

DOI: 10.24850/j-tyca-2025-03-08

Artículos

Concentración de fluoruros en aguas subterráneas de los Altos de Jalisco, México

Fluoride concentration in groundwater of the Jalisco Highlands, Mexico

Aldo Antonio Castañeda-Villanueva¹, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3818-9342>

¹Centro Universitario de Los Altos, Universidad de Guadalajara, Tepatitlán, Jalisco, México, acastaneda@cualtos.udg.mx

Autor para correspondencia: Aldo Antonio Castañeda, acastaneda@cualtos.udg.mx

Resumen

La principal fuente de abastecimiento de agua potable en la mayoría de las regiones administrativas del estado de Jalisco (México) son los acuíferos subterráneos, que en muchos casos son de origen hidrotermal, los cuales se caracterizan por la presencia de compuestos químicos potencialmente nocivos para la salud humana y animal. El área de estudio de este trabajo se ubica en el noreste del estado de Jalisco, que comprende 10 municipios en dos regiones administrativas. El presente

estudio tiene como objetivo determinar la tendencia de la concentración de flúor en pozos profundos que abastecen de agua potable a los municipios del área de estudio, a partir de dos evaluaciones realizadas durante los años 2021 y 2022. En los resultados se puede observar una tendencia creciente en la concentración de flúor de la mayoría de los pozos analizados en los periodos estudiados; las mayores concentraciones se reportan en las localidades de Tepatitlán, Arandas, Mexxicacán y San Miguel el Alto, así como en los municipios de Valle de Guadalupe y Cañadas de Obregón; el uso de estas fuentes como agua potable representa un mayor riesgo para la salud de la población local, lo que ratifica, asimismo, una tendencia creciente en la concentración de fluoruros en las aguas subterráneas extraídas del área de estudio; una posible causa es la continua disminución en el nivel dinámico de extracción que presentan la mayoría de los pozos evaluados. Es necesario implementar programas y estrategias para garantizar la sostenibilidad de este recurso vital en ésta y otras regiones del país.

Palabras clave: agua subterránea, Altos de Jalisco, fluoruros en agua.

Abstract

The main source for the drinking water supply in most of the administrative regions of the state of Jalisco (Mexico) is underground aquifers, which in many cases are hydrothermal origin, characterized by supply potentially harmful chemical compounds for human and animal consumption. The study area of this work is located in the northeast of the state of Jalisco, comprising 10 municipalities in two administrative regions. The objective of this study is to determine the trend of fluoride

concentration in deep wells that supply drinking water to the municipalities of the study area, based on two evaluations carried out during the years 2021 and 2022. In the results it is possible to observe an increasing trend in the fluoride concentration of most of the wells analyzed in the periods studied, the highest concentrations are reported in the towns of Tepatitlan, Arandas, Mexxicacan and San Miguel el Alto, as well as in the municipalities of Valle de Guadalupe and Canadas de Obregon, so that the intake of water from these areas represents a greater risk to the health of the local population, likewise an increasing trend in the concentration of fluorides in the groundwater extracted from the study area is ratified, one possible cause being the continuous decrease in the dynamic level of extraction that most of the wells evaluated. It is necessary to implement programs and strategies to guarantee the sustainability of this vital resource in this and other regions of the country.

Keywords: Fluorides in water, Groundwater, Jalisco Mexico.

Recibido: 04/05/2023

Aceptado: 10/04/2024

Publicado *online*: 03/05/2024

Introducción

En México, el contenido natural de compuestos con flúor en el agua subterránea varía desde 0.001 hasta 25 mg/l; los estados de la república que presentan las mayores concentraciones de fluoruros son principalmente los localizados en el centro, norte, noroeste y parte del noreste del país, precisamente las regiones que reportan alta prevalencia de fluorosis dental y esquelética (Varela *et al.*, 2013). Las principales ciudades mexicanas donde el agua potable tiene un exceso de fluoruros son Aguascalientes, Chihuahua, Durango, Hermosillo, Salamanca y San Luis Potosí (Leyva & Martínez, 2019).

Es así como 17 estados mexicanos presentan problemas por contaminación natural del agua por flúor, dicha contaminación es de origen geológico, resultado de la interacción natural que tiene el agua subterránea con algunas rocas volcánicas que se encuentran ampliamente diseminadas en la Sierra Madre Occidental y que constituye algunos de los principales acuíferos con que se abastece de agua a la población. En los estados de Baja California Norte, Durango, Aguascalientes, Zacatecas y Guanajuato, la contaminación del agua subterránea se localiza en la mayor parte del estado; mientras que en Sonora, Chihuahua, Coahuila, Nuevo León, Sinaloa, San Luis Potosí, Jalisco, Michoacán, Querétaro, Estado de México, Hidalgo y Puebla, la presencia de contaminantes se observa solo en algunas localidades (Conagua, 2018; Rosales, 2013).

Los acuíferos con concentraciones de flúor de origen natural mayor a 1.5 mg/l están sobre todo en Chihuahua, Durango, Coahuila, Aguascalientes, Zacatecas, Guanajuato, San Luis Potosí, Jalisco, Querétaro, Puebla y Guerrero (Figura 1).



Figura 1. Localización de acuíferos en México con altas concentraciones naturales de fluoruros. Fuente: IMTA (2011).

Los compuestos con fluoruros forman parte de la mayoría de los tipos de suelos, con concentraciones totales de entre 20 y 1 000 $\mu\text{g/g}$ (microgramo/gramo) en zonas sin depósitos naturales de fosfatos o fluoruros, y de hasta varios miles de $\mu\text{g/g}$ en suelos minerales con depósitos de fluoruros (Del Razo *et al.*, 2021). Las partículas de fluoruros gaseosos suspendidos en el aire tienden a acumularse en la capa

superficial del suelo, pero pueden desplazarse por toda la rizosfera, incluso en suelos calcáreos. La retención de fluoruros en el suelo depende en particular del contenido de arcilla y carbono orgánico, así como del pH del suelo (Carrillo, Cardona, & Edmunds, 2002; Alcalá, 2007).

Los fluoruros del suelo están asociados fundamentalmente con su fracción coloidal o arcillosa; en todos los tipos de suelos, los fluoruros solubles son los biológicamente importantes para las plantas y los animales (IGME, 2020). Los fluoruros son ubicuos en el medio ambiente, por ello es frecuente que las fuentes de agua los contengan, por lo menos, en pequeñas cantidades. La cantidad de fluoruros presentes de manera natural en el agua potable no fluorada (es decir, agua de bebida a la que no se han añadido deliberadamente fluoruros para prevenir la caries dental) es muy variable, pues depende del entorno geológico concreto de procedencia del agua (Aguilera, Domínguez, Acevedo, & Rojas, 2006). Los niveles pueden alcanzar hasta unos 2.0 mg/l; sin embargo, en las zonas del mundo donde la fluorosis endémica del esqueleto y/o los dientes está bien documentada, las concentraciones de fluoruros en la red de suministro del agua potable van de 3.0 a más de 20.0 mg/l (SEOP, 2019). La fluorosis dental es una condición que aparece como resultado de la ingesta de demasiado fluoruro durante el periodo de desarrollo de los dientes, generalmente desde que se nace hasta que se cumplen entre 6 y 8 años; los niveles demasiado altos de fluoruros interfieren en el buen funcionamiento de las células que forman el esmalte (odontoblastos) perturbándolas e impidiendo que el esmalte madure con normalidad. La graduación de la fluorosis va de leve a aguda, dependiendo de cuánto se haya estado expuesto a los fluoruros durante el periodo de desarrollo de los dientes; por tanto, la fluorosis dental es una anomalía de la cavidad

oral, en especial de las piezas dentales, originada por ingestión excesiva y prolongada de flúor (Lara, Cruz, & Li, 2017).

El fenómeno de percolación consiste en el paso del agua a través del suelo y las formaciones rocosas que contienen minerales, como la fluorita, criolita y fluorapatita; en este proceso, los compuestos con fluoruros se disuelven, ingresando a las fuentes subterráneas naturales de agua y son parte del ciclo biogeoquímico de los elementos químicos presentes en la naturaleza (Martínez, 2013).

El constante consumo de agua con una composición no adecuada para la salud es el posible origen de diversas enfermedades tanto en la piel, dientes huesos y órganos internos como el hígado. Así, la presencia de muchos compuestos y elementos químicos disueltos en el agua no deben superar los niveles permitidos para su adecuado y seguro consumo humano (SIWI, 2005).

De igual forma, el flúor es esencial para la estructura ósea tanto de los animales superiores como de los seres humanos; en muy bajas concentraciones o ausencia puede generar deformaciones en los huesos y articulaciones, y en concentraciones mayores a 1.0 mg/l puede ser nocivo para la salud en general (Bavera, 2006).

El flúor es un elemento importante para la salud humana y se obtiene en forma de compuestos, como los fluoruros, sobre todo a través del consumo de agua subterránea. No obstante, cuando se consume continuamente agua con más de 0.7 mg/l de fluoruros, que es el nivel máximo recomendado por la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2018), entonces se está poniendo en riesgo la salud de la población (USDHHSF, 2015).

La concentración natural de fluoruros depende de aspectos geológicos, químicos y características físicas del acuífero, la porosidad y acidez de la tierra y material pétreo, la temperatura, la acción de otros elementos químicos y la profundidad de los pozos de extracción (Huízar, Varela, & Espinoza, 2016).

La fuente principal para el suministro de agua potable en la mayoría de las regiones administrativas del estado de Jalisco (México) son los acuíferos subterráneos, que en muchos casos son de origen hidrotermal, y se caracterizan por la presencia de compuestos químicos potencialmente dañinos para el consumo humano y animal.

En México, la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021 (Secretaría de Salud, 2021), que se refiere a los límites permisibles de la calidad del agua para uso y consumo humano, en su apartado de especificaciones sanitarias químicas establece como límite máximo permisible para fluoruros el valor de 1.50 mg/l para todas las localidades; esta referencia se deberá ajustar a 1.0 mg/l conforme a la tabla de cumplimiento gradual (Tabla 1), la cual hacer referencia tanto a la densidad poblacional de las diversas localidades del territorio nacional como al año en que esas poblaciones deberán observar el nuevo límite para el contenido de fluoruros en el agua de consumo humano.

Tabla 1. NOM-127-SSA1-2021. Cumplimiento gradual para fluoruros.

Localidad	Año	Límite permisible	Unidades
Mayor de 500 000 habitantes	Un año posterior a la entrada en vigor de la presente Norma	1.0	mg/l
Entre 50 000 y 499 999 habitantes	Tres años posterior a la entrada en vigor de la presente Norma	1.0	mg/l
Menor de 500 000 habitantes	Seis años posterior a la entrada en vigor de la presente Norma	1.0	mg/l

Fuente: DOF (2022).

Cabe hacer mención que la NOM-127-SSA1-2021 entró en vigor el 26 de abril de 2023 según el *Diario Oficial de la Federación* (DOF, 2023).

Por otro lado, tanto el Departamento de Salud y Servicios Humanos como la Agencia de Protección Ambiental de EUA (USDHHSF/USEPA por sus siglas en inglés) recomiendan una concentración máxima de fluoruros en agua potable de 0.7 mg/l (USDHHSF, 2015; USEPA, 2016), buscando equilibrar los beneficios de prevenir la caries dental y fijar el límite de los efectos no deseados en la salud. Mientras que la Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR, 2020) ha calculado la referencia mínima de consumo de flúor de 0.05 mg/kg/día para una exposición oral crónica. Las dosis recomendadas en EUA y Canadá son de 4.0 mg/día para el hombre, 3.0 mg/día para la mujer, y entre 2.0 y 3.0 mg/día para niños y adolescentes (Alarcón *et al.*, 2013).

El principal objetivo del presente estudio es determinar la concentración de fluoruros en las aguas subterráneas en la región Altos

Sur del estado de Jalisco. Se pretende establecer la tendencia sobre la presencia de fluoruros que presentan los pozos profundos que abastecen de agua potable a los municipios del acuífero Tepatitlán, comparando los resultados en las evaluaciones realizadas en los años 2021 y 2022.

Asimismo, se contrastarán los resultados obtenidos con la normatividad oficial vigente en México en relación con la preservación de la salud de la población que utiliza estas fuentes de suministro para el agua potable y de consumo.

Materiales y métodos

La zona de estudio comprende esencialmente el acuífero Tepatitlán (clave 1414, según la Comisión Nacional del Agua (Conagua) (Conagua, 2018), el cual se localiza en la porción nororiental del estado de Jalisco en el occidente de México (Figura 2) abarcando una superficie de 1 940 km², aproximadamente el 2.47 % del territorio estatal (Conagua, 2002).



Figura 2. Ubicación del estado de Jalisco en la república mexicana.

Fuente: Travel By Mexico (2023).

Comprendiendo nueve municipios localizados en la región administrativa Altos Sur (Tepatitlán, Arandas, Acatic, San Miguel el Alto, Cañadas de Obregón, Mexxicacán, Valle de Guadalupe y Yahualica) y un municipio en la región administrativa Centro (Cuquío) (Figura 3), la densidad poblacional de esta zona se puede apreciar en la Tabla 2.



Figura 3. Localización de las regiones administrativas del estado de Jalisco. Fuente: Mapa Interactivo (2023).

Tabla 2. Densidad de población en la zona de estudio (2020).

Municipio	Población	Delegaciones
Tepatitlán	150 190	Pegueros, Capilla de Guadalupe, San José de Gracia, Mezcala, Capilla de Milpillas, Tecomatlán
Arandas	80 609	El Tule, Los Dolores, Santiaguito de Velázquez, Manuel Martínez Valadez
Acatic	23 175	El Refugio, Tierras Coloradas, Las Motas, Santa Rita, Tequilillas
Cuquío	17 820	Las Cruces, San Juan del Monte, Teponahuasco, Juchitlán
Mexticacán	53 076	San José de Ojuelos, San Felipe, Chimaliquin de Arriba, Cañada de Islas, El Santuario
Valle de Guadalupe	6 628	La Llave, Puerta de Macías, Alto de San Joaquín, El Bajío, La Providencia
Cañadas de Obregón	4 388	El Rosario, Temacapulín, Los Yugos, El Zapotillo, Santa Rosalía
San Miguel el Alto	31 965	Santa María del Valle, Mirandillas, San José de los Reynoso, Belén
Yahualica de González Gallo	22 394	Manalisco, Huisquilco, Río Colorado, El Baluarte, Apozol de Gutiérrez, Tecoluta
San Ignacio Cerro Gordo	18 341	Los Dolores, La Trinidad, San Vicente, Cerro Gordo

Fuente: INEGI (2021).

Mediante información de los organismos operadores del agua potable en los municipios participantes, así como varios recorridos de

campo e información geográfica, se localizaron los principales pozos profundos en operación para el suministro del agua potable en la zona de estudio, incluyendo en esta ocasión 118 pozos con niveles dinámicos de extracción promedio de 180 metros de profundidad, los cuales operan regularmente desde 4 hasta 24 horas al día, con caudales que van de 3 a 40 litros por segundo (lps).

Se realizaron campañas de muestreo y monitoreo en los pozos de extracción de la zona de estudio en 2021 y 2022, durante los meses de julio a noviembre; las muestras de agua se recolectaron como describe la normatividad mexicana (NOM-230-SSA1-2002) (DOF, 2005).

El análisis de la concentración de fluoruros se realizó en el Laboratorio para Análisis de Agua del Centro Universitario de Los Altos (Universidad de Guadalajara), observando tanto la normatividad oficial vigente (NMX-AA-077-SCFI-2001) (SCFI, 2001) como la metodología analítica incluida en los Standard Methods for Examinations of Water and Wastewater (APHA, 2017).

Las concentraciones de fluoruros se determinaron mediante el método colorimétrico "SPANDS" (Hach, 2018), el cual presenta una alta sensibilidad, con margen analítico comprendido entre 0 y 2.50 mg/l. Esta técnica utiliza los siguientes reactivos: ácido clorhídrico, oxiclورو de zirconio y arsenito de sodio (Cat. 44449-LM, Hach). El principal equipo utilizado para la determinación de fluoruros en agua subterránea fue el espectrofotómetro visible DR 2800 de la marca Hach, que consiste en un espectrofotómetro de espectro visible, con un rango de longitud de onda de 340 a 900 nanómetros (Figura 4).



Figura 4. Espectrofotómetro DR 2800 (Hach). Fuente: Hach (2018).

El equipo se calibró según especificaciones del fabricante, con el programa para determinación de fluoruros, realizando diluciones con agua desionizada estándar cuando fue necesario (1:10, 1:20).

En general, se determinaron los promedios aritméticos de cada grupo de muestras (pozos profundos), de cada sección (clave de identificación) de la zona de estudio para generar los resultados siguientes.

Resultados

La mayoría de los 118 pozos profundos utilizados como fuentes para el abastecimiento de agua potable para las poblaciones correspondientes que conformaron la zona de estudio pertenecen al acuífero Tepatitlán (clave 1414), que se localiza en la porción nororiental del estado de Jalisco, en la Región VIII Lerma-Santiago-Pacífico y que cubre una superficie aproximada de 1 940 km² (2.47 % del territorio estatal), según la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua (2015); este acuífero presenta una limitada disponibilidad (Conagua, 2018).

Con base en los datos históricos de precipitación, temperatura y evaporación de las estaciones climatológicas que cubren la zona de estudio, y con apoyo del atlas de climas escala 1:1 000 000, se observa que el área de estudio está caracterizada por tres tipos de climas: (A) C(w1) w, C(w1) (w) y C(w2) (w), que corresponden a un clima semiseco subhúmedo y templado subhúmedo (CEA-Jal, 2018a).

La concentración promedio de fluoruros en los pozos profundos durante los años evaluados de 2021 y 2022 de los 10 municipios en la zona de estudio aparecen en la Tabla 3; se observan desviaciones estándar máximas en 2021 de 0.110 y de 0.117 para 2022.

Tabla 3. Concentración promedio de fluoruros en mg/l y desviación estándar (Ds) por localidad en dos evaluaciones: 2021 y 2022.

Clave	Municipio	Localidad/descripción	Núm. pozos	2021 prom. (Ds)	2022 prom. (Ds)
T1	Tepatitlán	Tepatitlán centro	5	0.65(0.037)	0.88(0.049)
T2	Tepatitlán	Tepatitlán norte	10	1.12 (0.076)	1.34(0.083)
T3	Tepatitlán	Tepatitlán sur	6	2.10(0.093)	2.02(0.082)
T4	Tepatitlán	Tepatitlán este	11	3.20(0.097)	4.55(0.117)
T5	Tepatitlán	Tepatitlán oeste	16	3.70 (0.104)	3.97(0.102)
T6	Tepatitlán	Capilla de Guadalupe	3	1.63(0.051)	1.68(0.065)
T7	Tepatitlán	Pegueros	3	0.25(0.034)	0.18(0.047)
T8	Tepatitlán	San José de Gracia	3	0.17(0.045)	0.25(0.059)
T9	Tepatitlán	Mezcla	3	1.57(0.062)	1.59(0.074)
T10	Tepatitlán	Capilla de Milpillas	3	0.55(0.053)	0.67(0.045)
A1	Arandas	Arandas centro	4	1.21(0.077)	1.53(0.083)
A2	Arandas	Arandas norte	2	0.42(0.039)	0.78(0.086)
A3	Arandas	Arandas sur	3	0.68(0.033)	1.34(0.073)
A4	Arandas	Arandas este	4	0.36(0.086)	0.76(0.092)
A5	Arandas	Arandas oeste	6	1.09(0.110)	1.02(0.092)
SMA1	San Miguel el Alto	San Miguel el Alto centro	2	2.43(0.059)	3.76(0.083)
SMA2	San Miguel el Alto	San José de los Reynoso	1	0.38	0.56
SMA3	San Miguel el Alto	Santa María del Valle	2	0.15(0.036)	0.32(0.056)
VG1	Valle de Guadalupe	Valle de Guadalupe centro	2	3.42(0.083)	3.61(0.093)
VG2	Valle de Guadalupe	La Providencia	1	7.43	8.45
VG3	Valle de Guadalupe	Puerta de Macías	1	2.62	1.78

Clave	Municipio	Localidad/descripción	Núm. pozos	2021 prom. (Ds)	2022 prom. (Ds)
VG4	Valle de Guadalupe	Pajaritos	1	1.76	2.74
AC1	Acatic	Acatic centro	3	0.33(0.076)	0.56(0.085)
AC2	Acatic	Las Amapolas	1	0.21	0.67
Y1	Yahualica	Yahualica centro	3	0.35(0.045)	0.45(0.057)
Y2	Yahualica	Yahualica norte	2	0.53(0.090)	0.49(0.074)
Y3	Yahualica	Yahualica sur	3	0.17(0.064)	0.32(0.092)
Y4	Yahualica	Yahualica este	2	0.36(0.023)	0.47(0.061)
Y5	Yahualica	Yahualica oeste	3	0.51(0.065)	0.45(0.074)
C1	Cuquío	Cuquío centro	2	0.07(0.057)	0.11(0.073)
C2	Cuquío	Mártires del 28	1	0.33	0.53
M1	Mexticacán	Mexticacán centro	2	1.72(0.034)	3.61(0.072)
CO1	Cañadas de Obregón	Cañadas de Obregón centro	1	1.68	2.32
CO2	Cañadas de Obregón	Temacapulín centro	1	3.00	3.52
SI1	San Ignacio Cerro Gordo	San Ignacio Cerro Gordo centro	2	0.75(0.033)	1.03(0.052)

En referencia al año 2021, es posible observar una tendencia creciente en la concentración de fluoruros de la mayoría de los pozos analizados durante 2022.

De igual forma, las concentraciones de fluoruros mayores de 1.5 mg/l se encuentran en particular en la población de Tepatitlán (T3, T4, T5, T6 y T9), en el centro de la ciudad de Arandas (A1), en el centro de San Miguel el Alto, en el municipio de Valle de Guadalupe (VG1, VG2, VG3

y VG4), en el centro de la población de Mexxicacán (M1) y en el municipio de Cañadas de Obregón (CO1 y CO2).

Las localidades con mayores valores relativos en 2022 fueron principalmente las siguientes: Tepatitlán este (T4), centro de San Miguel el Alto (SM1), municipio de Valle de Guadalupe (VG2 y VG4) y Mexxicacán centro (M1), por lo que la ingesta del agua de estas zonas representa un mayor riesgo para la salud de la población local, en contraste con el resto del área de estudio (Figura 5).

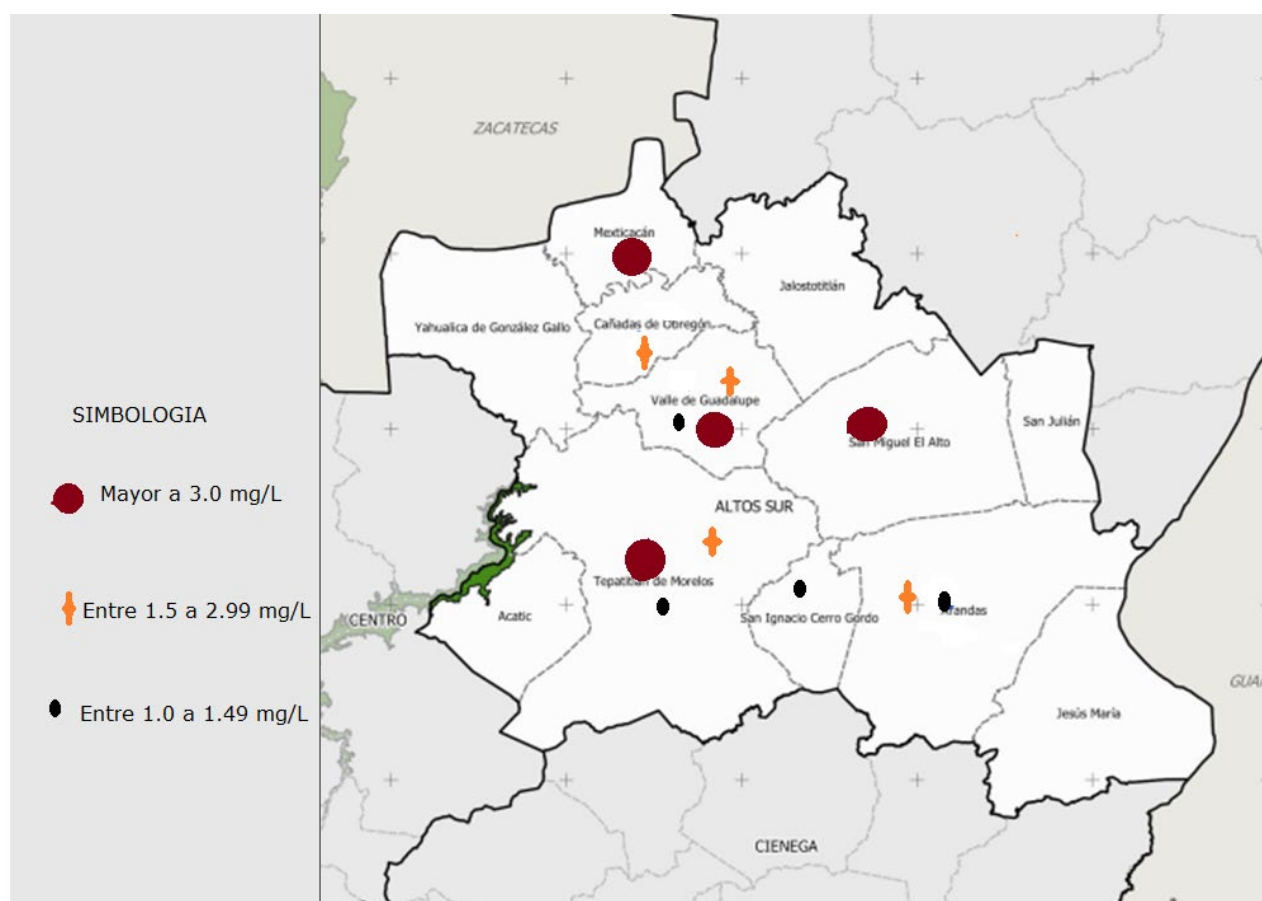


Figura 5. Localización de las mayores concentraciones de fluoruros en la zona de estudio (2022).

En la evaluación de 2022, 14 de las 35 muestras estudiadas (40 %) superan el límite máximo permisible de 1.5 mg/l para agua potable que establece la norma oficial vigente en México y el 51 % de las muestras analizadas superan la referencia de 1.0 mg/l. Realizando un comparativo entre los resultados obtenidos en 2021 y los generados en 2022 (Tabla 4), se puede observar que la mayoría sufrió incrementos (31 de 35) con porcentajes de incremento que van del 4.4 al 220 %.

Tabla 4. Variaciones entre las evaluaciones (2022 y 2021) y porcentajes de incremento.

Clave	2021	2022	Variación 2022-2021	Porcentaje de incremento (%)
T1	0.65	0.88	+0.23	35.4
T2	1.12	1.34	+0.22	7.0
T3	2.10	2.02	-	-
T4	3.20	4.55	+1.35	42.2
T5	3.70	3.97	+0.27	7.3
T6	1.63	1.68	+0.05	4.4
T7	0.25	0.18	-	-
T8	0.17	0.25	+0.08	25.5
T9	1.57	1.59	+0.02	16.1
T10	0.55	0.67	+0.12	21.8
A1	1.21	1.53	+0.32	26.5
A2	0.42	0.78	+0.36	85.7
A3	0.68	1.34	+0.66	97.1

Clave	2021	2022	Variación 2022-2021	Porcentaje de incremento (%)
A4	0.36	0.76	+0.4	11.4
A5	1.09	1.02	-	-
SMA1	2.43	3.76	+1.33	54.7
SMA2	0.38	0.56	+0.18	47.4
SMA3	0.15	0.32	+0.17	113.3
VG1	3.42	3.61	+0.19	5.5
VG2	7.43	8.45	+1.02	13.7
VG3	2.62	1.78	-	-
VG4	1.76	2.74	+0.98	55.6
AC1	0.33	0.56	+0.23	70.0
AC2	0.21	0.67	+0.46	220
Y1	0.35	0.45	+0.1	28.6
Y2	0.53	0.49	-	-
Y3	0.17	0.32	+0.15	88.2
Y4	0.36	0.47	+0.11	30.5
Y5	0.51	0.45	-	-
C1	0.07	0.11	+0.04	57.1
C2	0.33	0.53	+0.2	60.6
M1	1.72	3.61	+1.89	110
CO1	1.68	2.32	+0.64	38.1
CO2	3.00	3.52	+0.52	17.3
SI1	0.75	1.03	+0.28	27.2

Las zonas donde se presentaron los mayores incrementos en las concentraciones de los fluoruros entre las dos determinaciones fueron Acatic, Mexicacán, Arandas, San Miguel el Alto y Yahualica; los municipios que presentaron menores incrementos fueron Cuquío, Valle de Guadalupe y Tepatlán (Figura 6).

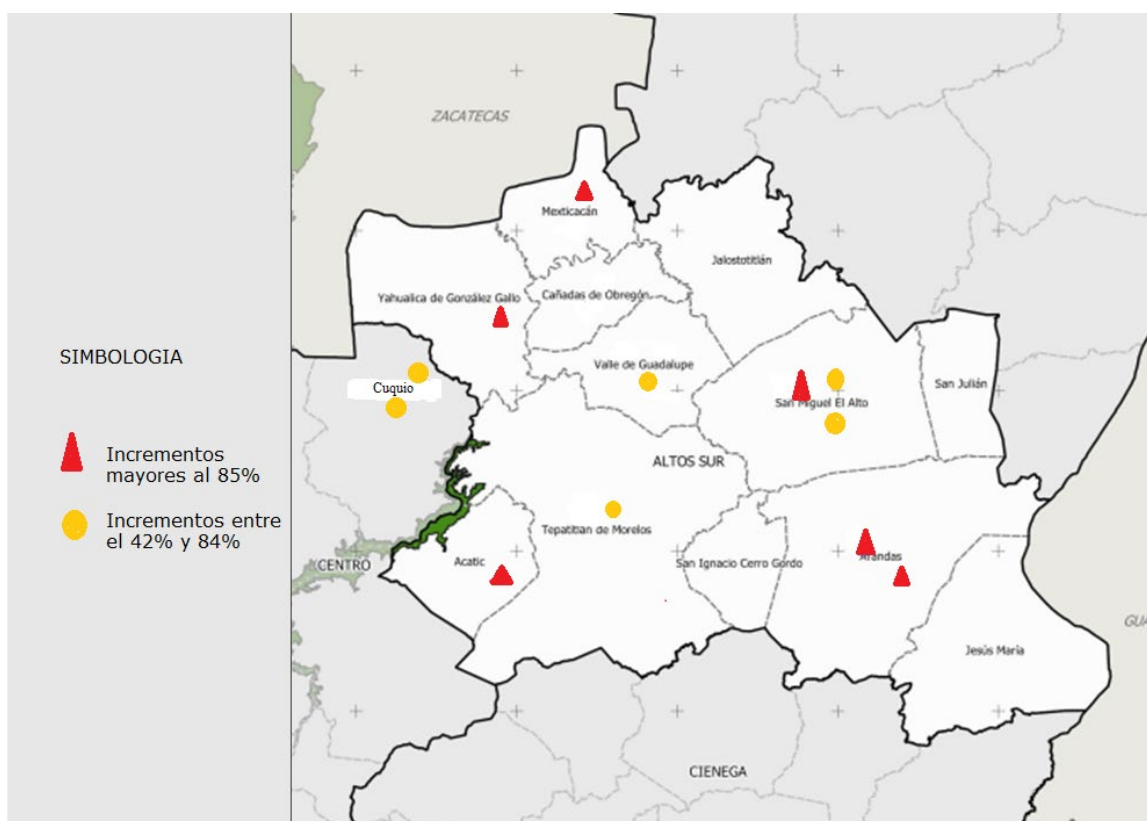


Figura 6. Localización de los mayores incrementos en las concentraciones de fluoruros en la zona de estudio (de 2021 a 2022).

Asimismo, la mayoría de los municipios estudiados presentaron incrementos mayores a 0.5 mg/l de fluoruros en sus aguas subterráneas (Figura 7).

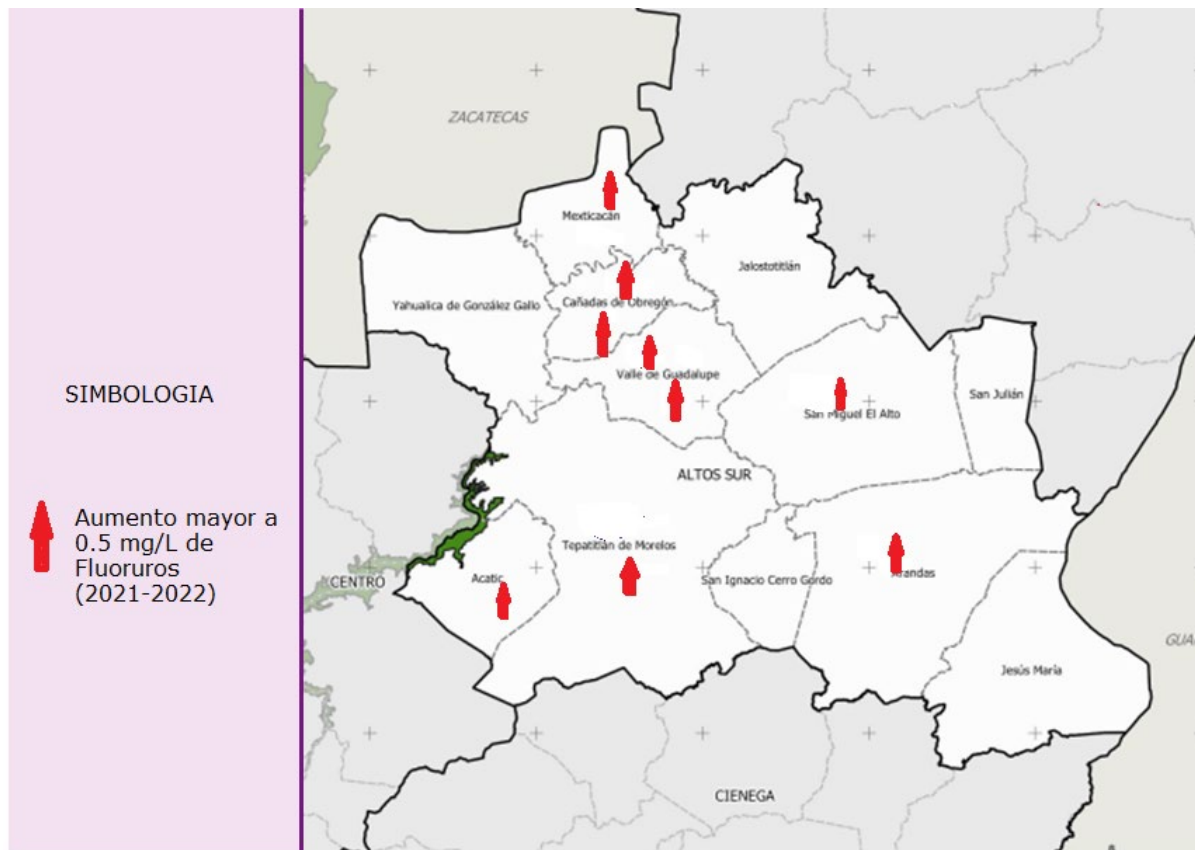


Figura 7. Localización de las zonas con aumentos mayores a 0.5 mg/l de fluoruros (de 2021 a 2022).

Discusión

La fluorosis dental se define como una hipomineralización del esmalte y de dentina relacionado con la ingesta de altas concentraciones de fluoruro en la formación del esmalte; es un problema de salud pública que afecta una amplia zona de México, principalmente las regiones centro y norte (Jiménez & López, 2020). Asimismo, Hurtado y Gardea (2005) afirman que los riesgos de ocurrencia de fluorosis dental en poblaciones de la

región alteña de Jalisco son muy altos, ya que gran parte de la población consume agua potable (embotellada o del grifo) con concentraciones mayores de 1.5 mg/l, por lo que existe la eventual prevalencia de fluorosis esquelética en las poblaciones de Teocaltiche, Mexxicacán y Temacapulín, pues los fluoruros superan concentraciones de 2.18 mg/l. También las comunidades de esta zona que consumen agua potable con cantidades de fluoruros mayores de 4.0 mg/l sin lugar a dudas están expuestas a enfermedades fluoróticas severas, como son fluorosis esquelética, fracturas óseas, cáncer, trastornos gastrointestinales y alteraciones renales (Hurtado & Gardea, 2005). Las poblaciones con mayores riesgos son las siguientes: Encarnación de Díaz, Lagos de Moreno, Mexxicacán, San Juan de los Lagos, Teocaltiche, Tepatitlán de Morelos y Valle de Guadalupe (Hurtado & Gardea, 2005).

Por otro parte, el incremento de la concentración de compuestos, como los fluoruros en las aguas subterráneas extraídas, puede ser un indicador del abatimiento dinámico (disminución sensible del nivel del agua) de los pozos profundos utilizados como fuentes de abastecimiento de agua potable (CEA-Jal, 2018b). Por ejemplo, en estudios recientes realizados en la ciudad de Tepatitlán, Jalisco, en pozos profundos para el abastecimiento de agua potable, se reporta que casi el 17 % de los pozos de la red no opera principalmente por la reducción en los niveles dinámicos (hasta 240 m de profundidad) y más del 25 % de los pozos presenta concentraciones naturales de fluoruros superiores a 1.5 mg/l. Se asume que los volúmenes de extracción son mayores que los volúmenes de recarga del acuífero; por tanto, en donde es posible se extraen aguas más profundas, lo que pone en riesgo la sustentabilidad del acuífero (Castañeda, 2020).

Es de suma importancia mantener programas continuos de monitoreo de estas fuentes de suministro, inclusive implementando mecanismos tanto para regular las altas concentración de fluoruros, como las recargas artificiales, mediante las cuales es posible mejorar las condiciones de almacenamiento de las aguas subterráneas de la región.

Los resultados y las evidencias encontradas en las presentes evaluaciones concuerdan con otros estudios realizados en la misma zona de estudio, como los realizados en los pozos para el abastecimiento del agua en las localidades de Popotes y El Pochote en el municipio de Tepatitlán (Fernández, Venegas, Fuentes, & Trujillo, 2017), donde se manifestaron tanto las altas concentración de fluoruros —sobre todo en el agua de la comunidad de Popotes— como el bajo nivel de conocimiento por parte de los usuarios sobre los efectos en la salud por el consumo de agua con altos contenidos de fluoruros (fluorosis).

En otro estudio realizado en escuelas primarias se reporta que la prevalencia de fluorosis en la ciudad de Tepatitlán era del 64.1 %, sin que existiera diferencia significativa entre hombres y mujeres en cuanto al tipo de agua que se consume: garrafón o filtrada. Los resultados no reflejaron índices menores de fluorosis, lo cual indica que los procesos de potabilización aplicados no son suficientes para reducir estos compuestos y otros minerales; también se concluyó que el 85 % de los niños que consumen agua de pozo presentan algún grado de fluorosis (Briones, 2017).

Pérez, Scherman y Hernández (2007), para el agua de consumo con alto contenido de flúor en niños de la población de Mexicacán, Jalisco, encontraron diferencias significativas en edad, tiempo de residencia, tipo

de consumo de agua y la fluorosis dental ($p < 0.05$), así como diferencias entre los promedios de concentración de flúor y los pozos de agua termal y fría ($p < 0.05$), lo cual reafirma que “el alto contenido de flúor en el agua pone en riesgo la salud dental de la población infantil”.

Por otro lado, comprender los modelos hidrogeológicos de las regiones donde se estudia la presencia de fluoruros en aguas subterráneas resulta de gran importancia para encontrar sus principales orígenes y dinámicas. Así, las unidades intergranulares (estratificada) con familias de fracturas que afectan a la secuencia de rocas duras y hacen posible el flujo hidráulico en la cadena litoestratigráfica, por lo general conforman acuíferos mixto (intergranular-fisurado), cuyas recargas tienen lugar en los relieves que delimitan las planicies correspondientes (Huízar *et al.*, 2014).

Huízar, Carrillo y Juárez (2016) concluyen en sus acercamientos sobre los fluoruros en una región del estado de Morelos que la principal fuente de este compuesto en el agua subterránea se encuentra en las rocas que conforman el relieve que rodea la planicie y principalmente en aquel ubicado fuera de la planicie (al noreste de la Sierra Nevada), lo que confirma que los fluoruros son liberados al agua subterránea por el proceso del intemperismo químico de rocas ígneas intermedias y félsicas.

Conclusiones

La tendencia hacia el aumento de la concentración de compuestos como los fluoruros en el agua subterránea extraída puede ser indicador de la eventual extracción de aguas más profundas, las cuales pueden ser aguas

fósiles, lo que presupone alteraciones en los ciclos de recarga, donde las cantidades anuales extraídas superan a los volúmenes de la recarga natural del acuífero, y significan un riesgo potencial para la adecuada sustentabilidad del acuífero.

La consistente fluorosis dental infantil predominante en la región alteña de Jalisco está vinculada con la ingesta de altas concentraciones de fluoruro, principalmente en la formación del esmalte, lo que ocasiona riesgos para la salud pública de la población; en este sentido, centros urbanos como los de Tepatitlán, Arandas, Acatic, Mexxicacán, San Miguel el Alto y Yahualica presentan mayores retos para la adecuada gestión de sus fuentes de abastecimiento subterráneas para el agua potable y de consumo. Por tanto, resulta necesario implementar programas y estrategias que garanticen la sostenibilidad hídrica en muchas regiones del país.

Agradecimientos

Reconocemos el apoyo técnico brindado por el Cuerpo Académico UDG-561 "Gestión Integral del Agua", el Laboratorio para Análisis de Aguas del Centro Universitario de Los Altos (Universidad de Guadalajara), y los organismos operadores del agua potable de los municipios participantes.

Referencias

- Aguilera, M., Domínguez, M., Acevedo, A., & Rojas, F. (2006). Niveles de fluoruro en alimentos de la cesta básica en el estado de Aragua. *Acta Odontológica Venezolana*, 1(44), 88-89. Recuperado de http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0001-63652006000100016&lng=es&tlng=es
- Alarcón, M., Bundschuh, J., Nath, B., Nicolli, H., Gutiérrez, M., Reyes, V., Nuñez, D., Martín, I., & 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. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2012.08.005
- Alcalá, M. (2007). *La contaminación de suelos y aguas: su prevención con nuevas sustancias naturales* (vol. 74). Recuperado de https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=KPcJItVcQRoC&oi=fnd&pg=PA13&dq=La+retenci%C3%B3n+de+fluoruros+en+el+suelo+depende+fundamentalmente+del+contenido+de+arcilla+y+carbono+org%C3%A1nico,+as%C3%AD+como+del+pH+del+suelo++&ots=xRDTx6B8jY&sig=3Q10zY2C56rm9ngTdGwU7-gTb_I#v=onepage&q&f=false
- APHA, American Public Health Association. (2017). *Standard methods for examinations of water and wastewater* (23rd ed.). Recuperado de https://beta-static.fishersci.com/content/dam/fishersci/en_US/documents/programs/scientific/technical-documents/white-papers/apha-water-testing-standard-methods-introduction-white-paper.pdf

- ATSDR, Agency for Toxic Substances and Disease Registry. (2020). *Agency for Toxic Substances and Disease Registry*. Recuperado de <https://www.atsdr.cdc.gov/>
- Bavera, G. (2006). Capítulo 3. Sitio argentino de producción animal. En: *Suplementación mineral y con NNP del bovino a pastoreo* (3a ed.). Recuperado de https://www.produccion-animal.com.ar/informacion_tecnica/denticion_y_protesis/29-fluor.pdf
- Briones, F. (2017). *Prevalencia de fluorosis dental en la población de 8 a 11 años en la ciudad de Tepatitlán de Morelos, Jalisco en el año 2016* (tesis especialidad Odontopediatría). CUAltos, Universidad de Guadalajara. Recuperado de https://riudg.udg.mx/bitstream/20.500.12104/83554/1/ECUALTO_S10014FT.pdf
- Carrillo, J., Cardona, A., & Edmunds, W. (2002). Use of abstraction regime and knowledge of hydrogeological conditions to control high-fluoride concentration in abstracted groundwater: San Luis Potosí basin, Mexico. *Journal Hydrology*, 26(1), 24-47.
- Castañeda, A. (2020). Increase in the concentration of fluorine compounds as indicator of the decrease in the dynamic level in groundwater in a population of western Mexico. *Journal of Research in Environmental and Earth Sciences*, 6(4), 55-65.
- CEA-Jal, Comisión Estatal del Agua Jalisco. (2018a). *Plano Semáforo agosto 2018*. Recuperado de <https://www.ceajalisco.gob.mx/contenido/dpf2018/comic/Plano%20Semaforo%20Agosto%202018/files/basic-html/page1.html>

- CEA-Jal, Comisión Estatal del Agua Jalisco. (2018b). *Acuíferos en Jalisco*. Recuperado de <https://www.ceajalisco.gob.mx/contenido/acuiferos>
- Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2018). *Estadísticas del agua en México*. Recuperado de http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2018.pdf
- Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2002). *Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Tepatitlán, estado de Jalisco*. Recuperado de <http://info.ceajalisco.gob.mx/sia/acuiferos/Tepatitlan.pdf>
- Del Razo, L., Ledón, J., Velasco, M., Armienta, M., Alfaro, M., Alarcón, M., & Martín, A. (2021). *Arsénico y fluoruro en agua: riesgos y perspectivas desde la sociedad civil y la academia en México*. Recuperado de https://www.geofisica.unam.mx/libros/IGEF_derecho_humano_al_agua_2021_1ed.pdf
- DOF, Diario Oficial de la Federación. (2023). *Se actualiza la NOM-127-SSA1-2021 enfocada en el análisis de agua para uso y consumo humano*. Recuperado de <https://thefoodtech.com/normatividad-y-certificaciones/se-actualiza-la-nom-127-ssa1-2021-enfocada-en-el-analisis-de-agua-para-uso-y-consumo-humano/#:~:text=Seg%C3%BAn%20el%20DOF%2C%20la%20norma,a%20posibles%20sanciones%20y%20multas>

DOF, Diario Oficial de la Federación. (2022). *Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021, Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua*. Recuperado de https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5650705&fecha=02/05/2022#gsc.tab=0H

DOF, Diario Oficial de la Federación. (2005). *Norma Oficial Mexicana NOM-230-SSA1-2002. Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano, requisitos sanitarios que se deben cumplir en los sistemas de abastecimiento públicos y privados durante el manejo del agua*. Recuperado de https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=2081772&fecha=12/07/2005#gsc.tab=0

Fernández, A., Venegas, E., Fuentes, M., & Trujillo, F. (2017). *Análisis de la cantidad de flúor en el agua de pozo de consumo de dos comunidades "Popotes" y "El Pochote", Tepatitlán de Morelos, Jalisco. México*. Recuperado de <https://1library.co/document/zwop2j7y-analisis-de-la-cantidad-de-fluor-en-el-agua-de-pozo-de-consumo-de-dos-comunidades-popotes-y-el-pochote-tepatitlan-de-morelos-jalisco.html>

Hach. (2018). *Manual del usuario: espectrofotómetro modelo DR 2800*. Recuperado de <https://www.hach.com/asset-get.download.jsa?id=17989943916&srsId=AfmBOorwzMUWzYGkyyH1YmWSb5Mcz0o2SX5sFIJSAyPzxw8fun1vwdhx>

- Huízar, R., Carrillo, J., & Juárez, F. (2016). Fluoruro en el agua subterránea: niveles, origen y control natural en la región de Tenextepango, Morelos, México. *Investigaciones Geográficas*, (90). DOI: 10.14350/rig.47374
- Huízar, R., Varela, G., & Espinoza, M. (2014). Sistemas de flujo subterráneo y contenido de fluoruro en el agua de Tenextepango, Morelos, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 31(2). Recuperado de https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1026-87742014000200007
- Hurtado, R., & Gardea, J. (2005). Estimación de la exposición a fluoruros en Los Altos de Jalisco, México. *Salud Pública de México*, 47(1). Recuperado de <https://www.scielosp.org/pdf/spm/v47n1/a09v47n1.pdf>
- IGME, Instituto Geológico y Minero de España. (2020). *La composición química de las aguas subterráneas naturales*. Recuperado de http://aguas.igme.es/igme/publica/libro43/pdf/lib43/1_1.pdf
- IMTA, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. (2011). *Análisis técnico y económico de tecnologías para remoción de fluoruros*. Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- INEGI, Instituto de Nacional de Estadística y Geográfica. (2021). *Panorama sociodemográfico de Jalisco. Censo de Población y Vivienda 2020*. Recuperado de https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825197872.pdf

- Jiménez, L., & López, J. (2020). *Prevalencia de fluorosis dental en mujeres de la población de "San Lucas el Viejo" de Tlacotepec de Benito Juárez, Puebla en el año 2018-2019* (Tesis de licenciatura). Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México. Recuperado de <https://repositorioinstitucional.buap.mx/items/07f389b4-69ee-47a6-8a7d-8590e9fa35eb>
- Lara, K., Cruz, I., & Li, Y. (2017). Estudio de la contaminación de flúor en el agua subterránea del acuífero de la cuenca alta del río Laja. Verano de la Investigación Científica. *Jóvenes de la Ciencia*, 2(1), 1293-1294. Recuperado de <https://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/view/1243>
- Leyva, Z., & Martínez, A. (2019). Contaminación de los acuíferos mexicanos por fluoruro. *Ciencia y Desarrollo Conacyt*. Recuperado de <http://www.cyd.conacyt.gob.mx/?p=articulo&id=495>
- Mapa Interactivo. (2023). *Mapa de Jalisco*. Recuperado de <https://www.mapainteractivo.net/fotos/mapa-de-jalisco.html>
- Martínez, K. (2013). *Uso racional de fluoruros en odontopediatría* (tesis de licenciatura), Facultad de Odontología, Universidad Nacional Autónoma de México. Recuperado de <https://ru.dgb.unam.mx/bitstream/20.500.14330/TES01000692405/3/0692405.pdf>
- OMS, Organización Mundial de la Salud. (2018). *Informe sobre el abastecimiento de agua y monitoreo del saneamiento*. Recuperado de www.who.int/water_sanitation_health/monitoring/es/index.html

- Pérez, P., Scherman, L., & Hernández, G. (2007). Fluorosis dental en niños y flúor en el agua de consumo humano. Mexticacán, Jalisco, México. *Investigación en Salud*, 9(3), 23-56. Recuperado de <https://www.medigraphic.com/cgi-bin/new/resumen.cgi?IDARTICULO=18790>
- Rosales, A. (2013). *Contaminación del agua por flúor*. Recuperado de <https://es.slideshare.net/angelicarosales98434/contaminacion-del-agua-por-fluorr>
- SCFI, Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. (2001). *Norma Mexicana NMX-AA-077-SCFI-2001. Análisis de aguas. Determinación de fluoruros en aguas naturales, residuales y residuales tratadas*. Recuperado de <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166793/NMX-AA-077-SCFI-2001.pdf>
- Secretaría de Salud. (2021). *Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021, Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua*. Recuperado de https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5650705&fecha=02/05/2022#gsc.tab=0
- SEOP, Sociedad Española de Odontopediatria. (2019). *Flúor y fluoruros*. Recuperado de <https://www.odontologiapediatrica.com/protocolos/fluor/>

- SIWI, Stockholm International Water Institute. (2005). *Proyecto del milenio, health dignity, and development: What will it take?* Recuperado de <https://siwi.org/wp-content/uploads/2015/10/health-dignity-and-development-mdg-2005.pdf>
- Travel by Mexico. (2023). *Estado de Jalisco de la república mexicana*. Recuperado de <https://mr.travelbymexico.com/695-estado-de-jalisco/>
- USDHHSF, U.S. Department of Health and Human Services Federal. (2015). *Panel on Community Water Fluoridation. Public health service recommendation for fluoride concentration in drinking water for the prevention of dental caries. Public health reports*. Recuperado de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4547570/>
- USEPA, United States Environmental Protection Agency. (2016). *Integrated risk information system*. Recuperado de <https://www.epa.gov/iris>
- Varela, G., García, A., Huízar, R., Irigoyen, M., Camacho, A., & Espinoza, M. (2013). Fluorosis and dental caries in the hydrogeological environment of southeastern communities in the state of Morelos, Mexico. *Journal Environmental Protection*, 4, 994-1001 DOI: 10.4236/jep.2013.49115