

DOI: 10.24850/j-tyca-2020-02-09

Notas

Variación espacio-temporal de arsénico y flúor en el agua subterránea de la ciudad de Durango, México

Space-time variation of arsenic and fluoride in groundwater in the city of Durango, Mexico

Diego Armando Martínez-Cruz¹, ORCID: 0000-0002-7304-2928

María Teresa Alarcón-Herrera², ORCID: 0000-0003-1168-8544

Liliana Reynoso-Cuevas³, ORCID: 0000-0001-8736-8374

Luis Arturo Torres-Castañón⁴

¹Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología-Centro de Investigación en Materiales Avanzados, Unidad Durango, Durango, México, diego.martinez@cimav.edu.mx

²Centro de Investigación en Materiales Avanzados, Unidad Durango, Durango, México, teresa.alarcon@cimav.edu.mx

³Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología-Centro de Investigación en Materiales Avanzados, Unidad Durango, Durango, México, liliana.reynoso@cimav.edu.mx

⁴Centro de Investigación en Materiales Avanzados, Unidad Durango, Durango, México, luis.torres@cimav.edu.mx

Autor para correspondencia: María Teresa Alarcón-Herrera,
teresa.alarcon@cimav.edu.mx

Resumen

En el presente estudio se determinó el comportamiento espacial y temporal de los niveles de arsénico (As) y flúor (F) en el agua subterránea de la ciudad de Durango, México. Para ello, se integró una base de datos, la cual fue analizada mediante pruebas estadísticas no paramétricas y representada a través de sistemas de información geográfica. La base de datos incluyó 455 mediciones de As y 473 de F, obtenidas a partir de resultados de monitoreos anuales de 2012 a 2016, en 97 pozos y siete tanques que abastecen de agua a la ciudad. El análisis de los resultados muestra que las concentraciones de As y F superan los valores de referencia de los límites máximos recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS). El 88% de las determinaciones de As se encuentra en el rango de 20 a 35 $\mu\text{g/l}$ y el 84% de las mediciones de F están en el rango de 3 a 6 mg/l . El análisis del periodo 2012-2016 presenta globalmente un aumento de la concentración de As y una disminución estadísticamente significativa (p -valor < 0.01) en las concentraciones de F. Las concentraciones mayores de As y F se presentaron en las zonas: noreste, sureste y noroeste de la ciudad. Mientras que la zona sureste presentó los valores más bajos de As y F. El estudio temporal y espacial sugiere que el tipo de depósitos aluviales y las rocas volcánicas del basamento como tobas y riolitas condicionan la presencia de altas concentraciones de As y F. Sin

embargo, factores locales, como la extracción y evaporación, pueden influir en las variaciones interanuales espacio-temporal observadas.

Palabras clave: variación espacio-temporal, hidrogeoquímica, arsénico, flúor, calidad del agua subterránea.

Abstract

In the present study, the spatial and temporal behavior of the levels of arsenic (As) and fluoride (F) in the groundwater of the city of Durango was determined. To do this, a database was integrated, which was analyzed by non-parametric statistical tests and represented by geographic information systems. The database included 455 measurements of As and 473 of F, obtained from annual monitoring results from 2012 to 2016, in 97 wells and 7 tanks that supply water to the city. The analysis of the results shows that the concentrations of As and F exceed the reference values of the maximum limits recommended by the World Health Organization (WHO). 88% of the As determinations are in the range of 20 to 35 $\mu\text{g/l}$ and 84% of the F measurements are in the range of 3 to 6 mg/l . The analysis of the period 2012-2016, presents an increase in the concentration of As and a statistically significant decrease ($p\text{-value} < 0.01$) in the concentrations of F. The highest concentrations of As and F occurred in the areas: Northeast, southeast and northwest of the city. While the southeast area presented the lowest values of As and F. The temporal and spatial study suggests that the alluvial deposits and the volcanic rocks of the basement as tobas and riolites present in the areas with the highest concentrations of As and F condition the distribution of the levels of these elements in the

groundwater. However, local factors such as extraction and evaporation, influence the observed inter annual spatial-temporal variations.

Keywords: Spatial-temporal variation, hydrogeochemical, arsenic, fluoride, groundwater quality.

Recibido: 13/06/2018

Aceptado: 11/07/2019

Introducción

La ciudad de Durango es la capital del estado mexicano del mismo nombre. Se localiza en la parte noroeste de la república mexicana sobre el valle del Guadiana. La población en el área se abastece del agua subterránea que se obtiene de 97 pozos y 41 tanques de almacenamiento, los cuales están concesionados a la dependencia Aguas del Municipio de Durango (AMD), con un gasto estimado de 2 509 l/s.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) establece 0.010 mg/l como límite máximo permitido (LMP) de As en agua destinada a consumo humano (WHO, 2004). Al respecto, la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 establece como LMP 0.025 mg/l (SSA, 1995). En

el caso del F, ambos lineamientos, la OMS y la NOM-127-SSA1-1994, establecen 1.5 mg/l como LMP de este elemento en agua para consumo humano.

Diversos estudios sobre calidad del agua subterránea en la ciudad han reportado concentraciones de As y F superiores a los límites máximos (LMP). En el caso de As, dos estudios han reportado que prácticamente todas las mediciones efectuadas para la ciudad están fuera de los LMP. El primer estudio sobre la temática en 2001 indicó concentraciones de As en el agua subterránea de 0.028 a 0.092 mg/l (Alarcón, Flores, Romero, Martín, & Trejo, 2001). Estudios realizados 10 años después reportan un incremento en la concentración del metaloide en el agua con valores de As entre 0.021 y 0.0528 mg/l (Chávez, 2010).

En el caso de F, se ha reportado desde 1997 que 96% de los pozos excedía el LMP recomendado por la OMS y 84% de los pozos superó entre 2 y 3 veces el límite (Trejo, Alarcón, Martínez, Romero, & Salvador, 1997). En el estudio de Ortíz, Castro, Turrubiartes, Milan y Diaz (1998) se evaluó el riesgo de exposición al F en agua potable para los habitantes de la ciudad de Durango, para esto se recolectaron 212 muestras de agua en tomas domiciliarias (agua de grifo); los valores encontrados estuvieron en un rango de 1.0 a 5.6 mg/l. El estudio concluye que 95% de la población en la ciudad de Durango estaba expuesta a concentraciones mayores de 2 mg/l.

La hidroquímica de un acuífero está determinada por procesos naturales, como la precipitación, deposición atmosférica de sales, evapotranspiración, interacciones agua-roca/suelo y actividades antrópicas. Tanto los procesos naturales como los antrópicos varían a

través del tiempo y el espacio, lo cual resulta en variaciones hidroquímicas espaciales y temporales en una región (Machiwal & Jha, 2015). Estudios anteriores de la calidad de agua subterránea en la ciudad de Durango han estado limitados a una muestra de la totalidad de pozos o a un periodo de muestreo corto, por lo que no han permitido evaluar la estabilidad temporal y espacial de estas concentraciones en el área de estudio; ello no permite establecer si las variaciones en las concentraciones reportadas en los diferentes estudios son estacionales o anuales.

El análisis espacio-temporal de las concentraciones de As y F es útil para caracterizar espacialmente y dar mayor certidumbre al riesgo asociado con estas concentraciones en la población, y ayuda en la identificación y comprensión de los procesos que controlan sus niveles en el agua subterránea. También brinda información necesaria para el manejo del recurso hídrico y para el desarrollo de posibles tratamientos para la remoción de tales contaminantes. Asimismo, sirve como guía en futuros estudios y análisis que permitan establecer un modelo conceptual del funcionamiento hidrogeoquímico del sistema, con énfasis en As y F.

Por ello, el objetivo del presente estudio fue determinar el comportamiento espacial y temporal de los niveles de As y F en el agua subterránea de la ciudad de Durango. Para ello se conjuntó la información y se analizó mediante sistemas de información geográfica (SIG) y pruebas estadísticas no paramétricas. La base de datos de los monitoreos anuales de estos elementos de 2012 a 2016 fue de 97 pozos y siete tanques de almacenamiento en el área de estudio.

Materiales y métodos

Área de estudio

Se consideró como área de estudio el polígono de la ciudad de Durango, México, que se forma entre los paralelos $23^{\circ} 50'$ y $24^{\circ} 15'$ de latitud norte, y los meridianos $104^{\circ} 20'$ y $104^{\circ} 50'$ de longitud oeste, dentro del cual están contenidos principalmente los límites del centro de población (Figura 1).

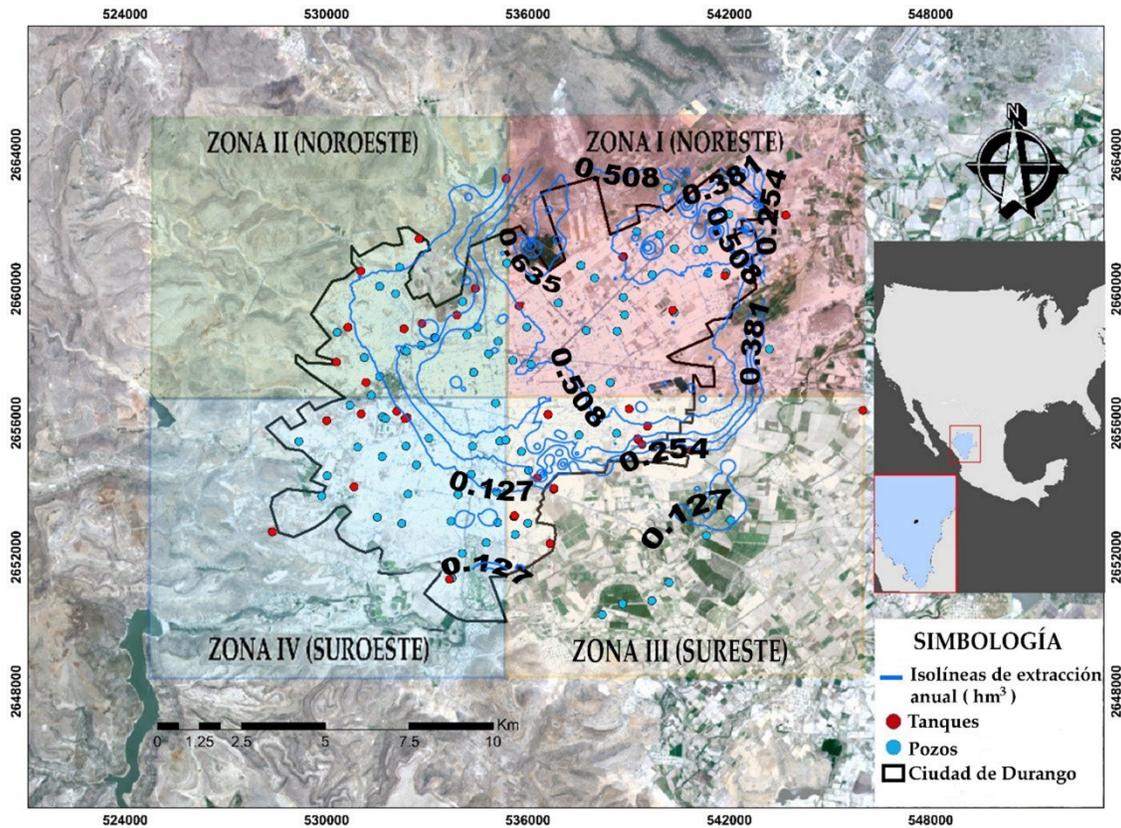


Figura 1. Ubicación de pozos y tanques monitoreados, isolíneas de volúmenes de extracción anual (hm^3) y zonificación empleada en el área de estudio. Fuente: Conagua (2018).

De acuerdo con la clasificación climatológica de Köppen, modificada por García (1998), el clima de la ciudad corresponde al grupo de climas secos, al tipo de climas semisecos y al subtipo semiseco templado, con lluvias en verano. Su temperatura media anual es de $16.7\text{ }^{\circ}\text{C}$, con una máxima promedio de $35.77\text{ }^{\circ}\text{C}$ y mínima promedio de $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ en invierno. La precipitación media anual es de 546 mm , con una máxima en 24 horas de 82 mm , y una evaporación potencial promedio

de 2 448 mm. Los vientos dominantes se dan en dirección sudoeste a noreste, con velocidades máximas de 60 km/hora.

Hidrología superficial y subterránea

La ciudad de Durango se ubica dentro de cuenca del río San Pedro y la subcuenca del río Durango. En esta zona existe un coeficiente de escurrimiento de 0 a 5% y la dirección del flujo de las aguas subterráneas es de oeste a este (Conagua, 2009). En el área de estudio se encuentran importantes aprovechamientos de agua superficial, como las presas Presidente Guadalupe Victoria, que almacena las aguas del río El Tunal; la presa Peña del Águila, localizada al norte del municipio, que regula los escurrimientos del río del mismo nombre; las corrientes intermitentes en la superficie del valle del Guadiana; los ríos El Tunal y la Saucedá, y otros de menor importancia, como el río Chico, las Bayas, el Cajón y las Tinajas (Conagua, 2009).

Respecto a las aguas subterráneas, el manto freático de la ciudad de Durango pertenece a la parte norte del acuífero del “Valle del Guadiana”. La explotación de este manto acuífero del Valle del Guadiana es para diversos usos agrícolas, industriales y urbanos; se realiza a través de manantiales y pozos, alcanzando una extracción de 144.79

hm³/anuales, mientras que la recarga del mismo se estima en unos 131.9 hm³/anuales (Conagua, 2015).

La zona que comprende desde la mancha urbana de la ciudad de Durango hasta los poblados Ferrería, 20 de Noviembre y Cinco de Mayo se encuentran en niveles estáticos de 10 a 30 m. El acuífero Valle del Guadiana, de acuerdo con su composición geológica y comportamiento en pruebas de bombeo, es de tipo libre y está formado principalmente por material granular sedimentario y conglomerado; su geometría presenta una frontera inferior hasta de 300 m de profundidad, observándose que su espesor se reduce de modo considerable hacia los flancos (Conagua, 2015).

Geología

En el área de estudio se encuentran las rocas ígneas extrusivas del tipo tobas riolíticas, que se localizan en la mayor parte de la zona de estudio. Es una roca que presenta porosidad en su textura, muy resistente. La roca ígnea extrusiva ácida del tipo toba riolítica-ignimbrita localizada en el sur y sureste es más dura. En la gran mayoría de la zona de estudio, la matriz acuífera corresponde a formaciones aluviales. En la parte suroeste se encuentran capas areno limosas, también de origen aluvial (SGM, 2015a; SGM, 2015b).

Muestreo y análisis

Para la realización del presente estudio se consideró la información proporcionada por AMD, integrándose en una base de datos, en la cual AMD reporta que las campañas de muestreo anuales en pozos y tanques en el área de estudio fueron efectuadas siempre en los meses de abril a agosto. Para cada año del periodo 2012-2015, se determinaron las concentraciones de As y F en alrededor de 85% de los pozos y 20% de los tanques que abastecen a la ciudad de Durango con agua para consumo humano.

De acuerdo con AMD, las determinaciones analíticas fueron coordinadas por el laboratorio de ingeniería ambiental de la Comisión Nacional del Agua (Conagua), delegación Durango. El método para la determinación de As fue mediante espectrometría de absorción atómica con generador de hidruros (Secofi, 2001a). Los fluoruros se determinaron por el método de electrodo de ion selectivo (ISE) con base en el método establecido por la NMX-AA-077-SCFI-2001 (Secofi, 2001b).

Variación temporal de los niveles de As y F

Las mediciones anuales de As y F para el periodo de estudio 2012-2016, efectuadas en la gran mayoría de los pozos y tanques de la ciudad de Durango, permitió analizar de forma sistemática las variaciones anuales y su significancia estadística. Para esto se empleó la prueba estadística no paramétrica de Friedman (Helsel & Hirsch, 2002). Dicha prueba no paramétrica para medidas repetidas es la alternativa cuando no se cumplen los supuestos necesarios para usar la ANOVA de un factor. Los sitios de muestreo (pozos y tanques) se agruparon en hileras y los años del periodo en columnas. Mediante esta prueba sólo se determinó si las diferencias interanuales en las concentraciones de As y F eran estadísticamente significativas. Además, se llevó a cabo la prueba de Conover, la cual, mediante la comparación por pares entre años, indica si son diferentes entre sí (Helsel & Hirsch, 2002).

Además, a través del análisis de los estadísticos descriptivos, dispersión y funciones de distribución de probabilidad empírica de las concentraciones de As y F, se obtuvo información de la estructura de los datos y características de las fuentes de abastecimiento de agua potable en la zona de estudio. Los procedimientos estadísticos se realizaron con el *software R package* versión 3.4.1 (R Core Team, 2018).

Variación espacial de los niveles de As y F

Para realizar el análisis espacial de los niveles de concentración de As y F en el agua subterránea de la ciudad de Durango se interpolaron los datos observados en los pozos del área de estudio. Se creó una capa de isoconcentraciones de As y F para cada año del periodo de estudio. Se ocupó el método de interpolación IDW, mediante la extensión *Spatial Analysis* del software *ArcGIS* v.10.3 (Copyright ESRI Inc., Redlands, CA, EUA). Se interpolaron capas de isoconcentración de As y F con base en los valores de interés mostrados en la Tabla 1. Estos resultados se sobrepusieron en la imagen Landsat 8 del 12 de junio de 2017.

Tabla 1. Clasificación de concentraciones de As y F empleada en el análisis espacial.

Rangos de clasificación de As			Rangos de clasificación de F		
Rango (µg/l)	Evaluación OMS ¹	Evaluación NOM 127 ²	Rango (mg /L)	Evaluación OMS ¹	Evaluación NOM 127 ²
15-20	> LMR	< LMR	2.7-4.5	> LMR	> LMR
21-25	> LMR	< LMR	4.6-6.0	> LMR	> LMR
26-30	> LMR	> LMR	6.1-7.5	> LMR	> LMR
> 30	> LMR	> LMR	> 7.5	> LMR	> LMR

¹(WHO, 2004).

²NOM-127-SSA1-1994 (SSA, 1995).

³Límite máximo recomendado/permisible (LMR).

Resultados y discusión

Variación temporal de los niveles de As y F 2012-2016

La Tabla 2 muestra los estadísticos descriptivos de las concentraciones observadas de As y F en pozos y tanques en el periodo de estudio. En cada año de monitoreo, del total de tanques y pozos que existen en la ciudad de Durango se hicieron determinaciones de As y F en más de 85 y 20% de los pozos, respectivamente. La concentración mínima de As observada en el periodo fue de 15 $\mu\text{g/l}$ y la concentración máxima fue de 60 $\mu\text{g/l}$. Todas las mediciones en el periodo superan el LMP establecido como seguro para consumo humano por la OMS (WHO, 2004). El 50% de las mediciones supera el LMP establecido en la NOM-127-SSA1-1994 (SSA, 1995). Predominan niveles de As que superan de dos a tres veces este LMP, pues 88% de las determinaciones de As está dentro del rango de 20 a 35 $\mu\text{g/l}$.

Tabla 2. Estadísticos descriptivos de los niveles de As y F en pozos y tanques en el periodo 2012-2016.

Año	N	As ($\mu\text{g/l}$)					F (mg/l)			
		Prom	Mín	Máx	DS		N	Prom	Mín	Máx
2012	88	26.83	15	35	4.99	90	5.32	2.80	9.30	1.55
2013	94	25.47	15	35	4.73	95	5.14	2.70	8.90	1.24
2014	92	25.80	15	40	5.20	94	5.17	3.00	8.20	1.02
2015	86	28.613	15	45	6.48	97	4.62	3.10	6.80	0.81
2016	95	31.59	15	60	9.66	97	4.44	2.60	6.80	0.783

N: número de muestras. DS: desviación estándar.

Para F, la concentración mínima observada en el periodo fue de 2.3 mg/l y la máxima de 9.3 mg/l. Todas las mediciones superan el LMP de la OMS (WHO, 2004) y de la NOM-127-SSA1-1994 (SSA, 1995). El 84% de estas mediciones de F está en el rango de 3 a 6 mg/l, por lo que la mayoría de las muestras supera los valores de referencia de dos a cuatro veces. Al final del periodo de estudio (2015 y 2016) se observó un aumento de los niveles de As y disminución de los niveles de F (Figura 2).

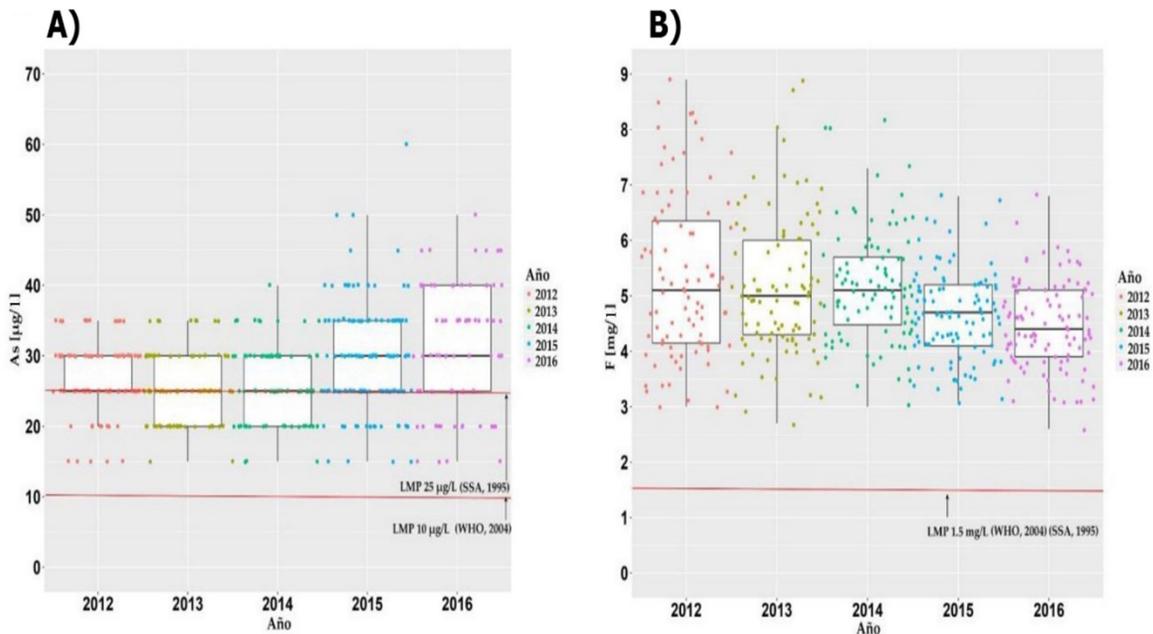


Figura 2. Comportamiento de los niveles de As y F durante el periodo de estudio (2012-2016). A) niveles de As, B) niveles de F.

Las diferencias encontradas en los niveles de As y F en los datos de este estudio y en otros similares indican la presencia de variaciones anuales y temporales de As y F en el agua subterránea de la ciudad de Durango. En el presente estudio, las mediciones anuales repetidas en un periodo de cinco años en la gran mayoría de los pozos y algunos tanques permitió analizar de manera sistemática si estas variaciones son estadísticamente significativas. Mediante la prueba de Friedman se determinó que en el periodo de análisis las variaciones anuales de As y F en el agua subterránea de la ciudad de Durango son significativas (p -valor < 0.01). Un análisis más detallado por comparación entre pares usando el test de Conover, encontró que sólo no hubo diferencias significativas en los niveles de As determinados en los años 2013 y

2014. En el caso del F no hubo diferencias significativas entre los años 2012, 2013 y 2014.

Considerando que las determinaciones analíticas de As y F fueron efectuadas en el mismo laboratorio, condiciones similares de muestreo (información verbal de AMD) sugieren que otros factores locales a corto plazo, como los cambios en la evaporación, precipitación o la extracción, provocan estas variaciones interanuales. También las variaciones estacionales no consideradas en el presente estudio por la resolución temporal de los datos pueden aumentar las variaciones interanuales observadas.

Se encontró una correlación media entre As y F al comparar todas las observaciones del periodo de estudio mediante el test de rangos de Spearman (0.39) y además resultó significativa (p -valor < 0.01). Ello apunta a que los mecanismos que provocan las variaciones observadas afectan en diferente grado los niveles de As y F. Por ejemplo, se ha reportado que sólo las concentraciones del F se incrementan por cambios en la evapotranspiración y la evaporación en regiones áridas y semiáridas (Jacks, Bhattacharya, Chaudhary, & Singh, 2005).

Distribución espacial de los niveles de As y F

En el periodo de análisis, las zonas noreste (zona I), noroeste (zona II) y sureste (zona III) presentaron mayores concentraciones de As que la zona suroeste (zona IV) (Figura 3). La distribución espacial de los niveles de As descrita en el presente estudio coincide con la presentada en estudios anteriores. Los estudios de Alarcón *et al.* (2001) y Molina-Frechero *et al.* (2013) encontraron mayores niveles de As en la parte norte, noreste y este.

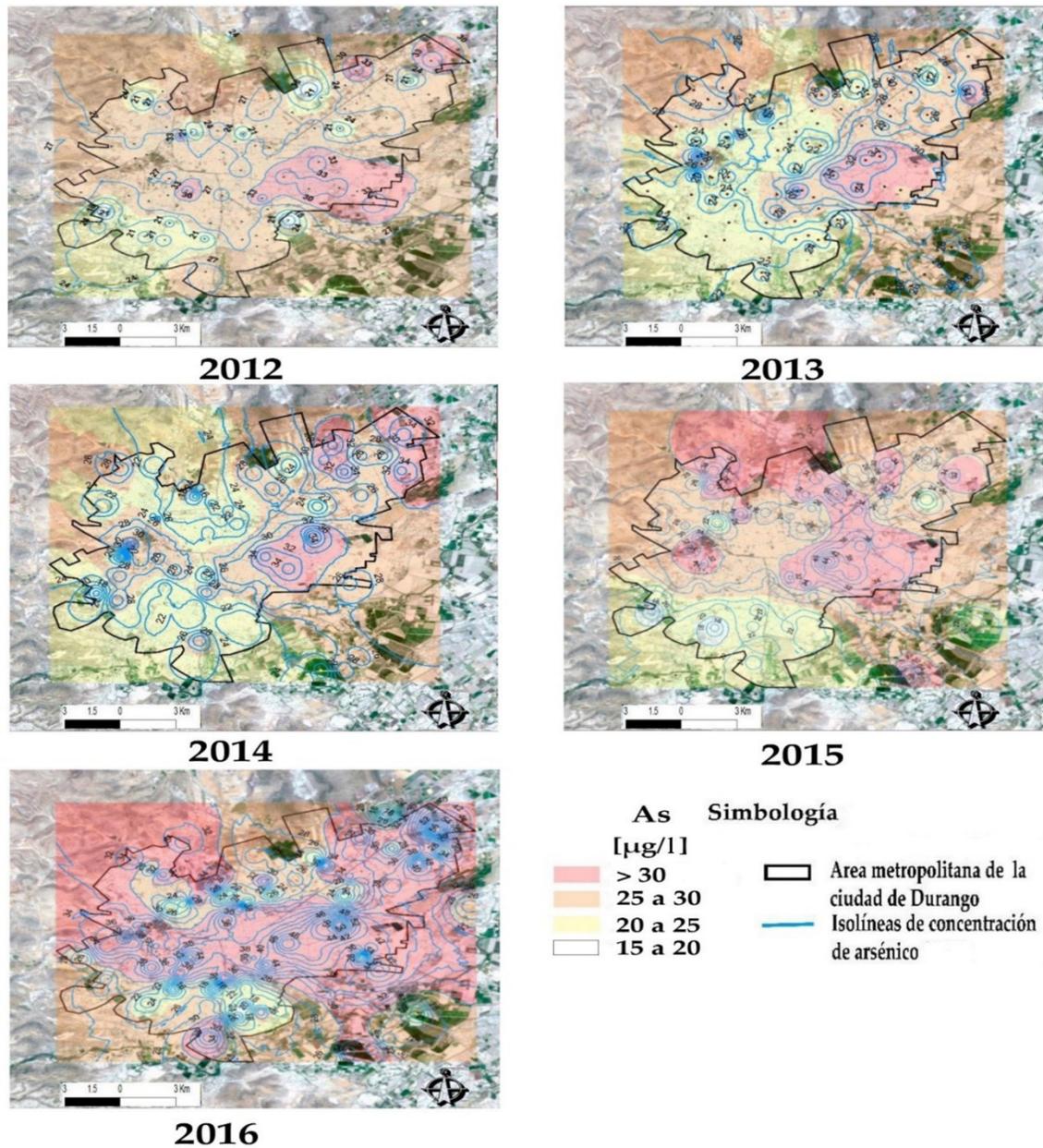


Figura 3. Variación espacial de los niveles de concentración de As, en el periodo 2012-2016.

Las zonas con las concentraciones más altas de F coinciden en su mayor parte con las áreas con las concentraciones más altas de As. En general, las que presentan mayores niveles de F son las zonas noreste (zona I), noroeste (zona II) y sureste (III). Algunas partes de ellas alcanzan concentraciones de siete veces el valor de referencia (Figura 4). La zona del suroeste (zona IV) es la que tiene los niveles más bajos de F y también de As; en ella predominan concentraciones de F de 2 a 3 veces el valor de referencia. La distribución espacial de los niveles de F encontrados en este estudio coincide en gran parte con la presentada por Ortíz *et al.* (1998), Alarcón *et al.* (2001), y Molina-Frechero *et al.* (2013).

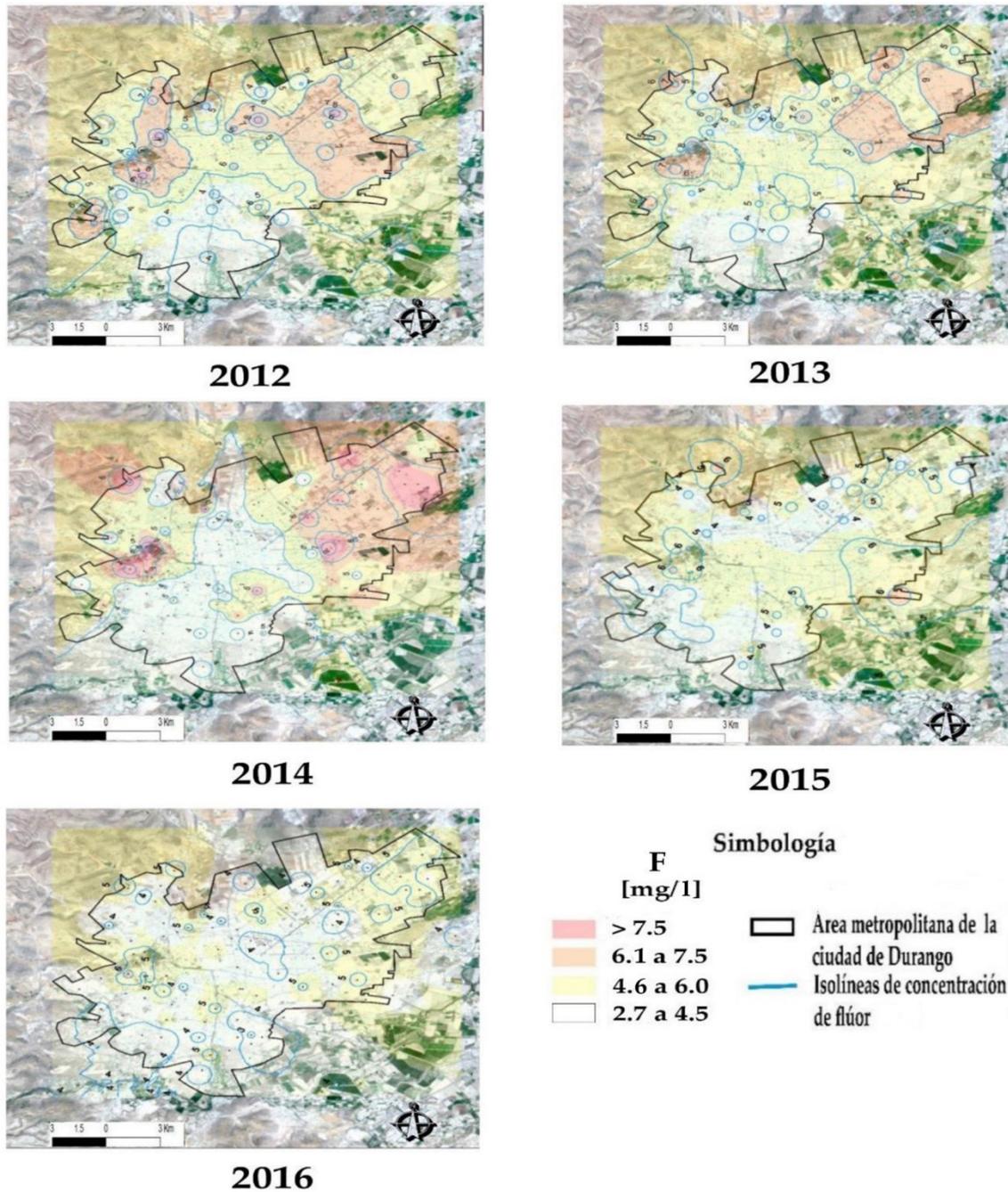


Figura 4. Variación espacial de los niveles de concentración de F en periodo 2012-2016.

Alarcón *et al.* (2001) señalan que el origen de las altas concentraciones de As es natural, pues en la zona no se efectúan actividades antrópicas importantes que favorezcan la incorporación del As en las aguas subterráneas. Además, la estructura acuífera aluvial en gran parte en la zona de estudio (SGM, 2015a; SGM, 2015b) no confinada (Conagua, 2015 favorece la incorporación de As al agua y es característico de los acuíferos con concentraciones altas de As (Arreguín, Chávez, & Soto, 2010; Ahmed *et al.*, 2004).

Respecto al posible origen de la distribución de fluoruros en el área de estudio, cada vez hay más evidencia que indica que el contenido de concentraciones anómalas de F en agua subterránea proviene del F presente en los minerales ricos en este elemento, como la fluorita, apatita y mica presentes en las rocas volcánicas riolitas y tobas (Knappett *et al.*, 2018; Banajarani *et al.*, 2019). Este tipo de estructura geológica terciaria está distribuida en gran parte de la zona de estudio; ello sugiere el origen geológico de los altos niveles de F en el agua subterránea de la ciudad de Durango.

También se identificó que en las zonas I, II y III, que presentan mayores concentraciones de As y F, predomina la estructura aluvial limosa arenosa, a diferencia de las zonas suroeste (zona IV), con depósitos areno-limosos. Este tipo de matriz acuífera, junto con la dirección del flujo de agua subterránea de suroeste a noreste, puede estar determinando en gran parte la configuración de la distribución de tales elementos.

En la zona de estudio se observó un aumento de los niveles de As en los últimos dos años (2015 y 2016). Las zonas con mayores concentraciones de As en el área de estudio (zonas I, II y III) presentan un incremento mayor que en el área con menor nivel de As (zona IV) (Figura 5a). Los incrementos en los niveles de As observados en estas zonas pueden ser resultado de la reducción de la capa freática, causada por la mayor extracción de agua subterránea efectuada ahí (Figura 1), donde la extracción es de 2 a 4 veces mayor, que en la zona con menores niveles de As (zona IV). Lo anterior se debe a que en estas zonas la densidad de población es mayor y concentra gran parte de actividades industriales en el área de estudio. El aumento de As ante la disminución del nivel freático puede ocurrir cuando la oxidación de minerales con sulfuro que contienen arsénico, principalmente arsenopirita (AsFeS_2), aumenta por la mayor presencia de oxígeno causada por la extracción agua subterránea (Farooqi, Masuda, Kusakabe, Naseem, & Firdous, 2007; Navarro, González, Júnez-Ferreira, Bautista, & Cardona, 2017).

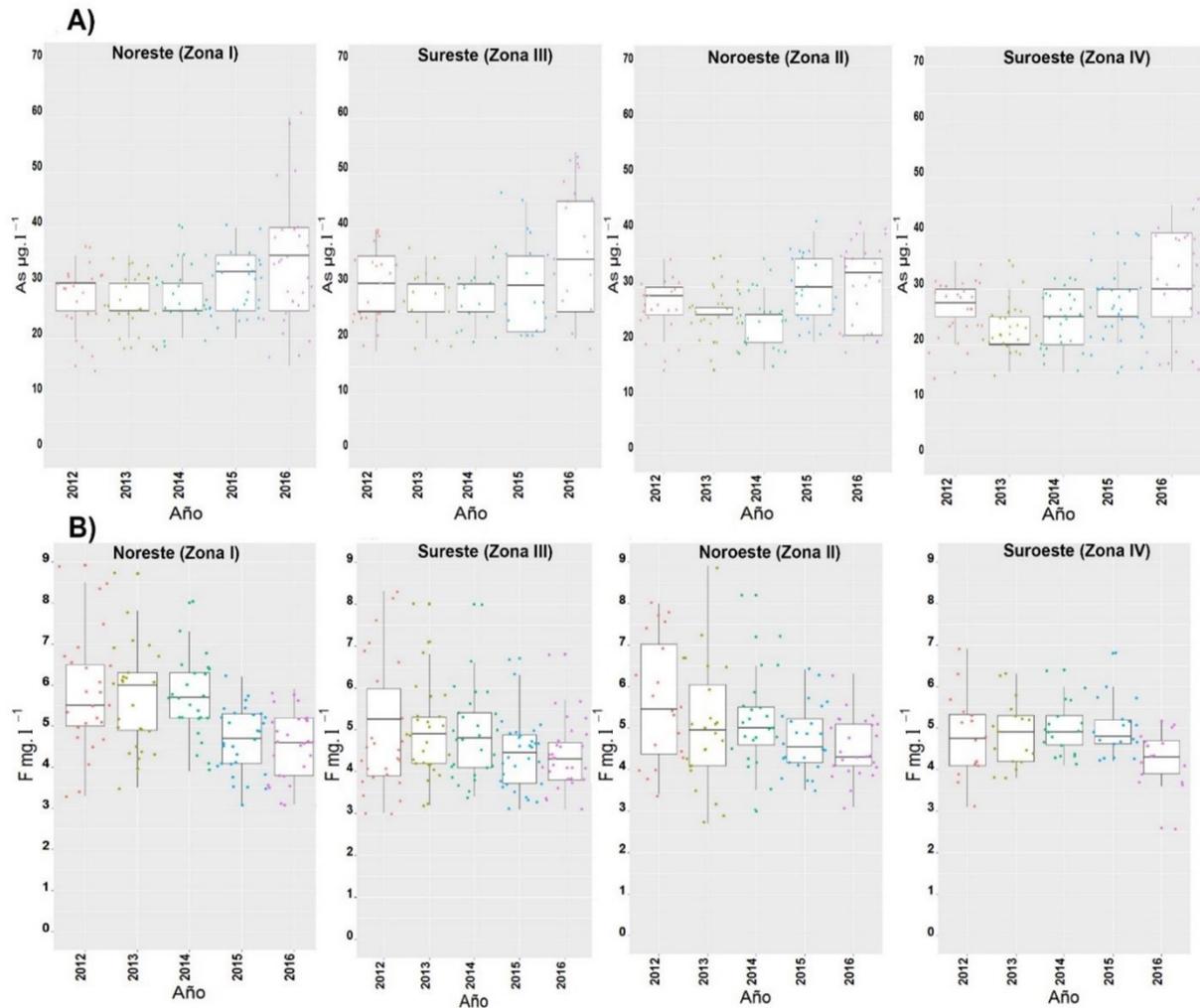


Figura 5. a) Variación espacio temporal de los niveles de As; b) variación espacio-temporal de los niveles de F.

A diferencia de las concentraciones de As, que aumentaron en los dos últimos años, en las concentraciones de F se observó una disminución en estos mismos dos años (2015 y 2016). Principalmente esta disminución se ha presentado en las zonas con mayores niveles de F zonas noreste (I), noroeste (II) y sureste (III); la zona con niveles

más bajos, zona suroeste (zona IV), se ha mantenido más estable (Figura 5b). En el caso de F, la mayor extracción de agua subterránea efectuada en las zonas I, II, III debería favorecer los incrementos en los niveles de F en estas zonas, tal como se ha reportado en otros acuíferos aluviales (Huizar-Álvarez, Carrillo-Rivera, & Juárez, 2016; Knappett *et al.*, 2018). Sin embargo, contrariamente en estas zonas se encontraron disminuciones estadísticamente significativas de los niveles de F. Este comportamiento puede ser resultado del bombeo constante, que induce a cambios en la hidrodinámica del agua subterránea; al respecto, se ha observado disminución de niveles de F en el agua subterránea en algunos acuíferos por tal factor (Abdellah, Abdel-Magid, & Yahia, 2012). Sin embargo, también se debe considerar que estos cambios pueden ser respuesta de la gran influencia que tiene la evaporación e infiltración en las concentraciones de F en las regiones áridas de México y en otras partes del mundo (Rasool *et al.*, 2017).

Conclusiones

Considerando los niveles de As y F reportados en éste y otros estudios revisados, el uso del agua subterránea de la ciudad de Durango, México, para el abastecimiento público representa un grave riesgo a la salud. En el periodo de estudio, todas las mediciones de As ($n = 455$) y de F ($n =$

473) realizadas en las fuentes de abastecimiento público de agua en la ciudad excedieron los LMP establecidos como seguros por la OMS, de 10 y 1.5 mg/l para As y F, respectivamente.

El 88% de las concentraciones de As se encuentra en el rango de 20 a 35 $\mu\text{g/l}$, predominando los niveles de concentración de As en agua, que superan de 2 a 3 veces el LMP de la OMS. Considerando el valor de la NOM-127-SSA1-1994, alrededor de 50% de las mediciones en el periodo de estudio se encuentran por debajo del LMP de 25 $\mu\text{g/l}$ para As. El 84% de las mediciones de F está en el rango de 3 a 6 mg/l, por lo que las concentraciones de F superan de 2 a 4 veces el LMP de 1.5 mg/l de los dos organismos mencionados.

La zona sureste presentó los niveles más bajos y estables de As y F. Las zonas con los niveles más altos de As y F fueron la noreste, sureste y noroeste. El estudio temporal de las concentraciones de As y F en el agua subterránea de la ciudad de Durango permitió identificar que existen variaciones interanuales significativas ($p\text{-valor} < 0.010$). Al final del periodo (2015 y 2016) se observó un aumento en los niveles de As y una tendencia a la disminución de los niveles de F. En las zonas con los niveles más altos de As y F (noreste, sureste y noroeste), se observó un mayor aumento en los niveles de As y un ligero descenso de los niveles de F ($p\text{-valor} < 0.01$). El estudio temporal y espacial sugiere que el tipo de depósitos aluviales y las rocas volcánicas del basamento como tobas y riolitas puede estar influyendo en la presencia de As y F. Sin embargo, factores locales, como la extracción, precipitación y evaporación pueden incrementar las variaciones interanuales espacio-temporales observadas.

Agradecimientos

La realización del presente estudio fue posible gracias a la aportación de información histórica de las concentraciones de As y F de las siguientes instituciones del estado de Durango: Gerencia Durango de Comisión Nacional del Agua; Aguas del Municipio de Durango (AMD); Comisión para la Protección contra Riesgos Sanitarios del Estado de Durango (Coprised), y la Comisión del Agua del Estado de Durango (CAED. El estudio fue realizado bajo el proyecto Fonciyt núm. 267666, perteneciente a la convocatoria 2016 de Conacyt- Innovate UK.

Referencias

- Abdellah, A. M., Abdel-Magid, H. M., & Yahia, N. A. (2012). Effect of long-term pumping on fluoride concentration levels in groundwater: A case study from east of Blue Nile communities of Sudan. *Journal of Applied Sciences(Faisalabad)*, 12(13), 1345-1354.
- Arreguín, F. I., Chávez, G. R., & Soto, P. R. (2010). Una revisión de la presencia de arsénico en el agua subterránea de México. *Revista Tláloc*, 45, 1-11.
- Ahmed, K. M., Bhattacharya, P., Hasan, M. A., Akhter, S. H., Alam, S. M. M., Bhuyian, M. A. H., Imam, M. B., Khan, A. A., & Sracek, O. (2004). Arsenic enrichment in groundwater of the alluvial aquifers in Bangladesh: An overview. *Applied Geochemistry*, 19(2), 181-200.

- Alarcón, H. M. T., Flores, M. I., Romero, N. P., Martín, D. I. R., & Trejo, V. R. (2001). Contenido de arsénico en el agua potable del valle del Guadiana, México. *Ingeniería hidráulica en México*, 16(4), 63-70.
- Banajarani, P., Dhanu-Radha, V., Chidambaram, S., Arindam, M., Thilagavathi, R., Manikandan, S., Thivya, C., & Ramanathan, A. L. (2019). Chapter 22 - Fluoride Contamination in Groundwater— A GIS and Geostatistics Reappraisal. In: Venkatramanan, S., Prasanna, M. V. & Chun, S. Y. (eds.). *GIS and Geostatistical Techniques for Groundwater Science* (pp. 309-322) Recuperado de <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815413-7.00022-5>
- Chávez, 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, Durango, México.
- Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2009). *Programa hídrico visión 2030 del estado de Durango*. México, DF, México: Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Recuperado de <https://www.cmic.org.mx/comisiones/Sectoriales/infraestructurahidraulic/estadisticas/estadisticas%202008/PHV2030EDURANGO2009,%20feb%2009.pdf>
- Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2018). *Registro Público de Derechos de Agua (REPDA)*. Recuperado de <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/registro-publico-de-derechos-de-agua-repda-55190>

- Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2015). *Actualización de la disponibilidad media de agua en el acuífero valle del Guadiana (1003), estado de Durango*. Recuperado de https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/durango/DR_1003.pdf
- Farooqi, A., Masuda, H., Kusakabe, M., Naseem, M., & Firdous, N. (2007). Distribution of highly arsenic and fluoride contaminated groundwater from east Punjab, Pakistan, and the controlling role of anthropogenic pollutants in the natural hydrological cycle. *Geochemical Journal*, 41(4), 213-234.
- García, E. (1998). *Climas (clasificación de Köppen, modificado por García). Escala 1:1000000*. México, DF, México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Recuperado de http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/clima1mgw.xml?_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html.xsl&_indent=no
- Helsel, D. R., & Hirsch, R. M. (2002). Statistical methods in water resources (techniques of water-resources investigations of the United States Geological Survey, Book 4, Hydrologic Analysis and Interpretation, Chapter A3). *US Geological Survey*, 1-524. Recuperado de <https://doi.org/10.2307/1269385>
- Huizar-Álvarez, R., Carrillo-Rivera, J. J., & Juárez, F. (2016). Fluoruro en el agua subterránea: niveles, origen y control natural en la región de Tenextepango, Morelos, México. *Investigaciones Geográficas*, (90), 40-58.

- Jacks, G., Bhattacharya, P., Chaudhary, V., & Singh, K. P. (2005). Controls on the genesis of some high-fluoride groundwaters in India. *Applied Geochemistry*, 20(2), 221-228.
- Knappett, P. S., Li, Y., Hernandez, H., Rodriguez, R., Aviles, M., Deng, C., & Datta, S. (2018). Changing recharge pathways within an intensively pumped aquifer with high fluoride concentrations in Central Mexico. *Science of The Total Environment*, 622, 1029-1045.
- Machiwal, D., & Jha, M. K. (2015). Identifying sources of groundwater contamination in a hard-rock aquifer system using multivariate statistical analyses and GIS-based geostatistical modeling techniques. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 4, 80-110.
- Molina-Frechero, N., Sánchez-Pérez, L., Castañeda-Castaneira, E., Oropeza-Oropeza, A., Gaona, E., Salas-Pacheco, J., & Bologna-Molina, R. (2013). Drinking water fluoride levels for a city in northern Mexico (Durango) determined using a direct electrochemical method and their potential effects on oral health. *The Scientific World Journal*, 2013, 186392, DOI: 10.1155/2013/186392
- Navarro, O., González, J., Júnez-Ferreira, H. E., Bautista, C. F., & Cardona, A. (2017). Correlation of arsenic and fluoride in the groundwater for human consumption in a semiarid region of Mexico. *Procedia Engineering*, 186, 333-340.
- Ortíz, D., Castro, L., Turrubiarres, F., Milan, J., & Diaz, F. (1998). Assessment of the exposure to fluoride from drinking water in

Durango, Mexico, using a geographic information system. *Fluoride*, 31(4), 183-187.

Rasool, A., Farooqi, A., Xiao, T., Ali, W., Noor, S., Abiola, O., Ali, S., & Nasim, W. (2017). A review of global outlook on fluoride contamination in groundwater with prominence on the Pakistan current situation. *Environmental Geochemistry and Health*, Vol. 40 (4), pp 1265–1281. Recuperado de <https://doi.org/10.1007/s10653-017-0054-z>

R Core Team. (2018). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Recuperado de <https://www.R-project.org/>

Secofi, Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. (2001a). *NMX-AA-051-SCFI-2001, Análisis de aguas. Determinación de metales por absorción atómica en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Método de Prueba*. Recuperado de <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166785/NMXA-A-051-SCFI-2001.pdf>.

Secofi, Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. (2001b). *NMX-AA-077-2001, Análisis de Aguas - Determinación de Fluoruros en Aguas Naturales , Residuales y Residuales Tratadas*. Recuperado de <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/PPD1/DO86.pdf>

SGM, Servicio Geológico Mexicano. (2015a). *Carta geológico-minera de Durango Este G13-D82*. México, DF, México: Servicio Geológico

Mexicano. Recuperado de

http://www.sgm.gob.mx/cartas/Cartas_Ed50.jsp

SGM, Servicio Geológico Mexicano. (2015b). *Carta geológico-minera de presa presidente Guadalupe Victoria F13-B11*. México, DF, México: Servicio Geológico Mexicano. Recuperado de http://www.sgm.gob.mx/cartas/Cartas_Ed50.jsp

SSA, Secretaría de Salubridad y Asistencia. (1995). 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*. Recuperado de <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/127ssa14.html>

Trejo, V. R., Alarcón, H. M. T., Martínez, L. Y., Romero, N. P., & Salvador, M. J. (1997). Niveles de fluoruros en el agua de los pozos de la ciudad de Durango. *Ingeniería Hidráulica en México*, 12(3), 51-57.

WHO, World Health Organization. (2004). *Guidelines for drinking-water quality: Recommendations* (4th ed.). Vol. 1. Geneva, Switzerland: World Health Organization.