación ND	Profundidad Pozo
			X	Y	Z			
234	ColoniaCentro	Rosales	447048.1	3118462.9	1173.0	44.3	1128.7	108
234	ColoniaCentro	Rosales	444998.0	3117342.9	1179.0	20.7	1158.3	
234	ColoniaCentro	Rosales	445036.1	3117318.1	1179.0	20.0	1159.0	
699	ParqueCentralExHda.Delicias	Rosales	448121.2	3117587.3	1170.0	16.8	1153.2	113.5
217	UACHFacultadAgronomia	Delicias	450666.2	3117164.2	1165.0	35.7	1129.4	
551	EstanciaLosPozos	Saucillo	461244.5	3088043.8	1318.0	85.0	1233.0	
567	LosReyes	Camargo	484062.3	3067312.1	1221.0	12.0	1209.1	35
566	ElFlores	Camargo	483613.3	3071429.5	1214.0	11.8	1202.2	
569	ElCorraleño	La Cruz	482862.9	3076832.2	1209.0	10.0	1199.1	
569	ElMorieleño	La Cruz	483461.5	3078469.7	1201.0	9.0	1192.0	
570	EstaciónLaCruz	La Cruz	481386.9	3077720.5	1219.0	19.3	1199.7	
560	LaCruzCarretera	La Cruz	479829.1	3081930.6	1217.0	19.3	1197.7	
564	PuertodePintas	La Cruz	477569.0	3090022.9	1209.0	17.3	1191.8	
218	Col.LomaLinda	Rosales	446014.1	3122526.4	1172.0	20.6	1151.5	80
565	PuertodelToro	Saucillo	477606.5	3092636.1	1211.0	64.4	1146.6	96
566	Conchos	Saucillo	471969.5	3093579.5	1220.0	13.4	1206.6	
225	CongregaciónOrtiz	Rosales	449107.5	3125045.3	1155.0	22.0	1133.0	
225	CongregaciónOrtiz	Rosales	449169.8	3124965.0	1155.0	24.0	1131.0	
205	CruceroFFCCyCarreteraOrinda	Rosales	444376.1	3130107.0	1167.0	13.8	1153.2	
258	EstaciónConsuelo	Meoqui	441138.5	3134093.8	1196.0	31.1	1164.9	150
632	PuebloOrinda	Rosales	444470.8	3126481.6	1186.0	43.0	1143.0	100
759	AfueraSdeLaCol.ElMolino	Rosales	446579.7	3116160.2	1178.0	21.2	1156.8	
107	Km99	Rosales	443065.3	3111179.1	1207.0	59.1	1148.0	
211	Col.Campesina	Delicias	448349.9	3113055.5	1190.0	43.3	1146.7	
216	Col.LaGarita	Rosales	443050.7	3113372.4	1189.0	32.6	1156.4	



270	Col.L_Lazaro_cardenas	Meoqui	439072.9	3140319.4	1200.0	45.6	1154.5	
270	Col.L_Lazaro_cardenas	Meoqui	439655.0	3140103.7	1195.0	39.3	1155.7	
0	Col.Nvo.SanLucas	Meoqui	444106.8	3136683.5	1160.0	5.7	1154.3	
274	LasCarolinas	Meoqui	444529.8	3140221.3	1167.0	23.0	1144.1	
287	SanFelipedeJesús	Meoqui	443566.4	3136234.6	1162.0	5.9	1156.1	
351	Col.PotrerodelLlano	Meoqui	446875.6	3147436.0	1169.0	40.1	1128.9	180.55
363	Col.10deMayo	Meoqui	445350.4	3144000.0	1179.0	29.2	1149.8	
369	CarreteraSalóndeActosKm17	Rosales	446486.8	3149262.6	1152.0	17.0	1135.0	
389	Col.SantaRita	Rosales	446065.8	3147315.2	1190.0	24.2	1165.8	
279	AfueraCol.FelipeAngeles	Meoqui	448769.9	3140223.7	1157.0	20.6	1136.4	
140	LaderasdelValle	Delicias	453497.9	3114715.7	1191.0	30.0	1161.0	225
121	Col.NicolasBravo.Km.92	Delicias	448471.5	3107132.7	1213.0	40.9	1172.1	
14	Pueblokm86-4(ElDiez)	Delicias	452467.9	3111476.4	1220.0	42.0	1178.0	
144	PuebloElDiez86-4	Delicias	451997.2	3111167.5	1215.0	46.1	1168.9	
161	Col.MiguelHidalgo	Delicias	460994.8	3113750.3	1218.0	79.0	1139.0	
183	Col.LasVirginias	Delicias	462806.7	3120080.5	1209.0	43.7	1165.4	
185	Col.SantaFe	Delicias	460953.7	3117846.1	1209.0	50.0	1159.0	320
468	Col.AbrahamGonzález	Delicias	460105.4	3119387.4	1207.0	95.0	1112.0	254
189	ElPorvenirlote12-26	Saucillo	464561.2	3119782.6	1186.0	15.8	1170.2	36
576	Col.Horranteño	Saucillo	466203.8	3117179.0	1176.0	21.2	1154.8	90
189	Col.Bellavista	Saucillo	464772.1	3120960.8	1200.0	47.9	1152.2	
577	Col.LasVaras	Saucillo	466461.9	3114164.4	1169.0	29.6	1139.4	100
452	Col.ElAlamitoyCol.Bellavista	Delicias	464532.8	3121213.5	1196.0	60.8	1135.2	200
454	Col.LaMerced	Delicias	465077.5	3124726.4	1183.0	38.8	1144.2	70
455	AmpliacionLasMercedes	Saucillo	465288.1	3124110.0	1197.0	55.1	1141.9	
532	Col.LaRevolución	Delicias	456588.2	3123750.9	1180.0	67.5	1112.5	225
473	Col.NuevoLoreto	Delicias	460808.4	3127518.0	1181.0	33.2	1147.8	150
474	Col.Cuahutemoc	Delicias	460989.0	3126926.6	1164.0	16.1	1147.9	100
425	Col.Morelos	Delicias	461436.6	3123004.8	1198.0	78.4	1119.7	
527	InstitutoTecnológicoDelicias	Delicias	457677.6	3120491.3	1190.0	51.6	1138.4	80
322	Col.GuadalupeVictoria	Meoqui	457524.9	3133214.9	1129.0	12.0	1117.0	
323	Col.Loreto	Meoqui	456753.6	3131378.7	1132.0	8.4	1123.6	
323	Col.FranciscoPortillo	Meoqui	456317.3	3126419.8	1146.0	34.5	1111.5	150
0	Col.Fco.I.Madero	Delicias	457757.2	3124488.2	1182.0	34.4	1147.7	
537	Col.ElTorreón	Meoqui	459253.6	3132502.1	1134.0	35.0	1099.0	6
543	EjidoCerritodeBallestero	Julimes	459415.6	3144253.4	1129.0	21.9	1107.1	79
543	CerritodeBallesteo,Cabeceramunicipla	Julimes	459717.4	3143929.3	1129.0	24.1	1104.9	
549	HaciendaHumbold	Julimes	459671.2	3137584.2	1119.0	7.2	1111.8	15
549	Col.Gramal	Julimes	460708.6	3136051.4	1124.0	17.5	1106.6	
549	Col.Arenillas	Julimes	462528.1	3132888.3	1124.0	7.5	1116.5	
712	Col.LaBoquilla	Julimes	458158.2	3149221.5	1104.0	5.8	1098.2	
321	LosGarcía	Meoqui	457125.1	3136517.7	1134.0	15.6	1118.4	
324	LosPuentes	Meoqui	455775.0	3129609.0	1136.0	10.7	1125.3	36
324	Col.GranMorelos	Meoqui	454706.7	3129176.8	1139.0	21.6	1117.4	
537	Col.MiRanchito	Meoqui	460104.5	3134511.7	1129.0	15.0	1114.0	
758	Col.LaEsperanza	Julimes	455773.1	3147069.4	1104.0	18.5	1085.5	
312	LomadelConsuelo	Meoqui	453700.6	3131737.9	1142.0	24.3	1117.7	
336	Col.ElEntronque	Meoqui	456598.5	3139933.8	1129.0	38.3	1090.7	
317	Col.Progreso	Meoqui	452491.6	3135832.3	1140.0	30.1	1109.9	
333	Municipal	Meoqui	451945.4	3126682.8	1150.0	36.4	1113.6	112.77
333	Comunal	Meoqui	453495.1	3127242.9	1147.0	49.9	1097.1	
334	Comunal	Meoqui	453150.7	3127656.6	1148.0	20.1	1127.9	
334	Comunal	Meoqui	451150.2	3128760.1	1145.0	42.0	1103.0	
171	Comunal	Delicias	455264.0	3115860.1	1189.0	99.3	1089.7	225
171	Comunal	Delicias	454707.4	3115781.9	1191.0	87.7	1103.3	250
171	Municipal	Delicias	454158.4	3115547.0	1180.0	91.1	1088.9	225
746	Municipal	Delicias	453738.6	3116308.7	1175.0	64.1	1111.0	250
651	Municipal	Delicias	452933.5	3117058.2	1169.0	60.0	1109.0	150
203	Comunal	Meoqui	438238.5	3139864.8	1217.0	69.4	1147.6	
392	BarrancoBlanco	Rosales	440062.5	3146119.6	1191.0	49.5	1141.5	152
244	Col.SanValentín	Rosales	450335.8	3120969.0	1156.0	4.8	1151.2	
243	Col.AguaNueva	Rosales	450959.0	3120717.1	1153.0	5.9	1147.1	
531	Col.Terrazas	Delicias	452933.5	3123592.9	1150.0	43.7	1106.3	
578	Col.LasAlvareñas	Saucillo	466935.4	3110839.9	1169.0	25.9	1143.1	
155	66BatallóndeInfantería	Delicias	452933.5	3113476.3	1191.0	39.9	1151.1	100
153	Col.Armendíz	Delicias	452933.5	3106340.4	1216.0	33.8	1182.2	200
550	Col.Km.59	Saucillo	464959.1	3104876.0	1212.0	30.0	1182.0	
551	Col.FranciscoMadero	Saucillo	466272.4	3105980.0	1206.0	45.0	1161.0	
578	Col.LomaChica	Saucillo	466392.5	3109890.6	1173.0	60.0	1113.0	
579	Col.ElGomeño	Saucillo	469061.0	3106082.3	1178.0	22.5	1155.5	60
579	Col.ElGomeño	Saucillo	467698.6	3108585.4	1179.0	28.7	1150.3	
580	Col.AncondeCarros	Saucillo	476799.3	3096250.0	1189.0	37.8	1151.2	
566	EjidoSaucillo	Saucillo	476986.4	3095545.0	1197.0	24.6	1172.4	
0	LaCuadra	Saucillo	469437.4	3104571.4	1180.0	42.2	1137.8	
580	Col.ElMezquital	Saucillo	472741.2	3096587.8	1195.0	15.0	1180.0	
580	Saucillo	Saucillo	470961.6	3100521.3	1197.0	64.1	1132.9	83



580	Saucillo	Saucillo	471461.6	3100637.0	1187.0	10.5	1176.5	63
580	Saucillo	Saucillo	471437.5	3100843.3	1186.0	42.3	1143.7	100
581	Saucillo	Saucillo	470666.3	3099631.0	1198.0	60.0	1138.0	250
581	Saucillo	Saucillo	470605.3	3099980.6	1199.0	53.0	1146.0	188
581	Benito Juárez	Saucillo	470670.3	3101259.4	1189.0	45.0	1144.0	185
581	VicenteGuerrero	Saucillo	469087.7	3101208.0	1205.0	84.7	1120.3	180
581	EstaciónSaucillo	Saucillo	468780.4	3100211.8	1217.0	88.6	1128.4	137
171	Av.4AyBelisarioDomínguez	Delicias	452933.5	3116765.7	1169.0	60.0	1109.0	250
171	PlantaWrangler	Delicias	452933.5	3116727.8	1169.0	94.3	1074.7	300
648	Av.5AyC3AOte.	Delicias	452933.5	3118657.5	1170.0	84.4	1085.6	225
651	C.5AyAV23Pte.	Delicias	452933.5	3117371.4	1169.0	85.0	1084.0	114
693	Av.2ayC10AOte.	Delicias	452933.5	3117859.0	1169.0	90.0	1079.0	250
746	C.MartínGómezyAv.10Sur	Delicias	452933.5	3116707.1	1169.0	93.6	1075.4	225
746	Av.12SuryC.LosAngeles	Delicias	452933.5	3116912.1	1169.0	97.2	1071.9	225
746	Av.8AyGómezMoron	Delicias	452933.5	3117391.9	1169.0	98.0	1071.0	250
448	LaderasdelNorte	Delicias	452933.5	3117781.3	1168.0	107.3	1060.7	
449	Col.VicenteGuerrero	Delicias	452933.5	3118871.5	1168.0	92.7	1075.3	
450	Col.CarmenSerdan	Delicias	452933.5	3118550.1	1170.0	95.0	1075.0	225
450	Col.CarmenSerdan	Delicias	452933.5	3118559.2	1170.0	90.6	1079.4	225
521	Col.Obrera	Delicias	452933.5	3119520.1	1159.0	74.1	1084.9	150
521	LotesUrbanos	Delicias	452933.5	3119944.7	1160.0	89.7	1070.4	220
521	FlamingosUnidadHabitacional	Delicias	452933.5	3120088.5	1160.0	80.3	1079.7	



Anexo 4

Datos estadísticos para cada pozo, acuífero Meoqui-Delicias.

Pozo	Localidad	Municipio	F- 2003	F- 2006	F- 2021	Tendencia	Mediana	Media aritmética	Desviación Estandar	Varianza	Min F-	Max F-	Pendiente
D126	Fco. I. Madero	Delicias	2.04	2.25	1.65	Baja	2.04	1.98	0.30	0.09	1.65	2.25	-0.024
D127	Col. Morelos	Delicias	0.56	0.7	0.55	Igual	0.56	0.61	0.08	0.01	0.55	0.72	-0.004
D129	La Merced	Delicias	1.7	1.67	1.56	Igual	1.67	1.64	0.07	0.01	1.56	1.76	-0.006
D130	Santa Fe	Delicias	0.69	0.82	0.94	Media alta	0.82	0.82	0.13	0.02	0.69	0.94	0.011
D131	Vicente Guerrero	Delicias	1.13	1.1	1.21	Igual	1.13	1.15	0.06	0.00	1.03	1.21	0.004
D133	Las Virginias	Delicias	0.72	0.58	1.29	Media alta	0.72	0.86	0.38	0.14	0.58	1.29	0.036
D134	Hidalgo	Delicias	1.56	1.48	1.52	Igual	1.52	1.52	0.04	0.00	1.27	1.61	-0.003
D136	Armendariz	Delicias	2.89	2.5	2.61	Baja	2.61	2.67	0.20	0.04	0.75	2.89	-0.016
D137	Ejido El Diez	Delicias	2.92	2.5	3.63	Media alta	2.92	3.02	0.57	0.33	2.5	3.86	0.023
D138	Col. Nicolas Bravo	Delicias	1.64	1.79	1.75	Igual	1.75	1.73	0.08	0.01	1.64	2.05	0.003
D139	Col. Campesina	Delicias	0.82	0.77	1.9	Alta	0.82	1.16	0.64	0.41	0.76	1.9	0.068
J9	San José	Julimes	6.73	7.15	7.93	Alta	7.15	7.27	0.61	0.37	6.73	7.93	0.061
J10	La Regina	Julimes	3.63	3.7	5.63	Alta	3.7	4.32	1.14	1.29	3.63	5.63	0.108
J11	Esperanza	Julimes	3.52	3.93	5.15	Alta	3.93	4.2	0.85	0.72	3.52	5.15	0.088
J12	Labor Nueva	Julimes	2.85	2.87	3.17	Media alta	2.87	2.96	0.18	0.03	2.7	3.17	0.022
J13	La Boquilla	Julimes		2.32	3.15	Alta	2.74	2.74	0.59	0.34	2.32	3.15	0.055
J14	El Carrizo	Julimes	3.19	3.4	3.86	Media alta	3.4	3.48	0.34	0.12	3.19	3.86	0.035
J15	Julimes	Julimes	3.84	4.13	4.84	Alta	4.13	4.27	0.51	0.26	3.84	4.84	0.05
J16	ExH Humboldt	Julimes	2.93	3.28	3.54	Media alta	3.28	3.25	0.31	0.09	2.93	3.54	0.029
J17	El Gramal	Julimes	2.4	2.59	3.33	Alta	2.59	2.77	0.49	0.24	2.4	3.33	0.051
J18	Las Arenillas	Julimes	2.1	2.45	3.24	Alta	2.45	2.6	0.58	0.34	2.1	3.24	0.044
LC63	Las Pintas	La Cruz	1.11	1.1	1.14	Igual	1.11	1.12	0.02	0.00	0.87	1.14	0.007
LC64	Panamericana	La Cruz	1.63	1.5	1.74	Igual	1.63	1.62	0.12	0.01	1.5	1.74	0.009
LC67	Est.la Cruz	La Cruz	1.22	1	1.08	Igual	1.08	1.1	0.11	0.01	1	1.22	-0.004
LC69	Corraleo de Juarez	La Cruz	1.04	0.9	1.45	Media alta	1.04	1.13	0.29	0.08	0.9	1.45	0.027
M1	Lázaro Cárdenas	Meoqui	1.77	1.54	1.61	Igual	1.61	1.64	0.12	0.01	1.54	1.77	-0.004
M5	Col. 10 de Mayo	Meoqui	5.03	9.4	7.05	Media alta	7.05	7.16	2.19	4.78	5.03	9.4	0.026
M6	Potrero del Llano	Meoqui	3.38	3.16	3.39	Igual	3.38	3.31	0.13	0.02	3.16	3.39	0.005
M19	El Torreón	Meoqui	1.86	2.58	3.12	Alta	2.58	2.52	0.63	0.40	1.86	3.12	0.059
M21	Gpe. Victoria	Meoqui	5.12	5.23	5.63	Media alta	5.23	5.33	0.27	0.07	5.12	5.63	0.028
M22	Los García	Meoqui	3.04	2.13	3.47	Alta	3.04	2.88	0.68	0.47	2.13	3.47	0.045
M22.2	Los García	Meoqui	3.04	2.13	3.01	Media alta	3.01	2.73	0.52	0.27	2.13	3.04	0.018
M23	Loreto	Meoqui	3.27	3.04	3.39	Media alta	3.27	3.23	0.18	0.03	3.04	3.39	0.012
M24	Las Puentes	Meoqui	2.46	2.4	2.85	Media alta	2.46	2.57	0.24	0.06	2.4	2.85	0.024



M25	Gran Morelos	Meoqui	3.14	2.95	3.15	Igual	3.14	3.08	0.11	0.01	2.95	3.15	0.005
M26	Fco. Portillo	Meoqui	1.09	0.98	0.91	Igual	0.98	0.99	0.09	0.01	0.91	1.09	-0.008
M27	Nuevo Loreto	Meoqui	1.65	1.76	1.67	Igual	1.67	1.69	0.06	0.00	1.65	1.76	-0.001
M39	Buenavista	Meoqui	2.01	2.13	1.93	Igual	2.01	2.02	0.10	0.01	1.93	2.13	-0.007
M40	Est. Consuelo	Meoqui	1.95	1.77	1.85	Igual	1.85	1.86	0.09	0.01	1.77	1.95	-0.002
M40.2	Est. Consuelo	Meoqui	1.95	1.77	1.76	Igual	1.77	1.83	0.11	0.01	1.76	1.95	-0.002
M41	Nvo. San Lucas	Meoqui	1.39	1.43	1.49	Igual	1.43	1.44	0.05	0.00	1.39	1.49	0.005
M42	Progreso	Meoqui	6.27	6.08	6.45	Media alta	6.27	6.27	0.19	0.03	6.08	6.45	0.015
M43	Lomas Consuelo	Meoqui		1.55	1.96	Media alta	1.76	1.76	0.29	0.08	1.55	1.96	0.027
R2	Barranco Bco.	Rosales	1.54	1.5	1.6	Igual	1.54	1.55	0.05	0.00	1.5	1.6	0.005
R3	Santa Rita de Casia	Rosales	2.03	1.99	1.78	Baja	1.99	1.93	0.13	0.02	1.78	2.16	-0.016
R7	Salón de Actos	Rosales	6.52	5	5.57	Baja	5.57	5.7	0.77	0.59	5	6.52	-0.024
R30	San Valentín	Rosales	1.99	1.06	2.55	Alta	1.99	1.87	0.75	0.57	1.06	2.55	0.053
R35	La Garita	Rosales	2.39	0.97	0.94	Baja	0.97	1.43	0.83	0.69	0.94	2.39	-0.055
R38	Orinda	Rosales	2.23	1.98	1.84	Baja	1.98	2.02	0.20	0.04	1.84	2.23	-0.018
S44	Ampliacion la Merced	Saucillo	1.65	1.8	1.85	Igual	1.8	1.77	0.10	0.01	1.65	1.85	0.009
S45	Bella Vista	Saucillo	2.03	1.7	1.55	Baja	1.7	1.76	0.25	0.06	1.55	2.03	-0.021
S46	Santa Rosa	Saucillo	1.01	1	0.94	Igual	1	0.98	0.04	0.00	0.94	1.01	-0.004
S47	Orranteño	Saucillo	1.63	1.3	1.31	Baja	1.31	1.41	0.19	0.04	1.3	1.63	-0.012
S50	Altamirano	Saucillo	1.03	1.1	1.14	Igual	1.1	1.09	0.06	0.00	1.03	1.38	-0.005
S52	Fco. I. Mad. (Gato N.)	Saucillo	1.98	1.4	2.18	Baja	1.98	1.85	0.41	0.16	1.4	3.04	-0.017
S54	Gomeño	Saucillo	1.55	1.3	1.52	Igual	1.52	1.46	0.14	0.02	1.3	1.55	0.003
S56-3	Saucillo P3	Saucillo		0.7	0.75	Igual	0.73	0.73	0.04	0.00	0.7	0.75	0.003
S56-8	Saucillo P8	Saucillo			0.62		0.62	0.62	#¡DIV/0!	#¡DIV/0!	0.62	0.62	
S57	Col. Vicente Gro.	Saucillo	1.02	1	0.89	Igual	1	0.97	0.07	0.00	0.89	1.02	-0.007
S58	Fco. Mezquital	Saucillo	1.77	1.7	1.57	Baja	1.7	1.68	0.10	0.01	1.57	1.77	-0.011
S59	Pto. del Toro	Saucillo	1.09	1.1	0.99	Baja	1.09	1.06	0.06	0.00	0.99	1.76	-0.025
S60	Parritas	Saucillo	0.91	0.7	0.64	Baja	0.7	0.75	0.14	0.02	0.64	0.91	-0.011
S62	Est. Conchos	Saucillo	1.8	1.7	1.69	Baja	1.7	1.73	0.06	0.00	1.69	2	-0.011
S98	Est. Saucillo	Saucillo	1.4	2.4	1.32	Baja	1.4	1.71	0.60	0.36	1.32	2.4	-0.026



Prueba de t de Student (significancia) para cada pozo, acuífero Meoqui-Delicias.

Muestra	Municipio	Localidad	R	n	tc	t student (5%)	t student (10%)	t student (15%)	t student (20%)				
D126	Delicias	Fco. I. Madero	0.7001	7	0.7371	3.1634	No hay correlación	2.5706	No hay correlación	2.2423	No hay correlación	2.0150	No hay correlación
D127	Delicias	Col. Morelos	0.3722	7	0.3774	3.1634	No hay correlación	2.5706	No hay correlación	2.2423	No hay correlación	2.0150	No hay correlación
D129	Delicias	La Merced	0.4588	7	0.4688	3.1634	No hay correlación	2.5706	No hay correlación	2.2423	No hay correlación	2.0150	No hay correlación
D130	Delicias	Santa Fe	0.7991	7	0.8556	3.1634	No hay correlación	2.5706	No hay correlación	2.2423	No hay correlación	2.0150	No hay correlación
D131	Delicias	Vicente Guerrero	0.3191	7	0.3224	3.1634	No hay correlación	2.5706	No hay correlación	2.2423	No hay correlación	2.0150	No hay correlación
D133	Delicias	Las Virgínicas	0.8812	7	0.9588	3.1634	No hay correlación	2.5706	No hay correlación	2.2423	No hay correlación	2.0150	No hay correlación
D134	Delicias	Hidalgo	0.1575	7	0.1579	3.1634	No hay correlación	2.5706	No hay correlación	2.2423	No hay correlación	2.0150	No hay correlación
D136	Delicias	Armendariz	0.1330	7	0.1333	3.1634	No hay correlación	2.5706	No hay correlación	2.2423	No hay correlación	2.0150	No hay correlación
D137	Delicias	Ejido El Diez	0.2858	7	0.2882	3.1634	No hay correlación	2.5706	No hay correlación	2.2423	No hay correlación	2.0150	No hay correlación
D138	Delicias	Col. Nicolas Bravo	0.1010	7	0.1011	3.1634	No hay correlación	2.5706	No hay correlación	2.2423	No hay correlación	2.0150	No hay correlación
D139	Delicias	Col. Campesina	0.7956	7	0.8512	3.1634	No hay correlación	2.5706	No hay correlación	2.2423	No hay correlación	2.0150	No hay correlación
J9	Julimes	San José	0.9826	4	1.3664	6.2053	No hay correlación	4.3027	No hay correlación	3.4428	No hay correlación	2.9200	No hay correlación
J10	Julimes	La Regina	0.9677	4	1.3270	6.2053	No hay correlación	4.3027	No hay correlación	3.4428	No hay correlación	2.9200	No hay correlación
J11	Julimes	Esperanza	0.9961	3	11.3521	25.4517	No hay correlación	12.7062	No hay correlación	8.4490	No hay correlación	6.3138	No hay correlación
J12	Julimes	Labor Nueva	0.9290	4	1.2321	6.2053	No hay correlación	4.3027	No hay correlación	3.4428	No hay correlación	2.9200	No hay correlación
J13	Julimes	La Boquilla		2	#iDIV/0!	#iNUM!	#iDIV/0!	#iNUM!	#iDIV/0!	#iNUM!	#iDIV/0!	#iNUM!	#iDIV/0!
J14	Julimes	El Carrizo	0.9877	3	6.3233	25.4517	No hay correlación	12.7062	No hay correlación	8.4490	No hay correlación	6.3138	No hay correlación
J15	Julimes	Julimes	0.9770	4	1.3513	6.2053	No hay correlación	4.3027	No hay correlación	3.4428	No hay correlación	2.9200	No hay correlación
J16	Julimes	ExH Humboldt	0.8994	3	2.0574	25.4517	No hay correlación	12.7062	No hay correlación	8.4490	No hay correlación	6.3138	No hay correlación
J17	Julimes	El Gramal	0.9993	3	26.7074	25.4517	No hay correlación	12.7062	No hay correlación	8.4490	No hay correlación	6.3138	No hay correlación
J18	Julimes	Las Arenillas	0.9261	4	1.2254	6.2053	No hay correlación	4.3027	No hay correlación	3.4428	No hay correlación	2.9200	No hay correlación
LC63	La Cruz	Las Pintas	0.4703	4	0.4987	6.2053	No hay correlación	4.3027	No hay correlación	3.4428	No hay correlación	2.9200	No hay correlación
LC64	La Cruz	Panamericana	0.7466	3	1.1222	25.4517	No hay correlación	12.7062	No hay correlación	8.4490	No hay correlación	6.3138	No hay correlación
LC67	La Cruz	Est.la Cruz	0.3072	3	0.3229	25.4517	No hay correlación	12.7062	No hay correlación	8.4490	No hay correlación	6.3138	No hay correlación
LC69	La Cruz	Corraleo de Juárez	0.9197	3	2.3420	25.4517	No hay correlación	12.7062	No hay correlación	8.4490	No hay correlación	6.3138	No hay correlación
M1	Meoqui	Lázaro Cárdenas	0.3635	3	0.3901	25.4517	No hay correlación	12.7062	No hay correlación	8.4490	No hay correlación	6.3138	No hay correlación
M5	Meoqui	Col. 10 de Mayo	0.1122	3	0.1130	25.4517	No hay correlación	12.7062	No hay correlación	8.4490	No hay correlación	6.3138	No hay correlación
M6	Meoqui	Potrero del Llano	0.3936	3	0.4281	25.4517	No hay correlación	12.7062	No hay correlación	8.4490	No hay correlación	6.3138	No hay correlación
M19	Meoqui	El Torreón	0.8997	3	2.0607	25.4517	No hay correlación	12.7062	No hay correlación	8.4490	No hay correlación	6.3138	No hay correlación
M21	Meoqui	Gpe. Victoria	0.9988	3	20.3879	25.4517	No hay correlación	12.7062	No hay correlación	8.4490	No hay correlación	6.3138	No hay correlación
M22	Meoqui	Los García	0.6328	3	0.8172	25.4517	No hay correlación	12.7062	No hay correlación	8.4490	No hay correlación	6.3138	No hay correlación
M22.2	Meoqui	Los García	0.3450	3	0.3675	25.4517	No hay correlación	12.7062	No hay correlación	8.4490	No hay correlación	6.3138	No hay correlación
M23	Meoqui	Loreto	0.6525	3	0.8610	25.4517	No hay correlación	12.7062	No hay correlación	8.4490	No hay correlación	6.3138	No hay correlación
M24	Meoqui	Las Puentes	0.9611	3	3.4819	25.4517	No hay correlación	12.7062	No hay correlación	8.4490	No hay correlación	6.3138	No hay correlación
M25	Meoqui	Gran Morelos	0.4047	3	0.4426	25.4517	No hay correlación	12.7062	No hay correlación	8.4490	No hay correlación	6.3138	No hay correlación



M26	Meoqui	Fco. Portillo	0.8799	3	1.8522	25.4517	No hay correlación	12.7062	No hay correlación	8.4490	No hay correlación	6.3138	No hay correlación
M27	Meoqui	Nuevo Loreto	0.1947	3	0.1985	25.4517	No hay correlación	12.7062	No hay correlación	8.4490	No hay correlación	6.3138	No hay correlación
M39	Meoqui	Buenavista	0.7045	3	0.9926	25.4517	No hay correlación	12.7062	No hay correlación	8.4490	No hay correlación	6.3138	No hay correlación
M40	Meoqui	Est. Consuelo	0.1931	3	0.1968	25.4517	No hay correlación	12.7062	No hay correlación	8.4490	No hay correlación	6.3138	No hay correlación
M40.2	Meoqui	Est. Consuelo	0.1931	3	0.1968	25.4517	No hay correlación	12.7062	No hay correlación	8.4490	No hay correlación	6.3138	No hay correlación
M41	Meoqui	Nvo. San Lucas	0.9678	3	3.8468	25.4517	No hay correlación	12.7062	No hay correlación	8.4490	No hay correlación	6.3138	No hay correlación
M42	Meoqui	Progreso	0.7630	3	1.1802	25.4517	No hay correlación	12.7062	No hay correlación	8.4490	No hay correlación	6.3138	No hay correlación
M43	Meoqui	Lomas Consuelo		2	#jDIV/0!	#jNUM!	No hay correlación	#jNUM!	No hay correlación	#jNUM!	No hay correlación	#jNUM!	No hay correlación
R2	Rosales	Barranco Bco.	0.8502	3	1.6148	25.4517	No hay correlación	12.7062	No hay correlación	8.4490	No hay correlación	6.3138	No hay correlación
R3	Rosales	Santa Rita de Casia	0.9809	4	1.3616	6.2053	No hay correlación	4.3027	No hay correlación	3.4428	No hay correlación	2.9200	No hay correlación
R7	Rosales	Salón de Actos	0.2950	3	0.3087	25.4517	No hay correlación	12.7062	No hay correlación	8.4490	No hay correlación	6.3138	No hay correlación
R30	Rosales	San Valentín	0.6789	3	0.9246	25.4517	No hay correlación	12.7062	No hay correlación	8.4490	No hay correlación	6.3138	No hay correlación
R35	Rosales	La Garita	0.6426	3	0.8386	25.4517	No hay correlación	12.7062	No hay correlación	8.4490	No hay correlación	6.3138	No hay correlación
R38	Rosales	Orinda	0.8634	3	1.7111	25.4517	No hay correlación	12.7062	No hay correlación	8.4490	No hay correlación	6.3138	No hay correlación
S44	Saucillo	Ampliacion la Merced	0.7970	3	1.3196	25.4517	No hay correlación	12.7062	No hay correlación	8.4490	No hay correlación	6.3138	No hay correlación
S45	Saucillo	Bella Vista	0.8361	3	1.5243	25.4517	No hay correlación	12.7062	No hay correlación	8.4490	No hay correlación	6.3138	No hay correlación
S46	Saucillo	Santa Rosa	0.9997	3	40.8126	25.4517	Si hay correlación	12.7062	Si hay correlación	8.4490	Si hay correlación	6.3138	Si hay correlación
S47	Saucillo	Orranteño	0.6077	3	0.7652	25.4517	No hay correlación	12.7062	No hay correlación	8.4490	No hay correlación	6.3138	No hay correlación
S50	Saucillo	Altamirano	0.2927	4	0.2992	6.2053	No hay correlación	4.3027	No hay correlación	3.4428	No hay correlación	2.9200	No hay correlación
S52	Saucillo	Fco. I. Mad. (Gato N.)	0.2304	4	0.2336	6.2053	No hay correlación	4.3027	No hay correlación	3.4428	No hay correlación	2.9200	No hay correlación
S54	Saucillo	Gomeño	0.2356	3	0.2424	25.4517	No hay correlación	12.7062	No hay correlación	8.4490	No hay correlación	6.3138	No hay correlación
S56-3	Saucillo	Saucillo P3		2	#jDIV/0!	#jNUM!	No hay correlación	#jNUM!	No hay correlación	#jNUM!	No hay correlación	#jNUM!	No hay correlación
S56-8	Saucillo	Saucillo P8		1	0.0000	#jNUM!	Si hay correlación	#jNUM!	Si hay correlación	#jNUM!	Si hay correlación	#jNUM!	Si hay correlación
S57	Saucillo	Col. Vicente Gro.	0.9999	3	6	25.4517	No hay correlación	12.7062	No hay correlación	8.4490	No hay correlación	6.3138	No hay correlación
S58	Saucillo	Fco.Mezquital	0.9827	3	5.3061	25.4517	No hay correlación	12.7062	No hay correlación	8.4490	No hay correlación	6.3138	No hay correlación
S59	Saucillo	Pto.del Toro	0.6507	4	0.7329	6.2053	No hay correlación	4.3027	No hay correlación	3.4428	No hay correlación	2.9200	No hay correlación
S60	Saucillo	Parritas	0.7770	3	1.2345	25.4517	No hay correlación	12.7062	No hay correlación	8.4490	No hay correlación	6.3138	No hay correlación
S62	Saucillo	Est.Conchos	0.7813	4	0.9373	6.2053	No hay correlación	4.3027	No hay correlación	3.4428	No hay correlación	2.9200	No hay correlación
S98	Saucillo	Est. Saucillo	0.4205	3	0.4634	25.4517	No hay correlación	12.7062	No hay correlación	8.4490	No hay correlación	6.3138	No hay correlación