



Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial
Especialidad en Geomática
Proyecto final

**Análisis de las posibles consecuencias en la salud,
por el uso y consumo de agua de pozos en el Valle
del Mezquital, Hidalgo de 2010 a 2022.**

Presenta:

Lara Rodríguez José Eduardo
Miranda Huerta Karen Zoravir
Peña Reyes Itchel Carmen

Asesor:

Dr. Jorge Paredes Tavares

Coasesor:

Mtro. Alberto Porras Velázquez

Índice

1. Introducción.....	2
a. Antecedentes.....	3
2. Justificación.....	6
a. Relevancia.....	7
b. Objetivos.....	7
General.....	7
Particulares.....	7
3. Modelo Conceptual.....	8
a. Modelo de Conocimiento.....	8
I. Contaminación.....	9
II. Contaminante.....	9
III. Aguas residuales.....	9
IV. Aguas subterráneas.....	9
V. Pozos.....	10
b. Modelo Geográfico.....	13
c. Modelo Computacional.....	16
4. Solución Colaborativa.....	17
a. Metodología y análisis.....	17
I. Base de datos de muestreo de aprovechamientos.....	17
II. Límites Máximos Permisibles de Contaminantes en el Agua para Consumo Humano.....	23
III. Análisis exploratorio de aprovechamientos muestreados.....	24
IV. Base de datos de enfermedades reportadas por elementos considerados como contaminantes.....	38
V. Base de datos de Egresos Hospitalarios y Defunciones.....	40
VI. Análisis de autocorrelación espacial.....	52
i. I de Morán.....	52
ii. G* de Getis Ord.....	54
Cálculo de distancias.....	56
6. Resultados.....	58
Localidad a localidad: I de Morán.....	58
Localidad a localidad: I de Morán.....	71
Localidad a localidad: G* de Getis Ord.....	78
5. Conclusiones.....	86
7. Referencias.....	90

1. Introducción

El suministro de agua potable es un aspecto fundamental para la salud pública y el desarrollo sostenible de las comunidades. En numerosas regiones, la dependencia de pozos para satisfacer las necesidades de agua es una realidad arraigada. Sin embargo, esta práctica plantea desafíos importantes en términos de calidad y seguridad del agua, especialmente en áreas donde la contaminación de los pozos puede representar un riesgo para la salud humana.

El Valle del Mezquital (VM), en Hidalgo, es la segunda región a nivel mundial con mayor uso de aguas residuales en agricultura la cual ha recibido aguas sin tratamiento de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) desde hace más de 100 años (García-Salazar, 2019). Además del uso para irrigación, de manera indirecta se le da un uso doméstico cuando se obtiene vía acarreo de pozos, ríos, lagos o arroyos contaminados (Lara Figueroa y García Salazar, 2019).

Otros factores que repercuten en la calidad del agua son las condiciones hidrotermales de la región y las actividades industriales¹, incluyendo una termoeléctrica, cementeras y una refinería que se desarrollan en el VM. Por lo que, el consumo y uso del agua pone en riesgo la salud de quienes la utilizan debido a que éstas contienen una alta carga de contaminantes compuestos por material orgánico, metales, bacterias y detergentes (*Ibid.*)

Respecto a los riesgos existentes cuando el agua se consume directamente (beber) e indirectamente (aseo, lavado de alimentos), diversos estudios han documentado cómo ésta puede influir en la aparición de enfermedades infecciosas estomacales (parasitarias y gastrointestinales), problemas de la piel (ante la exposición directa) e incluso, cuando las aguas contienen metales pesados, cierto tipo de cánceres (Lara Figueroa y García Salazar, 2019; Carrasco, 2013; Cifuentes, 1998; Cifuentes et al., 1994; Cisneros et al., 2001; Contreras et al., 2017; Monteverde, Cipponeri y Angelaccio, 2010; Nuñez, 2015; Ramos, 2018; Siebe y Cifuentes, 1995).

El presente estudio tiene como objetivo los posibles efectos en la salud de la población local asociadas al uso y consumo de agua, provenientes de aprovechamientos en la región del

¹ Se localiza en el corredor industrial Tula-Tepeji con empresas de la industria del cemento, textil y confección, alimentos procesados, electrónica, petroquímica, energía termoeléctrica y extractiva; por lo que se caracteriza por ser una zona con alto grado de contaminación (García-Salazar, 2019).

VM, por lo que, se emplearon métodos geoestadísticos y de análisis espacial para evaluar la distribución de aprovechamientos contaminados -aquellos que no cumplen los límites establecidos por la NOM-127-SSA1-2021² y la Organización Mundial de la Salud (OMS)- y las enfermedades reportadas en la población local.

Este análisis permitió identificar riesgos potenciales en la salud pública y generar información relevante plasmada en un geoportal, para los tomadores de decisiones en políticas públicas para posible saneamiento ambiental y la gestión de recursos hídricos. Asimismo, el empoderamiento social de las comunidades, sobre estrategias para mitigar los impactos negativos y promover el acceso a agua potable segura en estas comunidades.

a. Antecedentes

Las enfermedades relacionadas con la contaminación por aguas residuales son un problema grave y global que afecta la salud pública y el bienestar de millones de personas en todo el mundo. Las aguas residuales, que contienen una variedad de contaminantes, incluidos microorganismos patógenos, productos químicos tóxicos y materia orgánica, pueden ser una fuente significativa de enfermedades transmitidas por el agua (OMS, 2011). En México, la contaminación por aguas residuales afecta significativamente a diversas regiones del país, tanto en áreas urbanas como rurales debido principalmente a la falta de infraestructura adecuada para el tratamiento de aguas residuales, la descarga directa de desechos humanos en cuerpos de agua y la agricultura no regulada son algunas de las principales causas de esta problemática.

Según un informe de la CONAGUA, en 2020 aproximadamente el 70% de las aguas residuales generadas en el país no reciben tratamiento alguno antes de ser descargadas al medio ambiente. Esta falta de tratamiento contribuye directamente a la contaminación de ríos, lagos y acuíferos, lo que representa un riesgo para la salud pública y el medio ambiente. La contaminación por aguas residuales tiene graves consecuencias para la salud de la población mexicana, como lo señala un estudio realizado por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático en 2015, la exposición a aguas residuales contaminadas está asociada con un aumento en las tasas de enfermedades gastrointestinales, infecciones de la piel y problemas respiratorios, entre otros. Estas enfermedades afectan especialmente a comunidades vulnerables que viven cerca de fuentes de agua contaminadas.

² Norma Oficial Mexicana (NOM). Esta Norma establece los límites permisibles de calidad que debe cumplir el agua para uso y consumo humano.

Las aguas residuales contaminadas pueden contener bacterias, virus y parásitos que causan enfermedades como la gastroenteritis, la fiebre tifoidea, el cólera y la hepatitis A. Un estudio de la OMS señaló que "el acceso al agua potable y al saneamiento podría reducir la carga de enfermedades diarreicas en un 90%" (OMS, 2019). Por otro lado, la contaminación por aguas residuales también puede contribuir a la propagación de enfermedades respiratorias, especialmente en áreas donde el agua contaminada se evapora y se inhala. Un informe de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) menciona que "la exposición a contaminantes en el agua puede causar o agravar problemas respiratorios como el asma" (EPA, 2020).

El contacto con agua residual puede provocar irritación de la piel, dermatitis y aumentar el riesgo de infecciones cutáneas ya que "la exposición a aguas residuales sin tratar está significativamente asociada con un mayor riesgo de dermatitis" (Bakhtiyari *et al.*, 2018). Por otra parte, los cuerpos de agua contaminados por aguas residuales pueden servir como criaderos de mosquitos y otros vectores de enfermedades, aumentando el riesgo de enfermedades como el dengue, la malaria y el virus del Zika. Según la Organización Panamericana de la Salud (OPS) en 2020, "la proliferación de vectores en aguas estancadas contaminadas por aguas residuales es un importante factor contribuyente a la propagación de enfermedades transmitidas por vectores".

Otro aspecto más en la contaminación de cuerpos de agua por descargas de aguas residuales es la presencia de metales pesados, lo cual se traduce en un problema grave que puede tener impactos significativos en la salud humana y el medio ambiente. Por ejemplo, metales como el plomo, el mercurio, el cadmio y el arsénico, son tóxicos incluso en pequeñas cantidades y pueden causar una variedad de enfermedades crónicas y agudas. En el contexto de México, hay evidencia de casos documentados que demuestran los efectos adversos de la contaminación por metales pesados en la salud de la población (López *et al.*, 2019).

Si bien la contaminación por aguas residuales es más evidente en áreas urbanas, las zonas rurales de México también enfrentan problemas similares. La práctica común de usar cuerpos de agua como vertederos de desechos humanos y agrícolas contribuye a la contaminación de ríos y mantos acuíferos en estas áreas (SEMARNAT, 2019), por lo que la falta de acceso a servicios de saneamiento adecuados agrava aún más esta situación.

La región de la cuenca del río Tula³ ha experimentado problemas significativos de contaminación del agua, lo que ha llevado a serios riesgos para la salud pública de las comunidades locales como resultado de la propagación de diversas enfermedades transmitidas por el agua. Un estudio epidemiológico llevado a cabo por investigadores de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH) encontró una mayor incidencia de cáncer, especialmente de pulmón y vejiga, en la región de Tula, Hidalgo, en comparación con otras áreas del estado. Asimismo, otro estudio reafirma lo anterior ya que se identificó una asociación entre la contaminación ambiental, incluida la contaminación del río Tula, y el aumento de los casos de cáncer y enfermedades respiratorias en la población (López *et al.*, 2019).

De igual forma, la cercanía a la actividad hidrotermal de la zona puede tener posibles efectos en la calidad del agua, debido a que el VM se encuentra en la provincia del Eje Neovolcánico (Aguilar-Sánchez y González-Vizcarra, 2019). Algunos municipios con manifestaciones térmicas superficiales son los municipios de Huichapan, Tecozautla, Tasquillo, Zimapán, Nopala, Chapantongo, Tula y Tepetitlán (Escamilla, et al., 2020).

También, la contaminación del río Tula con aguas residuales ha provocado un aumento en las enfermedades gastrointestinales entre los residentes locales. De acuerdo con el Instituto Nacional de Salud Pública (2015), la exposición a aguas residuales contaminadas en la cuenca de dicho río está asociada con un mayor riesgo de enfermedades gastrointestinales, como la diarrea y la fiebre tifoidea, entre otras.

Investigadores de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) estudiaron los efectos de la exposición a contaminantes ambientales, incluidos los contaminantes presentes en el río Tula, en la salud reproductiva de mujeres en la región. Se encontró que "las mujeres expuestas a altos niveles de contaminación ambiental en la cuenca del río Tula tenían una mayor incidencia de problemas reproductivos, como abortos espontáneos y partos prematuros" (Martínez *et al.*, 2017).

Estos casos demuestran la gravedad de la situación en la cuenca del río Tula y cómo la contaminación afecta diversos aspectos de la salud humana, desde enfermedades

³ Nace de las aguas residuales provenientes de la zona metropolitana del Valle de México (ZMVM). Estas aguas se conducen a los ríos Tula y Salado mediante obras de drenaje como el Tajo de Nochistongo, el Gran Canal del Desagüe, el túnel emisor poniente, el túnel emisor central y el túnel emisor oriente. Posteriormente, al incorporarse al río Tula continúa hasta la presa Zimapán, donde se une con el río San Juan, después adquieren el nombre de río Moctezuma y en la parte baja de la cuenca cambia a río Pánuco hasta la descarga en el Golfo de México (Avelar-Roblero, *et al.*, 2023).

respiratorias y cáncer, hasta problemas reproductivos. Por lo que es fundamental llevar a cabo estudios que permitan localizar de manera precisa los aprovechamientos de agua subterránea que se pueden clasificar como fuentes potenciales de afectación a la salud humana, para que los tomadores de decisiones puedan implementar medidas de mitigación y control para diseñar medidas de protección para de la población de esta área.

2. Justificación

En 2017 la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), analizó 7 pozos de agua potable en los alrededores de la presa Endhó en los municipios de Tula de Allende y Tepetitlán; para septiembre de 2018 dicho organismo turnó tres oficios con los resultados de los muestreos de los pozos contaminados con metales pesados para “atender la problemática de calidad de agua de las citadas fuentes de abastecimiento para uso y consumo humano”(Oficios No. BOO.912.04.-02928/02929/02930 del 13 de septiembre de 2018) (Carabaña, N. C., 2023, Ortiz-Espejel, B. 2020).

De igual manera, la Comisión para la Protección de Riesgos Sanitarios del Estado de Hidalgo, como resultado de estudios para conocer la calidad de agua para uso y consumo humano en región aledaña a la Presa Endhó 2010-2017, señala la presencia de altos niveles de arsénico en el agua. Las muertes registradas por cáncer entre 2010 y 2020 en la región de Tula crecieron un 189%, mientras que en todo México fue un 30%. Las muertes por fallas renales también se triplicaron (Carabaña, N. C., 2023, Ortiz-Espejel, B. 2020).

Considerando la creciente cantidad de reportes sobre enfermedades asociadas al uso de agua contaminada, se torna crucial emprender un estudio detallado que permita determinar tanto la distribución espacial de dichas enfermedades como la relación con los elementos contaminantes presentes en las aguas subterráneas. Este enfoque no solo ayudará a contextualizar las posibles afectaciones en la salud, sino que también proporcionará elementos de apoyo para la implementación de estrategias de mitigación y prevención.

Se tiene registro de 123 muestreos de calidad del agua en aprovechamientos de la zona de estudio, de los cuales se analizaron 39 parámetros de las características del agua y concentración de los elementos químicos. Cabe mencionar que, los elementos químicos se encuentra en diferentes concentraciones y algunos rebasan los límites permitidos por la NOM-127-SSA1-2021 y la OMS, como metales pesados, sólidos disueltos, presencia de microorganismos, materia orgánica, entre otros; por lo que es importante determinar la

distribución espacial de los contaminantes presentes en aguas subterráneas para llevar a cabo acciones sobre el uso de dicho recurso encaminadas a reducir afectaciones a la salud.

a. Relevancia

El proyecto tiene un impacto social significativo, ya que la salud de la población es una prioridad fundamental. Al evidenciar las posibles consecuencias en la salud derivadas del uso y consumo de agua de los aprovechamientos, la investigación puede contribuir a mejorar la calidad de vida de los habitantes del VM. La información generada permitirá la implementación de medidas preventivas, como la instalación de sistemas de filtración de agua y campañas de concienciación sobre la importancia del agua potable segura.

b. Objetivos

General

Analizar la distribución de los elementos contaminantes de los aprovechamientos muestreados en el período 2010 a 2022, para establecer la posible relación entre el uso del agua contaminada y las enfermedades en la población local mediante métodos de análisis espacial para apoyar el diseño de políticas públicas y el empoderamiento social de las comunidades sobre la gestión del agua a través de un geoportal de visualización.

Particulares

- 1) Recopilar y procesar bases de datos de defunciones y egresos hospitalarios para asociar enfermedades a los elementos químicos presentes en el agua.
- 2) Realizar un análisis de autocorrelación espacial utilizando el software Geoda para encontrar la posible relación entre la distribución de los aprovechamientos contaminados y los posibles daños en la salud de la población local.
- 3) Identificar patrones espaciales de los aprovechamientos contaminados para reconocer zonas de riesgo por los contaminantes presentes en el agua.
- 4) Crear un geoportal de visualización e integración de información que muestre la distribución de los elementos contaminantes en los aprovechamientos y su posible relación con enfermedades en la población local para apoyar el diseño de políticas públicas y el empoderamiento social de las comunidades.

3. Modelo Conceptual

a. Modelo de Conocimiento

Para establecer la posible relación entre el uso del agua contaminada y las enfermedades en la población es importante analizar la distribución de los contaminantes en la zona. En ese sentido se han llevado a cabo estudios que aplican métodos geoestadísticos como el realizado por Cáceres Torres, A. (2020) de la Universidad de los Andes, titulado “Análisis Geoestadísticos de los parámetros físico-químicos de los pozos profundos ubicados en el área urbana del municipio de Tunja para los años 2015-2019”, que resalta el uso de kriging, el kriging ordinario y el kriging universal, como métodos de interpolación que pueden servir como referencia la investigación.

Otra investigación fue desarrollada por Mokondoko, P., *et al.* (2016), titulada “Evaluar el servicio de regulación de la calidad del agua cuantificando el efectos del uso de la tierra en la calidad del agua y la salud pública en el centro Veracruz, México” que realiza un análisis distribución espacial de enfermedades con datos del Sistema Único para la Vigilancia Epidemiológica (SUIVE), y de las hojas diarias de los Centros de Salud, que sirve como referencia sobre delimitar espacialmente las zonas de valores altos y bajos de prevalencia de enfermedades asociadas a la contaminación, además de considerar relacionar reportes de instancias de salud pública.

También, un estudio realizado por Mendoza Cano, O. (2017) de “Metales pesados y el agua de consumo en Colima. Una cuestión de salud pública” que realizó una interpolación para cada metal y punto muestreado por medio del análisis geoestadístico a través de un modelo IDW (Inverse Distance Weighting) dando como resultado concentraciones de metal en cuanto a la población, siendo otro método para de interpolación que puede servir como referencia.

De igual forma Mendoza Cano, O. (2016) en otra investigación se muestrearon aleatoriamente 36 pozos en 10 acuíferos locales, se hicieron análisis mediante ICP-OES siguiendo estándares internacionales, y se realizó una interpolación geoestadística con ArcGIS, implementando un modelo de ponderación del inverso de la distancia, para estimar la ruta de exposición de consumo en cada localidad, fue el titulado “Riesgos potenciales de salud por consumo de agua con Arsénico en Colima, México”, en que muestra un método más para interpolación y conocer la exposición de la población a los contaminantes.

Finalmente, Crespo-Lambert M. *et. al.*, (2022) genera un índice de calidad del agua (ICA) a partir de muestras de agua en 10 puntos distribuidos en las fuentes de abastecimiento del poblado como el río Yamanigüey, el tanque de almacenamiento y los pozos criollos, según la metodología de Montoya. La investigación es titulada “Evaluación de la calidad del agua para consumo humano en el poblado de Yamanigüey según ICA de Montoya”, la cual puede ser referencia para establecer un índice sobre la calidad del agua según los límites permitidos por la NOM-127-SSA1-2021 y la OMS.

Dado lo anterior se abordan a continuación conceptos clave sobre la contaminación del agua subterránea extraída de los pozos y el contexto geográfico del área de estudio.

I. Contaminación

Según la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA, 1988) en el Art. 3ro la contaminación se define como “La presencia en el ambiente de uno o más contaminantes o de cualquier combinación de ellos que cause desequilibrio ecológico.

II. Contaminante

Toda materia o energía en cualesquiera de sus estados físicos y formas, que al incorporarse o actuar en la atmósfera, agua, suelo, flora, fauna o cualquier elemento natural, altere o modifique su composición y condición natural (LGEEPA, 1988).

III. Aguas residuales

El agua residual proveniente de los usos público, doméstico e industrial, entre otras fuentes, contiene contaminantes en concentraciones que pueden resultar dañinas para la salud humana cuando se descargan sin tratamiento a los cuerpos de agua superficiales.

Además de afectar su calidad, reducen su posible uso como fuentes de agua y afectan a muchas de las especies de los ecosistemas acuáticos donde se descargan (SEMARNAT, 2018).

IV. Aguas subterráneas

El agua subterránea circula a través de los poros del suelo, de sedimentos y de grietas y fracturas en rocas del subsuelo. A medida que fluye, transporta sustancias disueltas, lo que tiene implicaciones. Un efecto positivo son los procesos geológicos de larga duración relacionados con la precipitación y disolución de minerales, que le permite transportar

nutrientes y energía entre diferentes porciones de una cuenca hidrológica (Morales C., E., s.f.).

Sin embargo, esto también tiene consecuencias negativas, derivadas principalmente de la actividad humana, pues el agua se contamina fácilmente y arrastra elementos nocivos al subsuelo. Fugas y derrames de sustancias, utilizadas o producidas por el ser humano (gasolinas, fertilizantes, aguas residuales, desechos industriales, entre otras), se infiltran y llegan al agua subterránea, la contaminan y ocasionan que no sea apta para uso humano (Ibidem, s.f.)

V. Pozos

Según la NOM-003-CONAGUA-1996 un pozo es una obra de ingeniería, en la que se utilizan maquinarias y herramientas mecánicas para su construcción, para permitir extraer agua del subsuelo (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 1997:5). Cabe mencionar que los pozos pueden ser destinados a uso agrícola, agroindustrial, doméstico, acuacultura, industrial, pecuario, público urbano, en servicios o usos múltiples.

El área restringida de emplazamiento del pozo se considera un área de protección entre el sitio seleccionado para construir un pozo y las fuentes potenciales de contaminación existentes que no pueden ser suprimidas, tendrá un radio mínimo de 30 m con respecto al pozo (Ibid, 6). Entre las fuentes de contaminación se consideran ríos y cauces con aguas residuales provenientes de los usos definidos.

VI. Autocorrelación espacial

El concepto de AE tiene sustento en el principio de Tobler que plantea que en el espacio geográfico todo se encuentra relacionado con todo, pero los espacios más cercanos están más relacionados entre sí (Celemín, J. P., 2009). Por lo anterior, los índices de AE nos permiten relacionar en forma conjunta la dependencia entre localizaciones y valores de variables o atributos que interesan y resultan muy adecuados para observar la configuración espacial fragmentada propia de nuestros tiempos (Ibid).

VII. Zona de Estudio

El VM abarca municipios en los estados de Hidalgo y México. Para el estudio, se consideró en el Estado de México los municipios de Apaxco, Chapa de Mota, Hueyoxtla, Jilotepec, Soyaniquilpan, Tequixquiac y Villa del Carbón. En Hidalgo, los municipios de Atitalaquia,

Atotonilco de Tula, Chilcuautla, Progreso de Obregón, Tepeji del Río, Tepetitlán, Tetepango, Tezontepec de Aldama, Tlahuelilpan, Tlaxcoapan y Tula de Allende.

i. Aspectos Físicos

Fisiografía

El VM se encuentra en la subprovincia de la Llanura de Apan, parte del Eje Neovolcánico, con altitudes entre 1,700 y 2,100 metros sobre el nivel del mar. La región tiene una topografía variada que incluye llanuras, colinas y sierras bajas, lo que genera diversos microclimas y paisajes. (INEGI, 2020; CONABIO, 2021).

Clima

Se caracteriza por ser una zona semiárida, con temperaturas muy calientes por el día y bajas temperaturas por la noche, y por tener escasa precipitación pluvial (García-Salazar, 2019).

Geología

La geología del Valle del Mezquital está dominada por rocas volcánicas del Terciario, como basaltos y tobas, además, se encuentran depósitos aluviales cuaternarios que cubren gran parte de las llanuras y valles que forman suelos fértiles aprovechados para la agricultura. (SGM, 2018; UNAM, 2019).

Hidrografía

El sistema hidrológico del VM incluye ríos importantes como el Tula, el Salado y el Alfajayucan. Estos ríos drenan la región y reciben grandes volúmenes de aguas residuales de la Ciudad de México, utilizadas para riego agrícola. Sin embargo, el uso de aguas residuales y la contaminación industrial han resultado en la presencia de metales pesados y otros contaminantes, afectando la calidad del agua, suelos y salud pública (CONAGUA, 2020; INECC, 2021; FAO, 2019).

Uso de Suelo y Vegetación

En el Valle del Mezquital, la agricultura es predominante, utilizando aguas residuales para riego, con cultivos como maíz, alfalfa y hortalizas, en los principales distritos de riego como 003 Tula, 100 Alfajayucan, 112 Ajacuba y 044 Jilotepec. También se practica ganadería en menor escala. La vegetación natural incluye matorrales xerófilos, pastizales y bosques de

encino en áreas elevadas, aunque la agricultura y ganadería han modificado significativamente la cobertura vegetal original (SADER, 2021; FAO, 2019; INECC, 2021; CONAFOR, 2020; UAEH, 2018; INIFAP, 2020).

ii. Aspectos Sociodemográficos y Socioeconómicos

Composición de la Población

La población es diversa, incluyendo una significativa presencia de comunidades indígenas, principalmente hablantes de otomí, con una estructura demográfica joven y alta tasa de natalidad (INEGI, 2020).

Distribución de la Población

Hay una mayor concentración poblacional en municipios cercanos a centros urbanos como Tula de Allende y Tepeji del Río, mientras que áreas rurales como Zimapán tienen menor densidad (SEDATU, 2021).

Hogares y Vivienda

Las viviendas varían desde tradicionales hasta modernas, con un 85% con acceso a agua potable y un 75% a servicios de drenaje, aunque las zonas rurales enfrentan mayores desafíos (SEDATU, 2021; INEGI, 2020).

Discapacidad

Alrededor del 6% de la población presenta algún tipo de discapacidad, principalmente motrices y visuales, con desafíos en inclusión y accesibilidad, especialmente en áreas rurales (INEGI, 2020).

Etnicidad

Una notable presencia de comunidades indígenas otomíes, con aproximadamente el 20% de la población hablando una lengua indígena, enfrentando retos en integración y acceso a servicios (INEGI, 2020).

Fecundidad

La tasa de fecundidad es de aproximadamente 2.5 hijos por mujer, reflejando una tendencia a la baja debido a mayor educación y acceso a métodos anticonceptivos (INEGI, 2020).

Actividades Económicas

La agricultura, ganadería y la industria son las actividades económicas principales. La agricultura se beneficia del riego con aguas residuales, y la industria es significativa en Tula de Allende y Tepeji del Río (FAO, 2019; INEGI, 2020).

Afiliación a Servicios de Salud

Aproximadamente el 80% de la población está afiliada a servicios de salud, con mayores desafíos en comunidades rurales y aisladas (INEGI, 2020).

b. Modelo Geográfico

El estudio se realizó a escala regional, por lo que los datos recabados corresponden al VM. Se muestrearon 123 aprovechamientos de manera puntual en un periodo de tiempo de 12 años, obteniendo datos de campo y de laboratorio. En los parámetros de análisis de campo fueron: conductividad electrolítica (Co), pH, temperatura (T) y redOx (potencial de reducción-oxidación). Por otro lado, los elementos analizados en laboratorio son: aluminio soluble (Al), arsénico soluble (As), bario soluble (Ba), cloruros (Cl⁻), coliformes fecales, cromo soluble (Cr), cobre soluble (Cu), *Escherichia coli* (E.Coli), fluoruros (F⁻), potasio soluble (K⁺), manganeso soluble (Mn), sodio soluble (Na⁺), nitrógeno amoniacal (NH₃-N), plomo soluble (Pb), sólidos disueltos totales (STD), selenio soluble (Se), sulfatos (SO₄²⁻), zinc soluble (Zn), boro soluble (B), calcio soluble (Ca²⁺), cobalto soluble (Co), litio soluble (Li), magnesio soluble (Mg²⁺), molibdeno soluble (Mo), silicio soluble (Si), estroncio soluble (Sr), bicarbonato (HCO₃⁻), nitratos (N-NO₃⁻) y nitrito (N-NO₂⁻).

Los shapefiles para la elaboración de los mapas y análisis en la metodología son del Marco Geoestadístico de diciembre de 2023 de INEGI. La información obtenida fue usada en la proyección UTM (Universal Transversal de Mercator) zona 14 con el Datum WGS 84. Corresponden a polígonos de los límites estatales, municipales y de localidades.

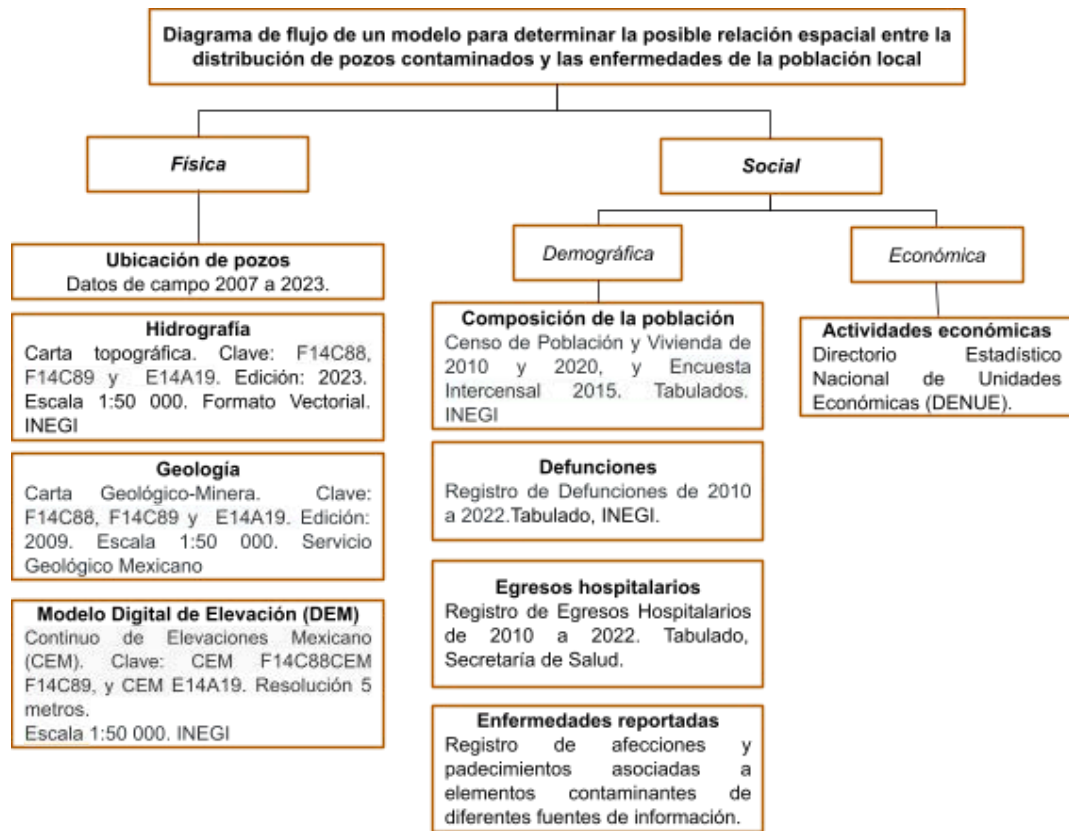


Figura 1. Diagrama de flujo de modelo geográfico.

Fuente: Elaboración propia.

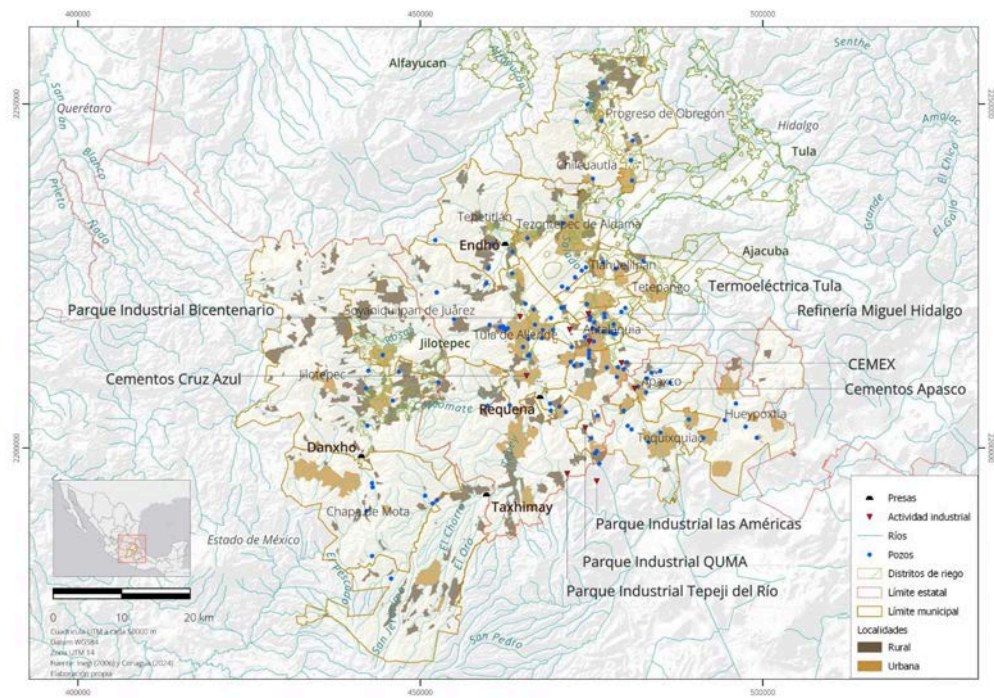


Figura 2. Área de estudio, aprovechamientos de agua subterránea y principales actividades industriales.
Fuente: Elaboración propia con base en información de DB, INEGI, 2006, INEGI, 2023, CONAGUA, 2024.

c. Modelo Computacional

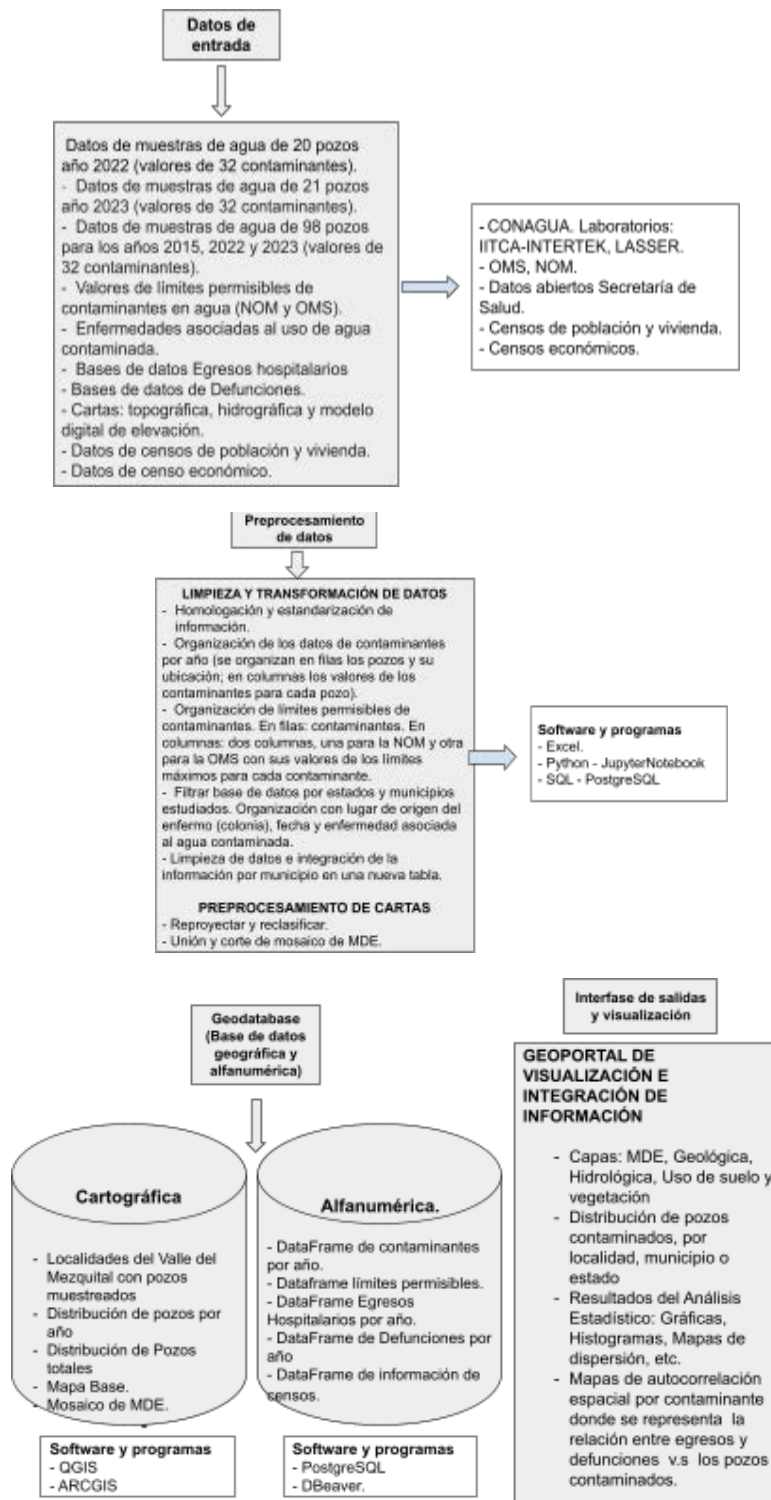


Figura 3. Modelo Computacional.

Fuente: Elaboración propia.

El proceso descrito en el esquema (Figura 3) comienza con la recopilación de datos de entrada, que incluye muestras de agua de diversos pozos en distintos años, límites permisibles de contaminantes, enfermedades asociadas, datos de egresos hospitalarios y defunciones, cartas topográficas, censos de población y económicos. Estos datos provienen de fuentes como CONAGUA, laboratorios específicos y organismos internacionales. A continuación, se realiza el preprocesamiento de datos, que implica la limpieza y transformación de la información para su homologación y estandarización, además de la organización y filtrado según diferentes criterios. Se utiliza software como Excel, Python, Jupyter Notebook y bases de datos SQL para este fin. Posteriormente, se crea una geodatabase que combina datos cartográficos y alfanuméricos, utilizando programas como QGIS, ArcGIS, PostgreSQL y DBeaver. Finalmente, la información procesada se visualiza y se integra en un geoportal, donde se presentan capas de información geográfica, resultados de análisis estadísticos y mapas de autocorrelación espacial, facilitando la interpretación y toma de decisiones respecto a la contaminación y su impacto en la salud pública.

4. Solución Colaborativa

a. Metodología y análisis

1. Base de datos de muestreo de aprovechamientos

La Base de Datos (BD) con 298 registros fue construida a partir de muestreos realizados en VM de 2007 a 2023 de 157 aprovechamientos muestreados, los cuales fueron analizados en los Laboratorios ABS Química Investigación y Análisis S.A. de C.V. para obtener las características del agua y concentración de los elementos químicos. Los parámetros medidos son: Temperatura (°C), Conductividad Eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$), Sólidos Disueltos Totales (mg/L) [1000 mg/L], pH [6.5, 8.5], Potencial Redox (Eh mV), Calcio (mg/L), Magnesio (mg/L), Sodio (mg/L), Potasio (mg/L), Carbonato (mg/L), Bicarbonato (mg/L), Fluor (mg/L) [1.50 mg/L], Nitrógeno de Nitratos (mg/L), Arsénico (mg/L), Bario (mg/L), Cadmio (mg/L), Cromo (mg/L), Cobre (mg/L), Hierro (mg/L), Manganeso (mg/L), Níquel (mg/L), Plomo (mg/L), Antimonio (mg/L), Selenio (mg/L), Zinc (mg/L), Berilio (mg/L), Boro (mg/L), Cobalto (mg/L), Litio (mg/L), Molibdeno (mg/L), Silicio (mg/L), Estroncio (mg/L), Titanio (mg/L), Hidroxilos (mg/L), Fósforo (mg/L), Mercurio (mg/L), Coliformes Fecales (NEP/100mL), Coliformes Totales (NPM/100mL) y Escherichia Coli A (NEP/100mL).

Primero se realizó una revisión geográfica, debido a que no todos los registros contaban con referencia espacial, es decir, entidad, municipio o localidad. Por lo anterior, se realizó la geocodificación inversa, es decir, de coordenadas geográficas (latitud y longitud) a direcciones, a partir de la librería Geopy de Python y el Geocoder Nominatium que es un servicio de geocodificación libre basado en datos abiertos de OpenStreetMap, mediante Google Colab, que es un entorno gratuito de Jupyter Notebook que permite escribir y ejecutar código en Python a través del navegador. Con el resultado obtenido, se verificó la dirección asignada a los 157 aprovechamientos con ayuda de Google Maps y se asignó entidad, municipio y localidad.

A continuación se muestra una tabla que contempla los 19 municipios y 157 localidades en las que se encuentran los aprovechamientos muestreados, de los cuales 8 municipios con 34 localidades pertenecen al Estado de México, y en 11 municipios con 123 localidades al estado de Hidalgo, que conforman parte del VM.

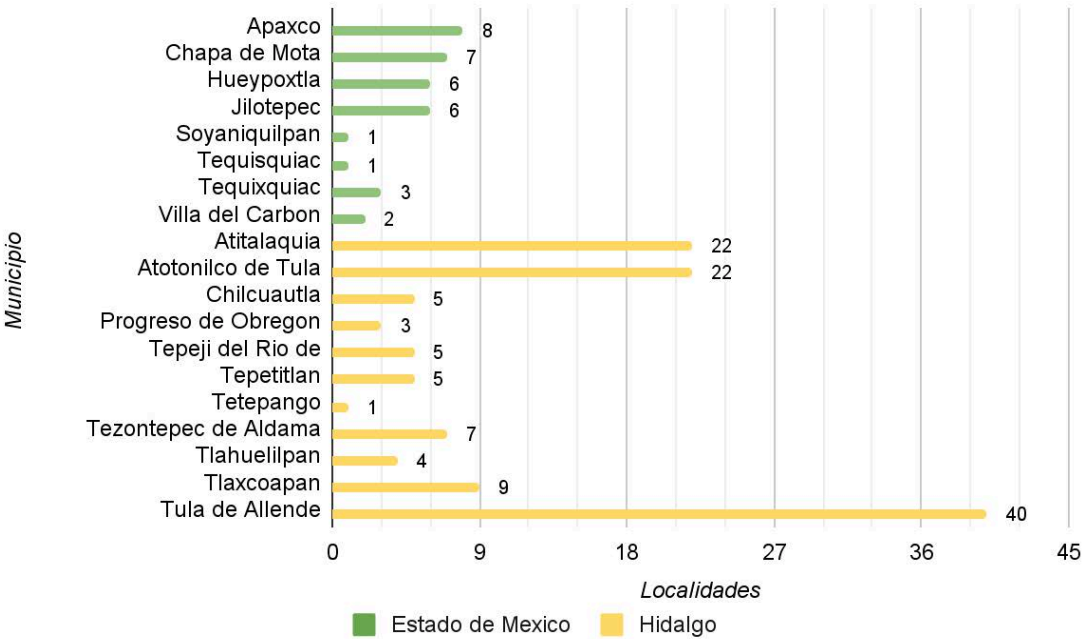


Figura 4. Localidades muestreadas de los 157 aprovechamientos en el VM.

Fuente: Elaboración propia con base en información de DB.

Como segundo paso, se hizo una revisión de las características y/o parámetros de los aprovechamientos. Cada aprovechamiento tiene asignado el uso que se le da al agua extraída, el cual es distinto en cada caso, y se muestra en la siguiente tabla. De los 157 aprovechamientos, 14 tienen especificado “sin uso”, por lo que se hizo una revisión para poder establecer el uso correspondiente. Se realizó una revisión histórica de muestreos previos en la zona de estudio, para obtener el uso de cada aprovechamiento. También, con ayuda de la revisión geográfica, se pudo establecer el sitio en que se ubica cada aprovechamiento y se corroboró el uso, resultando 13 de público urbano y 1 de recreativo.

Cabe mencionar que, para el estudio, solo se emplearon los usos destinados para aprovechamiento humano, debido a que el objetivo es establecer la posible relación entre el consumo de agua y las enfermedades en la población local, que están asociadas a elementos químicos que puedan ser considerados como contaminantes. A continuación, se muestran los 123 aprovechamientos resultantes de acuerdo al uso humano:

Tabla 1. Uso destinado de los aprovechamientos muestreados en Valle del Mezquital, Hidalgo.

No.	USO	Número de aprovechamientos	
		Inicial (157)	Final (123)
1	Agrícola	1	1
2	Agrícola/Doméstico	2	2
3	Agrícola/Público Urbano	1	1
4	Agua Residual	1	-
5	Cerrado	2	-
6	Doméstico	7	7
7	Doméstico/Abrevadero	1	1
8	Doméstico/Recreativo	1	1
9	Fuera de Servicio	1	-
10	Industrial	15	-
11	Potable	1	1
12	Público Urbano	85	98
13	Público Urbano/Agrícola	1	1
14	Público Urbano/Pecuario	1	1
15	Recreativo	5	6
16	Recreativo/Doméstico	1	1
17	Sin Uso	14	-
18	Termo/Potable	2	2
Totales		157	123

Fuente: Elaboración propia con base en información de DB.

Finalmente, en la siguiente tabla se muestra el resumen de los registros y aprovechamientos, después de la revisión geográfica y características y/o parámetros de cada aprovechamiento.

Tabla 2. Revisión de base de datos de muestreos de aprovechamientos en VM.

<i>Observaciones</i>	<i>Registros</i>	<i>Aprovechamientos</i>
BD Inicial	298	157
BD Final	235	123

Fuente: Elaboración propia con base en información de DB.

La base de datos final contempla 18 municipios y 123 localidades en las que se encuentran los aprovechamientos muestreados, de los cuales 7 municipios con 32 localidades pertenecen al Estado de México, y 11 municipios con 91 localidades al estado de Hidalgo, que en conjunto conforman parte del VM, como se muestra en la figura siguiente que aparece a continuación.

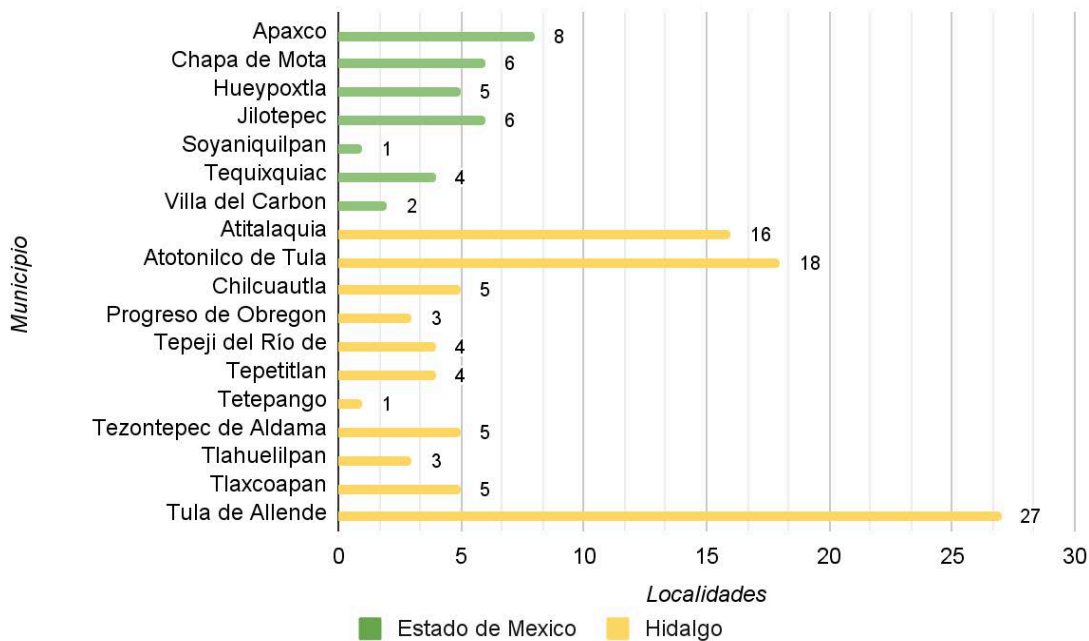


Figura 5. Localidades muestreadas de los 123 aprovechamientos en el Valle del Mezquital.

Fuente: Elaboración propia con base en información de DB.

El municipio con mayor número de localidades de muestreo es Tula de Allende, con 27 localidades, seguido de Atotonilco de Tula con 18 y Atitalaquia con 16 localidades, todos en Hidalgo. Por otro lado, el municipio con menor número de localidades es Soyaniquilpan, en el Estado de México, y Tetepango, en Hidalgo, ambos con 1 localidad. Les siguen Villa del Carbón, en el Estado de México, con 2 localidades, y Progreso de Obregón, en Hidalgo, con 3 localidades.

En el siguiente mapa se muestra el número de aprovechamientos muestreados para cada año en el período de 2007 a 2023 (Figura 6), siendo el año 2008 el de mayor cantidad, con 57 aprovechamientos, ubicados principalmente al norte del área de estudio. Le sigue el año 2007 con 42 aprovechamientos, distribuidos tanto en el Estado de México como en Hidalgo. En contraste, el año 2017 contempla solo 8 aprovechamientos, mientras que los años 2015 y 2016 tienen 9 aprovechamientos cada uno, muestreando los mismos sitios durante los tres años, al noreste de la zona de estudio.

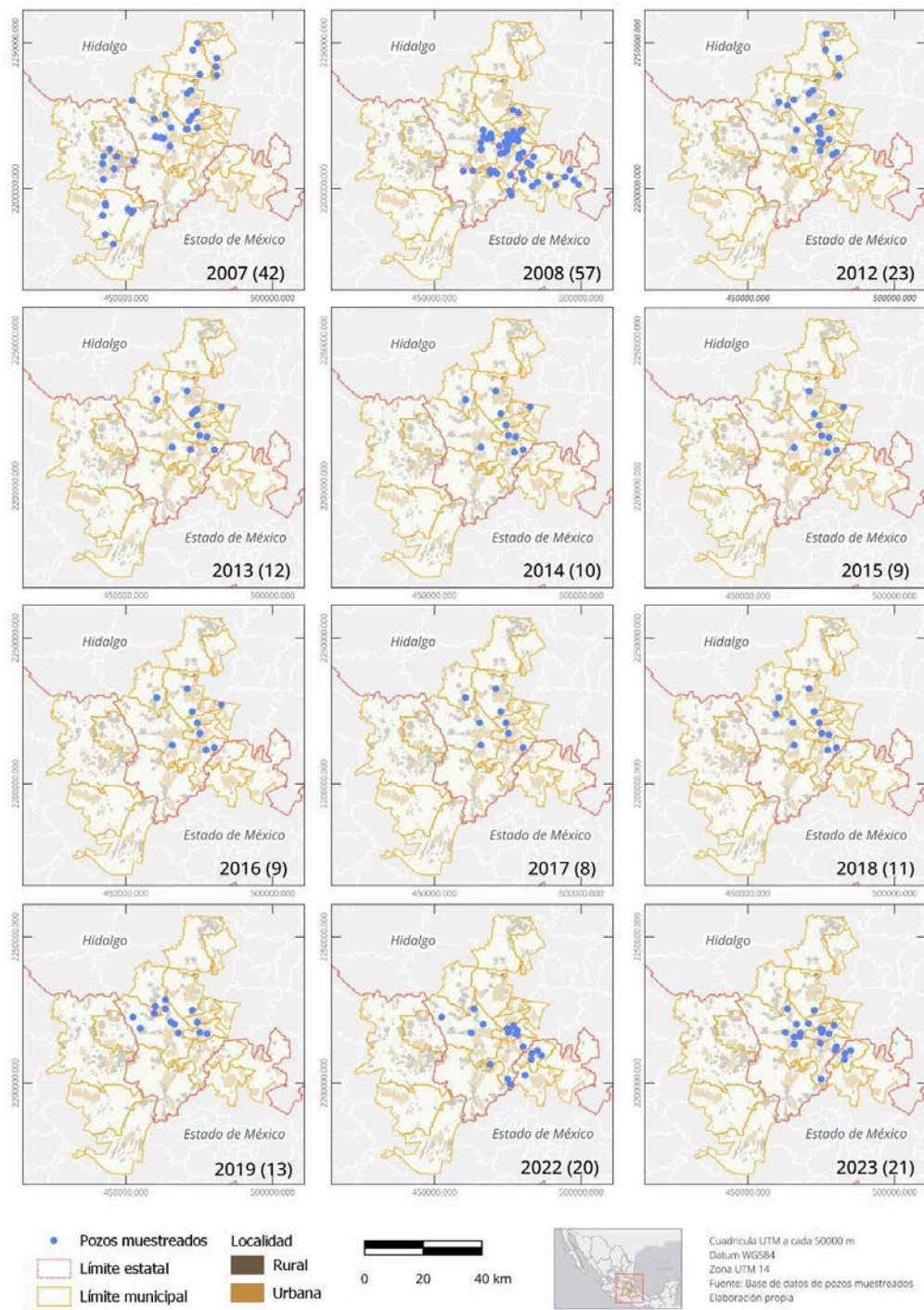


Figura 6. Muestreo de aprovechamientos en el VM.

Fuente: Elaboración propia con base en información de DB, INEGI, 2023.

II. Límites Máximos Permisibles de Contaminantes en el Agua para Consumo Humano

Para proporcionar un marco de referencia claro y preciso en el análisis de la calidad del agua de aprovechamientos en el VM, se construyó una tabla detallada que incluye los Límites Máximos de Concentración Permitidos (LMCP) para los contaminantes clave presentes en el agua de consumo humano.

Para la construcción de la tabla se recopilaron los valores de los límites máximos de concentración permitidos para cada contaminante según la NOM-127-SSA1-2021 y las directrices de la OMS. Los valores obtenidos de ambas fuentes fueron comparados y verificados para asegurar consistencia y precisión. Cualquier discrepancia fue analizada y documentada para proporcionar una comprensión clara de las diferencias y similitudes entre las dos normativas. Los datos fueron organizados en una tabla de fácil lectura con los límites máximos de concentración permitidos según la NOM-127-SSA1-2021, y límites máximos de concentración recomendados por la OMS, aunque en algunos casos que no se encontró información para determinados elementos, se consideró información de otras autoridades en el tema como los Estándares de fuentes Europeas y de Estados Unidos.

Tabla 5. Límites Máximos Permitidos de Contaminantes en el agua para consumo humano.

Límites máximos Permitidos según la NOM y la OMS

<i>Abreviatura</i>	<i>Parámetros</i>	<i>Límite permisible NOM</i>	<i>Límite permisible OMS</i>	<i>Unidades</i>
<i>pH</i>	pH	6.5 a 8.5	NA	Unidades de pH
<i>N-NO3-</i>	Nitrógeno de nitratos (N-NO3-)	11	50	mg/L
<i>N-NO2-</i>	Nitrógeno de nitritos (N-NO2-)	0.9	3	mg/L
<i>STD</i>	Sólidos disueltos totales	1.000,00	1.000,000	mg/L
<i>SO42-</i>	Sulfatos (SO4=)	400	400	mg/L
<i>F</i>	Fluoruro	1	1.5	mg/L
<i>Cu</i>	Cobre	2	2	mg/L
<i>E. coli</i>	E. coli o	<1.1	0.000	NMP/100 mL
<i>Coli</i>	Coliformes fecales	<1	0.000	UFC/100 mL

<i>Cr</i>	Cromo total	0.05	0.05	mg/L
<i>Pb</i>	Plomo	0.01	0.01	mg/L
<i>Se</i>	Selenio	0.04	0.01	mg/L
<i>Mn</i>	Manganeso	0.15	NA	mg/L
<i>Al</i>	Aluminio	0.2	0.2	mg/L
<i>Ba</i>	Bario	1.3	NA	mg/L
<i>Cd</i>	Cadmio	0.005	0.003	mg/L
<i>As</i>	Arsénico	0.05	0.01	mg/L
<i>Cl</i>	Cloro residual libre	0.2-1.5	NA	mg/L
<i>Cl-</i>	Cloruros	250	250	mg/L
<i>Na+</i>	Sodio	200	200	mg/L
<i>B</i>	Boro**	1.00	NA	mg/L
<i>Co</i>	Conductividad Electrolítica	400 a 800	NA	μS/cm
<i>Sr</i>	Estroncio**	0.4	NA	mg/L
<i>Ca2+</i>	Calcio**	200	NA	mg/L
<i>Mg2+</i>	Magnesio**	50	NA	mg/L
<i>P</i>	Fósforo/fosfato**	0.1	NA	mg/L
<i>Si</i>	Silicio**	25	NA	mg/L
<i>K</i>	Potasio**	12	NA	mg/L
<i>Zn</i>	Zinc	5.00	3.00	mg/L

**Estándares de fuentes Europeas y de Estados Unidos.

Fuente: NOM-127-SSA1-2021 y OMS.

III. Análisis exploratorio de aprovechamientos muestreados

Como se mencionó anteriormente, la BD contiene diferentes características del agua y la concentración de elementos químicos en los aprovechamientos muestreados. Para el estudio se consideraron cinco elementos, debido al número de muestreos para cada uno.

A continuación, se muestra una descripción estadística realizada en Google Colab de las variables de estudio: Arsénico (As), Coliformes Fecales y Coliformes Totales (Coliformes), Flúor (F), Nitrógeno de Nitratos o Nitratos (NO₃) y Plomo (Pb).

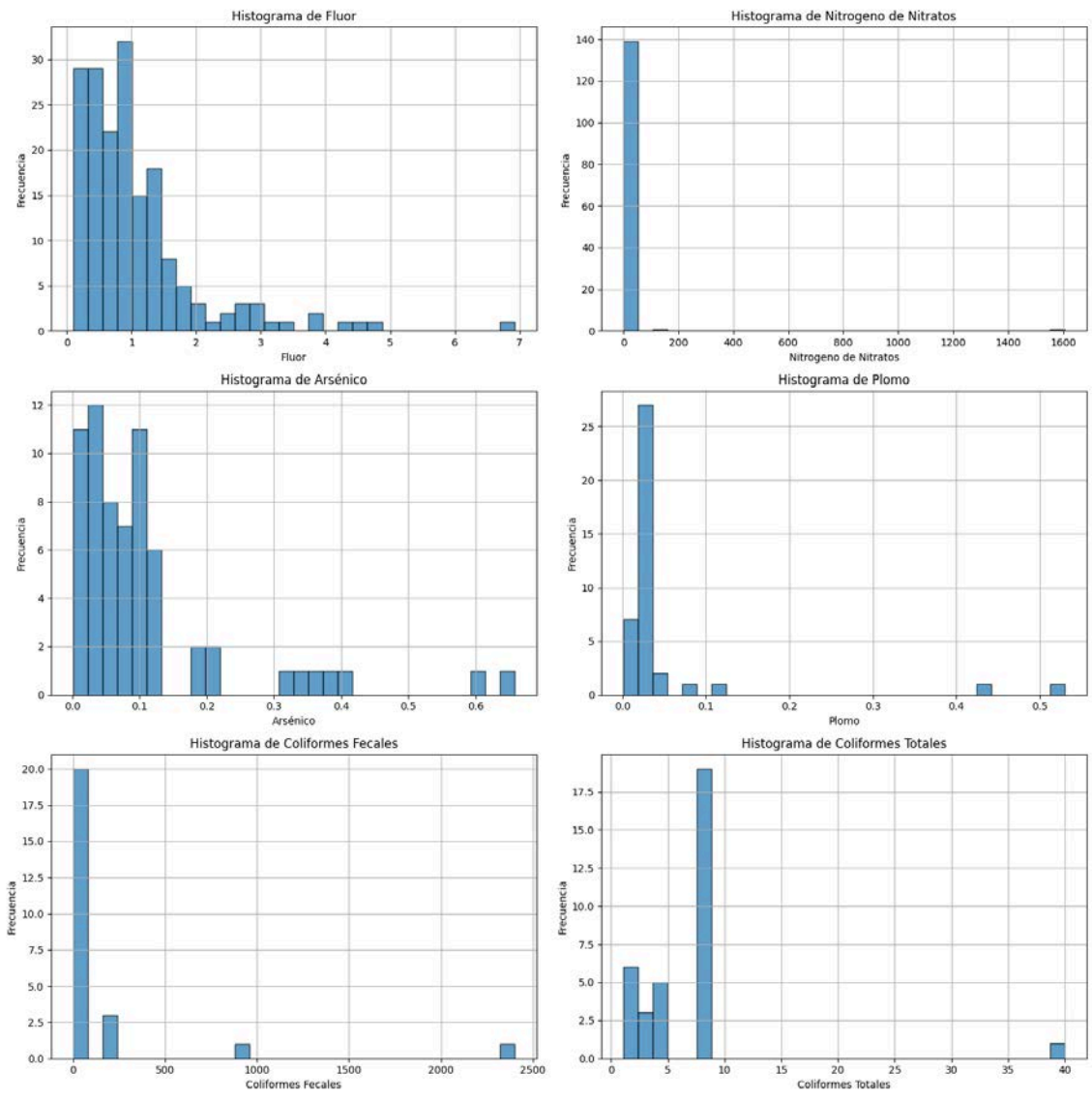


Figura 7. Histograma de concentración de elementos muestreados.

Fuente: Elaboración propia con base en información de DB.

Los histogramas muestran los elementos a estudiar se puede apreciar la distribución de los 237 muestreos correspondientes a los 123 aprovechamientos (cada uno asociada a una clave única). Todos los contaminantes tienen una distribución asimétrica hacia la derecha, es decir, con sesgo positivo, lo que indica que algunas muestras tienen concentraciones altas a comparación que la mayoría.

Tabla 6. Estadísticos de concentración de elementos muestreados.

Estadístico	As	F	C. Fecales	C.Totales	NO3	Pb
Conteo	66	178	25	34	141	40
Máximo	0.6576	6.9225	2400	40	1606.33	0.53
Minino	0.0012	0.0982	1.1	1.1	0.0017	0.0015
Promedio	0.1087	1.0672	166.384	6.74704	19.86108	0.05071
Mediana	0.0736	0.858	8	8	6.5945	0.0245

Fuente: Elaboración propia con base en información de DB.

En la tabla anterior, se aprecian valores que están muy por encima de la media y la mediana como en el caso de las coliformes fecales y Nitrógeno de nitratos, los cuales se consideran valores espurios producto de errores de medición. Estos valores, se quitaron para evitar errores en análisis posteriores. A continuación, se muestra el caso de Nitrógeno de nitratos en el que se identifica en la BD los valores más altos:

Clave	Tipo	Longitud (X)	Latitud (Y)	Elevación (msnm)	Nombre	Localidad	Municipio	Estado	Acuífero	Uso_x	Fecha de muestreo (mes-año)	Autor	Fluor (mg/L) [1.50 mg/L]	Nitrogeno de Nitratos (mg/L) [11 mg/L]
110	MZ-80	466556.0	2220135.0	2066.0	S/R	COLONIA ITURBE	TULA DE ALLENDE	HIDALGO	VALLE DEL MEZQUITAL	PUBLICO URBANO	2023-06-01	IITCA-Juriquilla	1.1	1606.3300
92	MZ-60	472602.0	2224819.0	2047.0	S/R	MANANTIALES DEL CERRO COLORADO	TEZONTEPEC DE ALDAMA	HIDALGO	VALLE DEL MEZQUITAL	PUBLICO URBANO/AGRICOLA	2023-06-01	IITCA-Juriquilla	0.94	116.4400
84	MZ-60	472602.0	2224819.0	2047.0	S/R	MANANTIALES DEL CERRO COLORADO	TEZONTEPEC DE ALDAMA	HIDALGO	VALLE DEL MEZQUITAL	PUBLICO URBANO/AGRICOLA	2013-01-01	LESSER	0.1337	27.1643

Figura 8. Valores espurios de concentración de NO3

Fuente: Elaboración propia con base en información de DB.

Dado lo anterior, se eliminó el muestreo de 1606.33 [mg/L] de concentración correspondiente al aprovechamiento MZ-80. También, el muestreo del aprovechamiento MZ-60 con una concentración de 116. 4400 [mg/L] se descartó.

Clave	Tipo	Longitud (X)	Latitud (Y)	Elevación (msnm)	Nombre	Localidad	Municipio	Estado	Acuífero	Uso_x	Fecha de muestreo (mes-año)	Autor	Fluor (mg/L) [1.50 mg/L]	Nitrogeno de Nitratos (mg/L) [11 mg/L]	Arsenico (mg/L) [0.025 mg/L]	Plomo (mg/L) [0.01 mg/L]	Coliformes Fecales (MP/100ml)
225	MZ-326	480165.0	2212460.0	2177.0	POZO EL REFUGIO	EL REFUGIO	ATOTONILCO DE TULA	HIDALGO	VALLE DEL MEZQUITAL	PUBLICO URBANO	2017-09-01	CONAGUA	1.2316	1.284300	NaN	NaN	2400.0

Figura 9. Valores espurios de concentración de Coliformes fecales.

Fuente: Elaboración propia con base en información de DB.

Para el caso de coliformes fecales se descartó solo el muestreo con el valor de 2400 [mg/L] correspondiente al aprovechamiento MZ-326. Considerando lo anterior, se muestra el histograma sin los valores espurios:

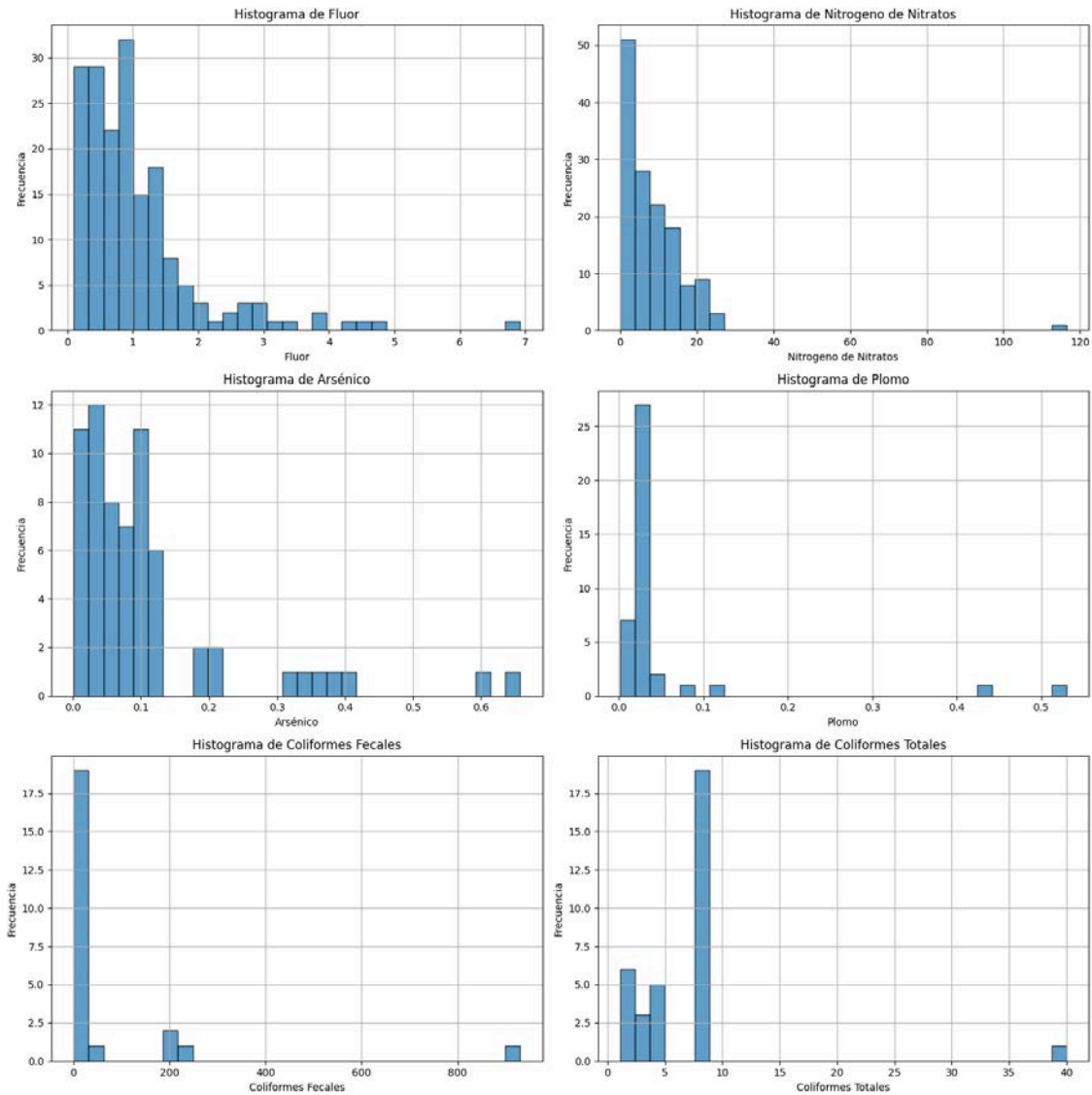


Figura 10. Histograma de concentración de elementos muestreados sin valores espurios.

Fuente: Elaboración propia con base en información de DB.

Posteriormente, se analizaron los valores extremos de los histogramas para determinar si eran significativos para el análisis, considerando también si correspondían a los aprovechamientos que en otros años de muestreo presentaron valores altos o si se encontraban en áreas con abastecimientos que muestran valores elevados para estos contaminantes.

Tabla 7. Control de registros de valores por elemento de los 157 aprovechamientos muestreados.

<i>Elemento</i>	<i><L.D.</i>	<i>ND</i>	<i>S/R</i>	<i>Valor numérico</i>	<i>Exceden el límite permisible</i>
<i>As</i>	62	55	54	66	64
<i>Coliformes Fecales</i>	64	107	40	24	24
<i>Coliformes Totales</i>	0	49	154	34	34
<i>F</i>	3	0	56	178	68
<i>NO3</i>	0	0	96	140	42
<i>Pb</i>	61	72	64	40	37

<L.D.=Límite de detección, ND= No determinado y SR= sin registro.

Fuente: Elaboración propia con base en información de DB.

La tabla anterior muestra los valores registrados en los muestreos de los 157 aprovechamientos. Algunos aprovechamientos no contaban con valores en la BD debido a tres razones: la primera es “menor al límite de detección” (L.D.), es decir, el valor es menor al que se puede detectar en los análisis; la segunda es “no determinado” (ND), es decir, no se determinó ningún valor; y la última es "sin registro" (SR), es decir, no se registró ningún valor del elemento asociado.

En el caso del “valor numérico” se refiere a los registros que cuenta con un valor, es decir, la concentración del elemento químico muestreado y cuáles de esos rebasan los límites permitidos respecto a la calidad del agua según la NOM-127-SSA1-2021 y la OMS, los cuales fueron usados en el análisis de autocorrelación espacial

Otro análisis exploratorio es el de la gráfica de tendencia del número de datos o registros de cada elemento. Se puede apreciar que para los cinco contaminantes, los años 2007 y 2008 fue donde más muestreos se realizaron, sin embargo, en estos años existe más discrepancia entre la cantidad de muestreos y la cantidad de valores numéricos que se obtuvieron, esto quiere decir que para estos años se tuvo mayor cantidad de valores <L.D., ND y S/R.

La gráfica de tendencias anuales para el flúor muestra que 2008 fue el año con el mayor número de muestreos, superando las 50 muestras. Sin embargo, tras este pico, se observa una notable disminución en el número de muestreos, alcanzando su punto más bajo entre 2014 y 2017, con muy pocos registros. A partir de 2018, se aprecia un incremento gradual en el número de muestreos, aunque sin llegar a los niveles observados en 2008.

En el caso del arsénico (As), 2008 fue el año con el mayor número de muestreos, superando las 50 muestras, lo que refleja un esfuerzo considerable en la monitorización. En contraste, 2017 tuvo el menor número de muestreos, con menos de 10 registros, lo que podría indicar cambios en la estrategia de muestreo o en la disponibilidad de recursos. A partir de 2018, se observa un aumento gradual en el número de muestreos, aunque no se alcanzan los niveles observados en 2008.

En cuanto a los muestreos que superan el límite permisible de arsénico, los años más preocupantes fueron 2012, 2022 y 2023, con concentraciones consistentemente elevadas. Este patrón es alarmante, ya que la exposición prolongada al arsénico puede tener graves implicaciones para la salud pública. Por otro lado, los años de 2014 a 2017 no registraron muestreos numéricos de arsénico, lo que podría estar relacionado con las zonas seleccionadas para los muestreos y el número limitado de los aprovechamientos muestreados, con menos de 10 muestras obtenidas en esos años.

A partir de 2018, se observa un incremento lineal en las muestras con valores elevados de arsénico, lo que sugiere un deterioro en la calidad del agua o un aumento en la presencia del contaminante. Esto podría deberse a una mayor actividad industrial, cambios en el uso del suelo, o una disminución en la eficacia de las medidas de control de contaminación.

Es importante destacar que la línea que representa los muestreos que exceden el límite permisible coincide casi perfectamente con la línea de los valores numéricos obtenidos. Esto indica que una proporción significativa de los muestreos realizados en estos años superó los límites de seguridad establecidos para el arsénico, lo que subraya la necesidad de una mayor vigilancia y de implementar medidas correctivas para abordar la presencia de este contaminante en el agua. Es esencial llevar a cabo estudios adicionales para identificar las fuentes de contaminación y establecer políticas efectivas para mitigar los riesgos asociados con la exposición al arsénico.

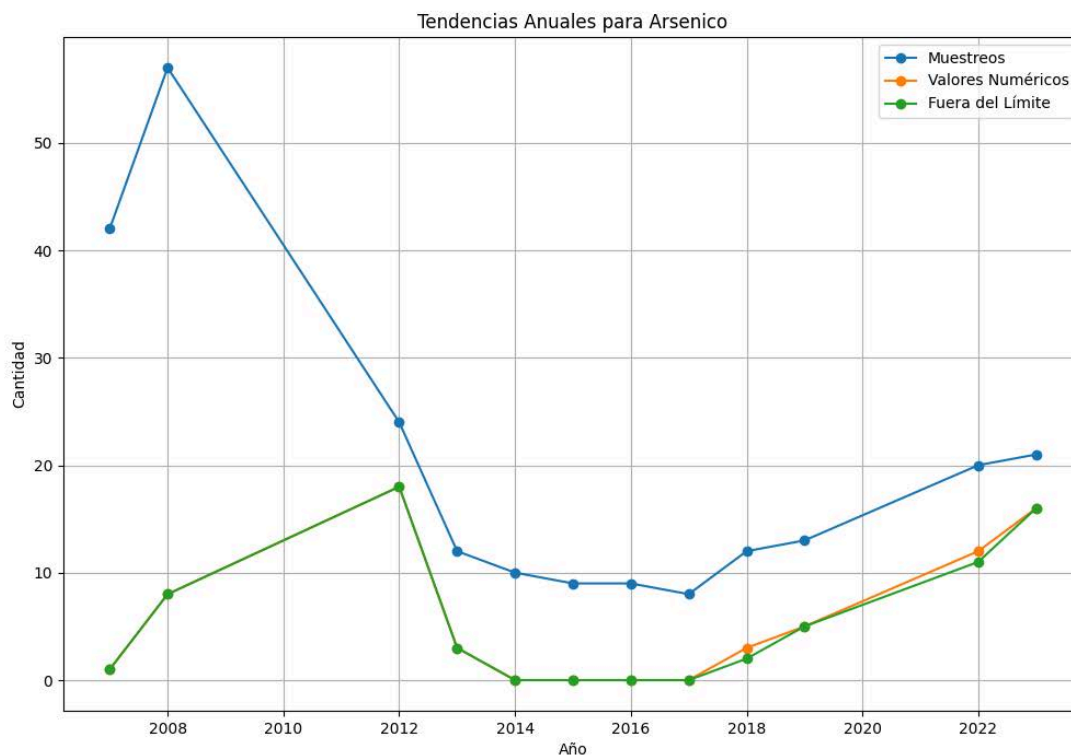


Figura 11. Tendencia anual de muestreo de Arsénico
Fuente: Elaboración propia con base en información de DB.

En la gráfica sobre coliformes fecales, se observa que el año con mayor número de muestreos fue 2008, con más de 50 registros, lo cual refleja un esfuerzo considerable en la monitorización de este contaminante. Sin embargo, a partir de ese año, hay una disminución notable en el número de muestreos, alcanzando su punto más bajo en 2017, con menos de 10 registros. Desde 2018, se ha visto un aumento gradual en los muestreos, aunque estos no han vuelto a los niveles observados en 2008.

Los valores numéricos, que representan la cantidad de coliformes fecales detectados, muestran una tendencia bastante estable a lo largo de los años, sin grandes fluctuaciones. Esta estabilidad sugiere que, en general, los niveles de coliformes fecales se han mantenido bajo control y cercanos a los límites permisibles.

En cuanto a los valores que exceden el límite permisible, se destaca que 2008 y 2012 fueron los años con más incidencias de excedencia. Sin embargo, en los años siguientes, la cantidad de muestras que superan estos límites disminuyó considerablemente, permaneciendo en niveles mínimos o inexistentes. Esta reducción sugiere una mejora en el control y manejo de la calidad del agua respecto a la presencia de coliformes fecales.

La coincidencia entre la línea de valores numéricos y la de valores fuera del límite permisible indica que la mayoría de los muestreos se mantuvieron dentro de los límites de seguridad establecidos. Esto es un indicador positivo de la calidad del agua y de la eficacia de las medidas implementadas para controlar este contaminante. A pesar de estos buenos resultados, es fundamental mantener un monitoreo constante para prevenir posibles aumentos en los niveles de coliformes fecales que puedan poner en riesgo la salud pública.

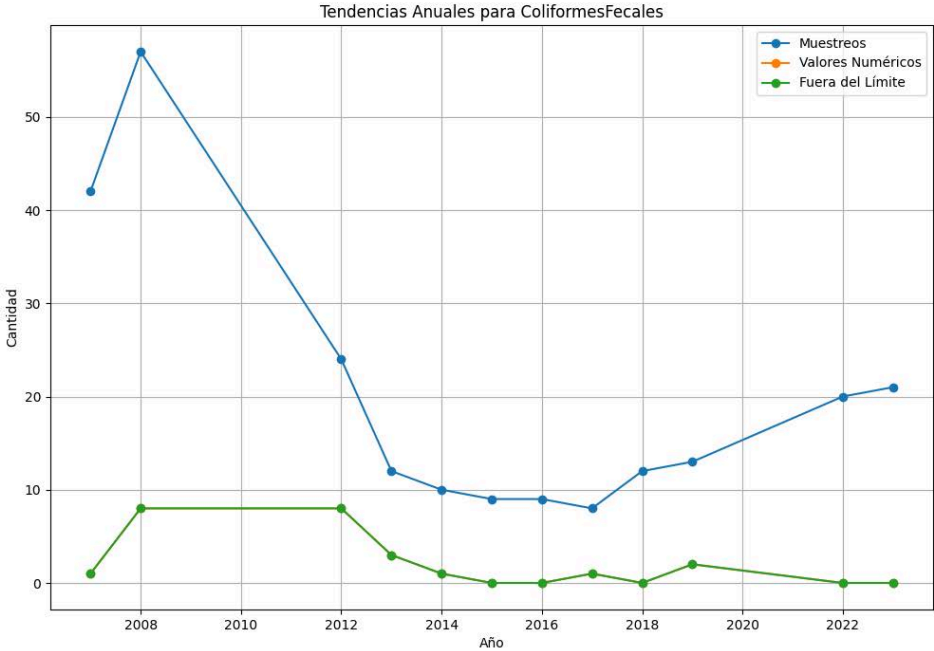


Figura 12. Tendencia anual de muestreo de Coliformes Fecales

Fuente: Elaboración propia con base en información de DB.

La gráfica de tendencias anuales para coliformes totales muestra que 2008 fue el año con el mayor número de muestreos, con más de 50 registros. Sin embargo, después de ese pico, se observa una disminución significativa en el número de muestreos, alcanzando un mínimo

entre 2014 y 2017, con registros muy reducidos. A partir de 2018, se percibe un aumento gradual en los muestreos, aunque estos no han vuelto a los niveles observados en 2008.

En cuanto a los valores numéricos de coliformes totales, la gráfica indica una tendencia estable y baja, con mínimas fluctuaciones a lo largo de los años. Esto sugiere que, en general, los niveles de coliformes totales han sido consistentemente bajos y no han mostrado variaciones significativas.

Los datos de valores que exceden el límite permisible señalan que los años con incidencias fueron principalmente 2007, 2008 y 2012. A partir de 2013, no se registran valores que superen los límites permisibles, lo cual es un indicativo positivo sobre la calidad del agua en relación con la presencia de coliformes totales. Este resultado sugiere un buen control y manejo de las fuentes de contaminación.

La coincidencia entre los valores numéricos y los límites permisibles indica que los muestreos realizados se encuentran mayoritariamente dentro de los rangos de seguridad establecidos para los coliformes totales, lo que refleja una situación controlada y una buena calidad del agua.

En conclusión, la estabilidad en los niveles de coliformes totales y la ausencia de excedencias en los últimos años son indicativos de un manejo efectivo de la calidad del agua. Sin embargo, es fundamental mantener una vigilancia constante para asegurar que estos niveles permanecen bajos y dentro de los límites de seguridad, especialmente ante posibles cambios en actividades industriales o agrícolas. Se recomienda una revisión periódica de las políticas y medidas actuales para garantizar su eficacia continua

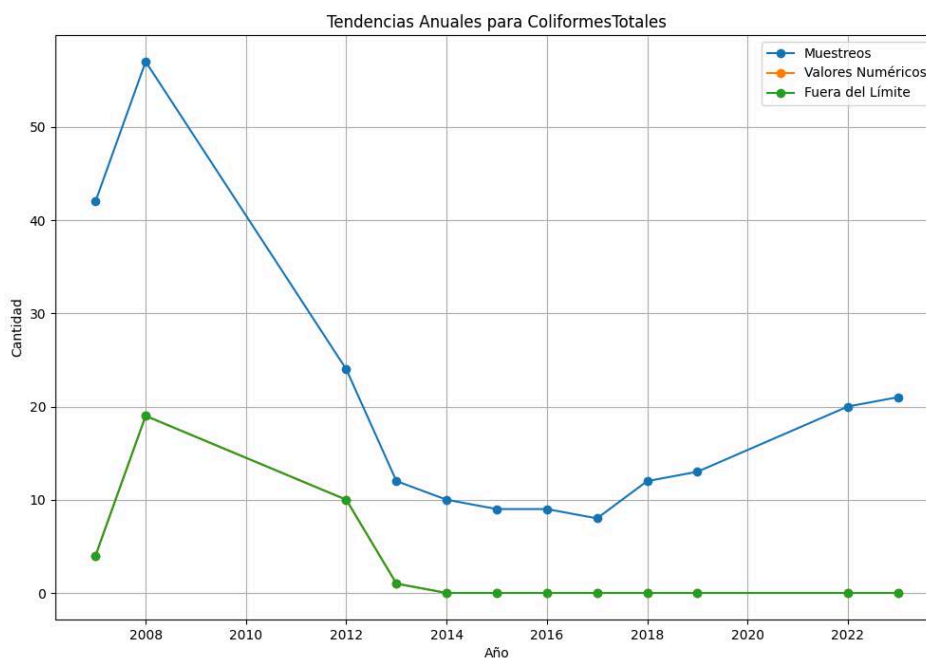


Figura 13. Tendencia anual de muestreo de Coliformes Totales.

Fuente: Elaboración propia con base en información de DB.

La gráfica de tendencias anuales para el flúor muestra que 2008 fue el año con el mayor número de muestreos, superando las 50 muestras. Sin embargo, tras este pico, se observa una notable disminución en el número de muestreos, alcanzando su punto más bajo entre 2014 y 2017, con muy pocos registros. A partir de 2018, se aprecia un incremento gradual en el número de muestreos, aunque sin llegar a los niveles observados en 2008.

En cuanto a los valores numéricos de flúor, la tendencia se mantiene relativamente constante a lo largo de los años, con una ligera disminución en los primeros años y una recuperación gradual desde 2018. Esto indica que los niveles de flúor en el agua han permanecido en un rango moderado, con algunas fluctuaciones pero sin cambios drásticos que sugieran un problema mayor.

Respecto a los valores que exceden el límite permisible de flúor, los datos destacan los años 2007, 2008 y 2023 como los de mayores incidencias. De 2012 a 2014, la cantidad de muestras que superan el límite disminuyó significativamente, manteniéndose en niveles muy bajos hasta 2015, donde se observa un ligero aumento. Este incremento se mantiene y en

2022 hay una disminución significativa, seguida de un nuevo aumento en 2023. Es importante señalar que hay una notable discrepancia entre la curva de muestreos fuera del límite permisible y la curva de valores numéricos. Por el contrario, a partir de 2012, las curvas de muestreos totales y valores numéricos muestran una gran coincidencia. Esta tendencia refleja una mejora en el control de los niveles de flúor en el agua, aunque el reciente incremento sugiere la necesidad de estar atentos para evitar problemas futuros de calidad del agua.

En resumen, la baja coincidencia entre los valores numéricos y los valores que exceden el límite permisible indica que la mayoría de los muestreos están dentro de los límites de seguridad establecidos. Esto sugiere una situación controlada en cuanto a la presencia de flúor en el agua. No obstante, el ligero aumento en los valores fuera del límite en 2022 subraya la importancia de mantener una vigilancia continua y revisar y reforzar las políticas y medidas existentes para asegurar la calidad del agua y proteger la salud pública.

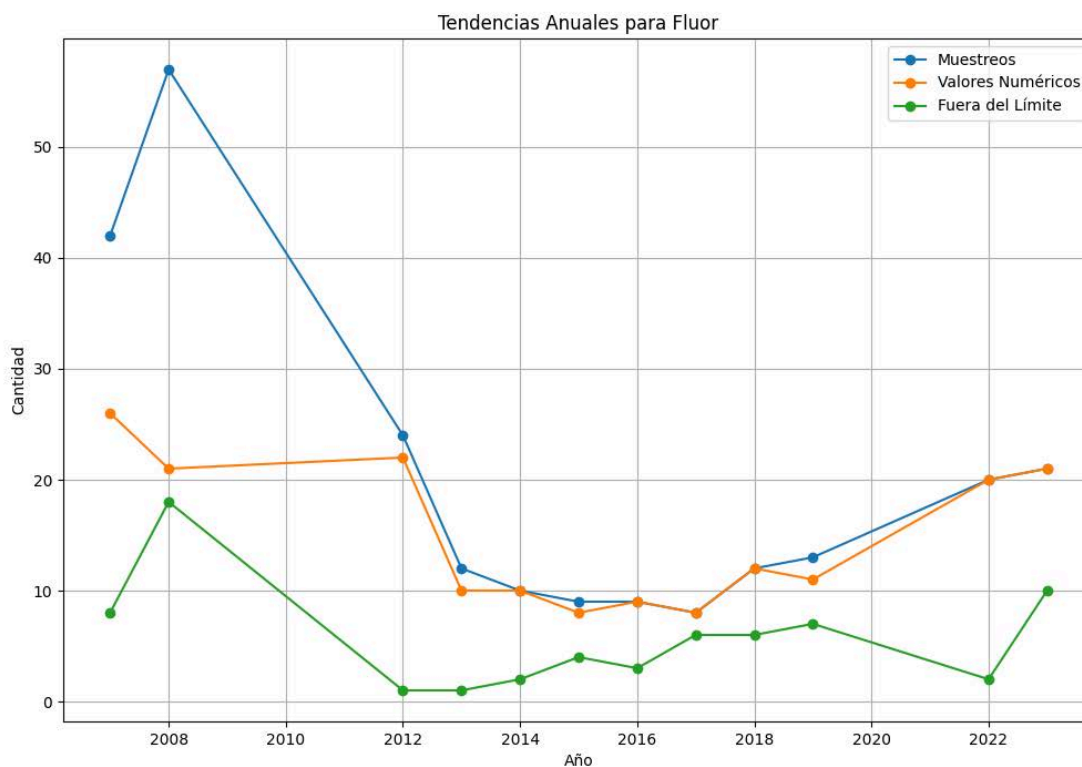


Figura 14. Tendencia anual de muestreo de Flúor
Fuente: Elaboración propia con base en información de DB.

La gráfica presenta las tendencias anuales de nitrógeno/nitratos, mostrando tres categorías: muestreos totales, muestreos con valores numéricos, y aquellos que superan el límite permisible. En 2008, se alcanzó el mayor número de muestreos, con más de 50 registros. Sin embargo, a partir de ese año, se observa una notable disminución, llegando a su punto más bajo entre 2014 y 2017. A partir de 2018, se observa un aumento gradual en el número de muestreos, aunque sin alcanzar los niveles de 2008.

Los datos indican que los años con mayores incidencias de valores que superan el límite permisible fueron 2012, 2013 y 2023. Tras estos picos, la cantidad de muestras que exceden el límite se mantuvo generalmente baja, con algunos incrementos ocasionales. En particular, se destaca un pico significativo en 2012, seguido de una disminución que se estabiliza en niveles bajos hasta 2015. Desde 2015, hay una tendencia ascendente en los valores que superan el límite, lo que indica un aumento en los niveles de estos compuestos en el agua. Este aumento se hace más notable a partir de 2018, culminando en un incremento significativo en 2022 y 2023, lo cual es motivo de preocupación.

La comparación entre las líneas de valores numéricos y los valores fuera del límite permisible revela que, en algunos años como de 2012 a 2014, hubo una mayor proporción de muestras que superaron el límite, sugiriendo problemas de calidad del agua en esos momentos. En otros años, las diferencias entre estas líneas indican que no todos los valores numéricos exceden el límite permisible, lo cual es positivo. A partir de 2012, la línea de valores numéricos muestra una tendencia similar y coincide con la curva de muestreos totales, lo que indica que los muestreos arrojaron valores numéricos.

En conclusión, aunque ha habido mejoras en la gestión de los niveles de nitrógeno/nitratos en ciertos períodos, la tendencia reciente al alza es preocupante y destaca la necesidad de una vigilancia continua. Es fundamental investigar las causas de este aumento y tomar medidas correctivas para garantizar la calidad del agua y proteger la salud pública. Además, es crucial revisar y fortalecer las políticas y medidas de control para mantener los niveles de nitrógeno/nitratos dentro de los límites seguros.

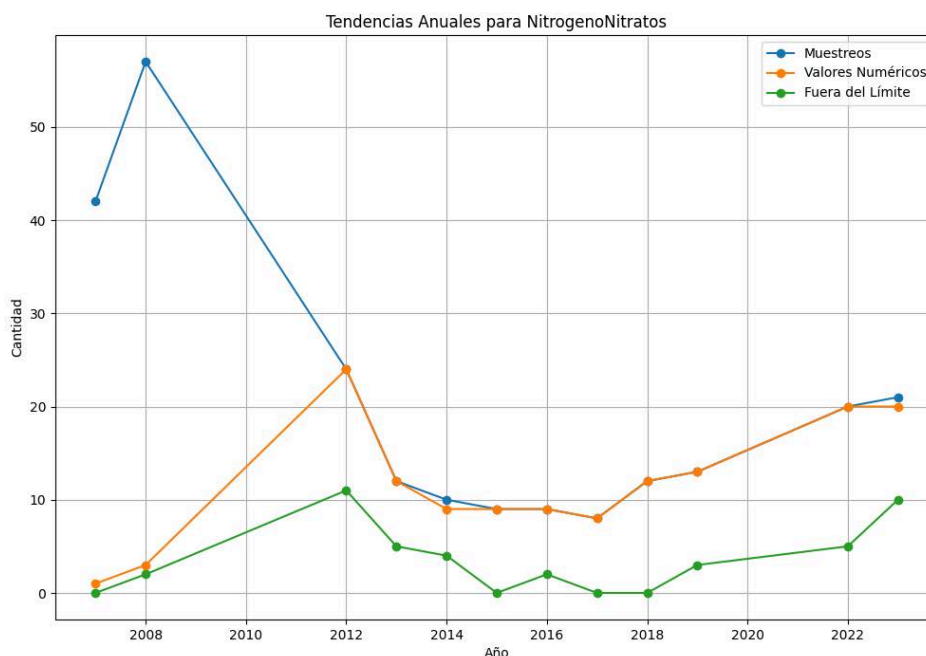


Figura 15. Tendencia anual de muestreo de Nitrógeno de Nitratos

Fuente: Elaboración propia con base en información de DB.

La gráfica ilustra las tendencias anuales del plomo, categorizadas en muestreos totales, muestreos con valores numéricos y muestreos que exceden el límite permisible. En 2008 se alcanzó el mayor número de muestreos, con más de 50 registros. A partir de entonces, se observa una disminución notable, llegando a un mínimo entre 2014 y 2017. Desde 2018, hay un aumento gradual en el número de muestreos, aunque todavía por debajo de los niveles de 2008.

En cuanto a los valores numéricos de plomo, han sido generalmente inexistentes, excepto en los años 2007 y 2008, donde se registraron más valores. Esto indica que la mayoría de los muestreos no detectaron plomo en concentraciones significativas, sugiriendo un control efectivo de este contaminante en el agua en la mayoría de los períodos.

Tras los años 2007 y 2008, los datos muestran que las incidencias de valores que superan el límite permisible son escasas, con pequeños incrementos notables en 2018 y 2023. En general, la mayoría de los años no presentan muestreos que excedan los límites de seguridad para el plomo, lo cual es positivo para la calidad del agua.

La comparación entre los valores numéricos y los que exceden el límite permisible indica que, en la mayoría de los casos, los niveles de plomo se mantienen dentro de los límites seguros. No obstante, los incrementos observados en 2018 y 2023 resaltan la importancia de un monitoreo continuo y riguroso para garantizar que estos niveles no aumentan de forma preocupante.

En conclusión, aunque los niveles de plomo en el agua parecen estar controlados, es fundamental mantener una vigilancia constante para evitar cualquier incremento que pudiera representar un riesgo para la salud pública. La reducción en los muestreos totales después de 2008 también subraya la necesidad de asegurar un monitoreo adecuado para detectar cualquier variación en la calidad del agua. Es esencial investigar las causas de los incrementos observados y tomar medidas correctivas si es necesario.

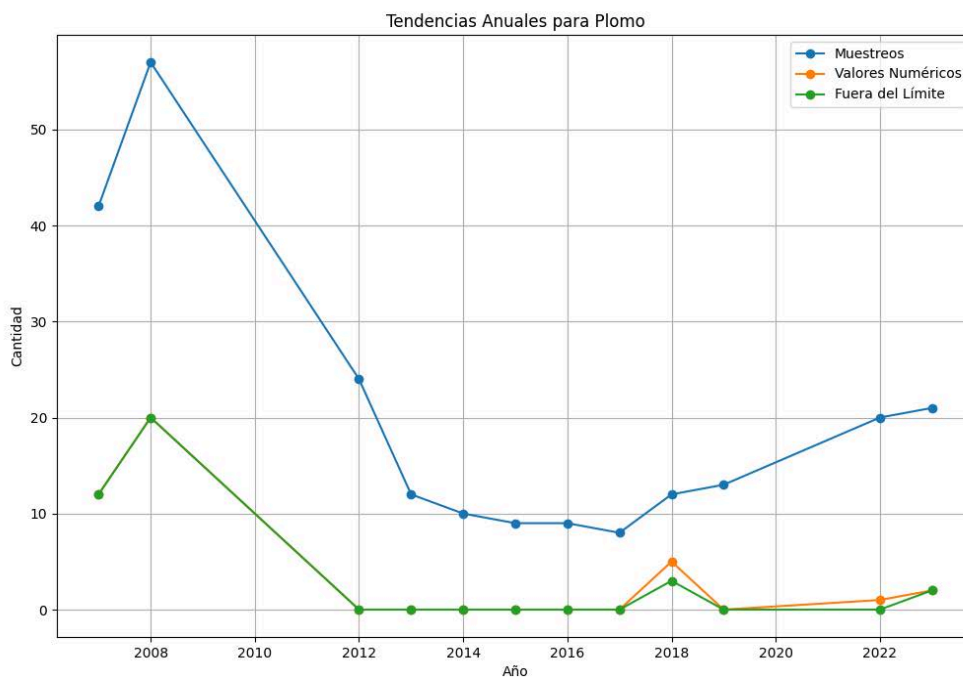


Figura 16. Tendencia anual de muestreo de Plomo

Fuente: Elaboración propia con base en información de DB.

Tabla 8. Número de aprovechamientos por año que rebasan el límite permisible según la NOM-127-SSA1-2021 y la OMS.

Año	Aprovechamientos muestreados	As	Coliformes		F	NO3	Pb	Total de mediciones que excede límite
			Totales	Fecales				
2007	42	1	4	1	12	-	15	75
2008	57	9	26	14	20	3	21	150
2012	24	20	10	8	1	12	-	75
2013	12	10	1	3	2	8	-	36
2014	10	-	-	1	2	4	-	17
2015	9	-	-	-	4	-	-	13
2016	9	-	-	-	3	2	-	14
2017	8	-	-	2	6	-	-	16
2018	12	2	-	-	6	-	3	23
2019	13	5	-	2	7	3	-	30
2022	20	11	-	-	2	5	-	38
2023	21	16	-	-	10	11	2	60
Total	237	74	41	31	75	48	41	547

*123 aprovechamientos muestreados en el estudio.

Fuente: Elaboración propia con base en información de DB.

IV. Base de datos de enfermedades reportadas por elementos considerados como contaminantes

Para construir la base de datos sobre los padecimientos asociados al uso y consumo de agua contaminada con elementos como arsénico, plomo, flúor, nitratos y coliformes, se llevó a cabo una extensa y minuciosa revisión de la literatura científica y técnica disponible. Este proceso incluyó la búsqueda y análisis de artículos académicos, informes gubernamentales, estudios de caso, y datos epidemiológicos publicados en diversas fuentes. Se consultaron publicaciones académicas de editoriales reconocidas, como Redalyc, Neurotoxicology, Revista Internacional de Ciencia y Tecnología, SciELO, entre otras, así como documentos

relevantes de organizaciones internacionales como la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA).

Durante esta revisión, se identificaron y seleccionaron estudios que abordaban la relación entre la exposición, uso y consumo a los contaminantes en el agua considerados en el presente estudio, como la variedad de enfermedades y afecciones de salud, incluyendo cáncer, enfermedades renales, trastornos neurológicos, enfermedades gastrointestinales, problemas dentales y óseos, entre otros. Se prestó especial atención a los estudios que proporcionaban datos cuantitativos sobre niveles de contaminantes y tasas de incidencia de enfermedades, así como a aquellos que ofrecían un análisis detallado de las vías de exposición y los mecanismos de toxicidad. La información recopilada fue estructurada y organizada en una base de datos que contiene datos de los padecimientos, de los contaminantes asociados, y la fuente de información.

A continuación, se muestra de forma resumida los enfermedades reportadas:

Tabla 9. Afectaciones en la salud por elementos contaminantes reportadas.

<i>Elemento contaminante</i>	<i>Afectación</i>	<i>Autor o fuente</i>
As	Problemas estomacales, parálisis parcial, ceguera, cáncer de próstata, riñón, pulmón, piel e hígado.	Mendoza-Cano <i>et al.</i> , 2017.
	Cáncer de piel, vejiga, pulmón e hígado.	IARC, 2004.
	Epidérmicos, cardiovasculares, renales, hematológicos y respiratorios	Othax, <i>et al.</i> , 2014.
Coliformes	Enteritis y tifoidea	Carillo y Lozano, 2008.
	Enteritis	Medline Plus, 2023.
	Poliomielitis	OMS, 2023 , s.d, Olmos y Olmos-Palma Y Aguilar, 2022. .
	Amebiasis	Secretaria de Salud, 2016.
	Diarrea, disentería, hepatitis A y cólera	OMS, 2023.
F	Fluorosis dental, fluorosis esquelética y fracturas óseas	Hurtado-Jimenez y Gardea-Torresdey, 2005.
	Fluorosis dental y esquelética, desarrollando una mayor susceptibilidad a enfermedades renales y cáncer.	Othax, <i>et al.</i> , 2014.

	Afectación al desarrollo del cerebro humano	
NO3	Cáncer gastrointestinal	Quintero-Somains y Quirindongo, M., 2004.
	Cáncer de estómago, tumores cerebrales y enfermedades del sistema nervioso	IARC, 2004.
	Metahemoglobinemia	Othax, <i>et al.</i> , 2014.
	Desarrollo de linfomas y cánceres, enfermedades coronarias, infecciones del tracto respiratorio, y malformaciones en los recién nacidos. Cáncer de estómago	Cárdenas <i>et al.</i> , 2013.
Pb	Anemia	Manual MSD, 2022.
	Daños neuronales	Mendoza-Cano <i>et al.</i> , 2017.
	Enfermedades del sistema nervioso central, sistema endocrino y reproductivo, y enfermedades cardiovasculares	Pollack <i>et al.</i> , 2014.
	Enfermedades renales	Office of Research and Development, National Center for Environmental Assessment, 1987.
	Enfermedad de Parkinson	Gorell, <i>et al.</i> , 1999.
	Problemas de aprendizaje e hipoevolutismo	Hui Zhu, <i>et al.</i> , 2014.
	Glucosuria, porfiria e infertilidad	Octavio-Aguilar y Olmos-Palma, 2022.
	Enfermedad de la piel (ante la exposición directa) y enfermedades infecciosas estomacales (parasitarias y gastrointestinales)	Lara Figueroa y García Salazar, 2019.

Fuente: Elaboración propia basada en búsqueda bibliográfica.

V. Base de datos de Egresos Hospitalarios y Defunciones

Se elaboró una base de datos de egresos hospitalarios utilizando información recabada de la Secretaría de Salud, abarcando un período de 2010 a 2022. Para cada año, se revisaron meticulosamente los catálogos adjuntos, así como los registros contenidos en tablas proporcionados por dicha entidad. Este proceso implicó la depuración de los datos, asegurándose de seleccionar únicamente aquellos tópicos que se consideraron necesarios y

relevantes para el análisis de las consecuencias en la salud relacionadas con la calidad del agua. La revisión de los registros hospitalarios incluyó la identificación y clasificación de diagnósticos médicos correspondientes a padecimientos previamente identificados en la construcción de la base de enfermedades.

A continuación se muestra la tabla de los registros iniciales y finales por año de la base de datos de egresos hospitalarios.

Tabla 10. Control de registros de Egresos Hospitalarios de 2010 a 2022.

<i>Año</i>	<i>Inicial registros</i>	<i>Inicial columnas</i>	<i>Final registro</i>	<i>Final columnas</i>
2010	2634339	46	16146	25
2011	2775027	45	17157	25
2012	2880520	46	17863	25
2013	2879313	45	17491	25
2014	2959197	45	18882	25
2015	2970812	45	18117	25
2016	1829755	45	8446	25
2017	2729341	45	17340	25
2018	2623379	39	17013	25
2019	2629434	50	17146	25
2020	1937344	49	12247	25
2021	2088780	49	13284	25
2022	2479897	49	13927	25
<i>Total de registros</i>	33417138	-	205059	-

Fuente: Elaboración propia con base en el resultado de Google Colab, Secretaria de Salud, 2010- 2020.

Por otro lado, la base de datos sobre defunciones se creó a partir de los datos contenidos en INEGI, en el apartado de Registros Administrativos: Estadísticas Vitales (Estadísticas de Defunciones Registradas), nuevamente abarcando un período de 2010 a 2022. Se llevó a cabo una revisión de la información contenida en las tablas y se hizo una discriminación de las columnas que serían de utilidad para el análisis, como el año de registro, las claves de las entidades de residencia, las claves de los padecimientos causantes de las defunciones, la clave de la entidad donde se registró el deceso, así como datos sobre edad, sexo y derechohabencia de las personas fallecidas.

A continuación se muestra la tabla de los registros iniciales y finales por año de la base de datos de defunciones:

Tabla 11. Control de registros de defunciones de 2010 a 2022.

<i>Año</i>	<i>Inicial registros</i>	<i>Inicial columnas</i>	<i>Final registro</i>	<i>Final columnas</i>
2010	592018	53	3310	25
2011	590694	53	3508	25
2012	602355	59	3457	25
2013	623600	59	3631	25
2014	633642	59	3782	25
2015	655689	59	3878	25
2016	685767	59	4097	25
2017	703048	59	4193	25
2018	722612	59	4357	25
2019	747785	59	4586	25
2020	1048576	59	6892	25
2021	1048576	59	7497	25
2022	847717	59	5393	25
<i>Total de registros</i>	9502079	-	58581	-

Fuente: Elaboración propia con base en el resultado de Google Colab, INEGI, 2010- 2020.

Nuevamente, la información fue procesada a través de la plataforma Google Colab, por lo que de esta forma se pudo filtrar y homogeneizar la información. Como se mencionó, cada base tiene asociada una clave que hace referencia a enfermedades, lo cual permitió poder identificar cuales son las afectaciones en la salud por los cinco elementos contaminantes.

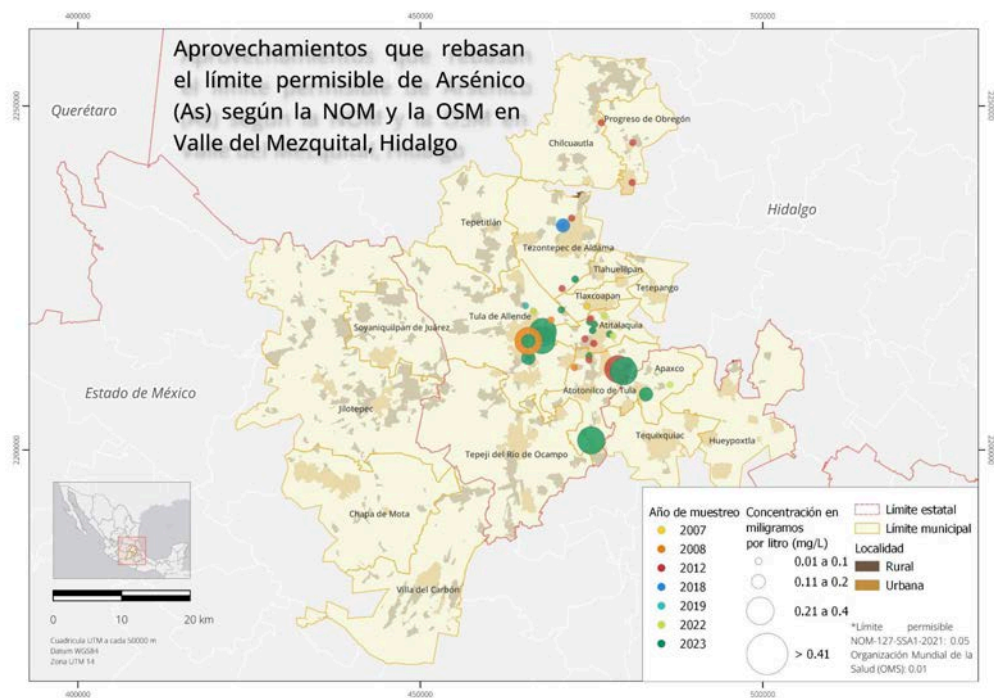


Figura 29. Distribución de aprovechamientos que rebasan los límites permisibles de Arsénico.

Fuente: Elaboración propia con base en información de DB, INEGI, 2023.

En el análisis de las concentraciones de arsénico (Figura 29) en el agua del VM, Hidalgo, se observa que los aprovechamientos de agua que superan el límite permisible de arsénico según la NOM y la OMS se concentran predominantemente en la zona este del área de estudio, específicamente, los municipios afectados incluyen Chilcuautla, Progreso de Obregón, Tezontepec de Aldama, Apaxco, Tlaxcoapan, Atitalaquia, Atotonilco y Tula de Allende.

De estos, los municipios de Atitalaquia, Atotonilco y Tula de Allende registran el mayor número de aprovechamientos de agua con concentraciones de arsénico que exceden los límites permisibles, que se destacan con diferentes colores según el año de muestreo, y por el tamaño de puntos que representan las concentraciones de arsénico. Las concentraciones más altas de arsénico, superiores a 0.41 mg/L, se observan principalmente en estos municipios.

También, se muestra la distribución temporal de las concentraciones de arsénico desde 2007 hasta 2023, lo que permite identificar no solo los puntos críticos actuales, sino también cómo ha evolucionado la contaminación por arsénico en el tiempo. Los límites permisibles considerados en este análisis son 0.05 mg/L según la NOM-127-SSA1-2021 y 0.01 mg/L según la Organización Mundial de la Salud (OMS).

En conclusión, el mapa evidencia una preocupante concentración de arsénico en el agua de varios municipios del Valle del Mezquital, siendo imperativo abordar este problema para garantizar la seguridad y salud de la población local.

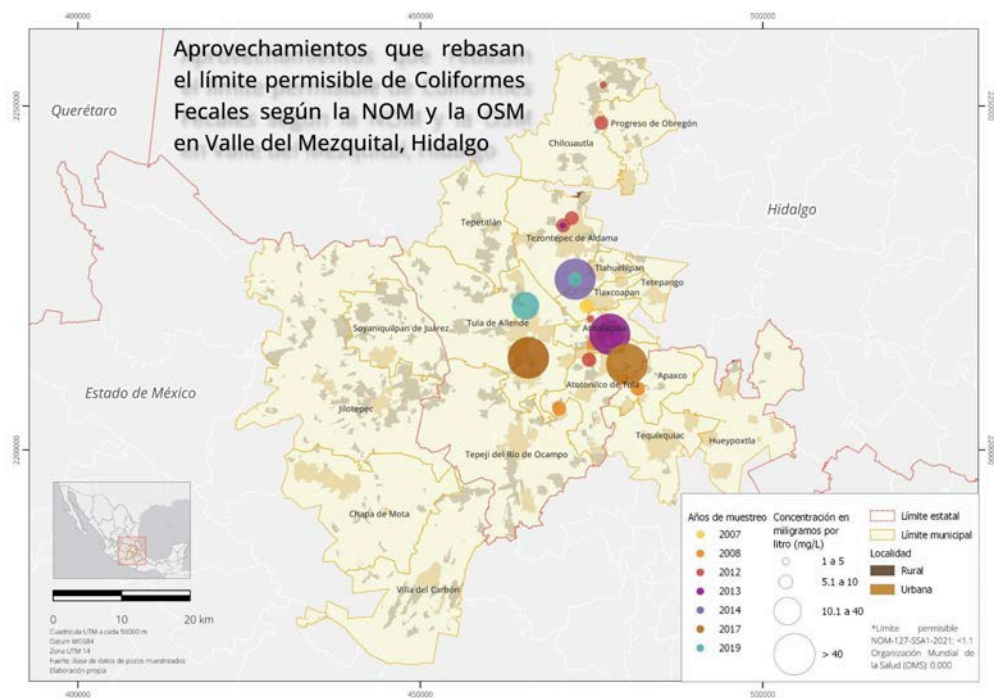


Figura 30. Distribución de aprovechamientos que rebasan los límites permisibles de Coliformes fecales.

Fuente: Elaboración propia con base en información de DB, INEGI, 2023.

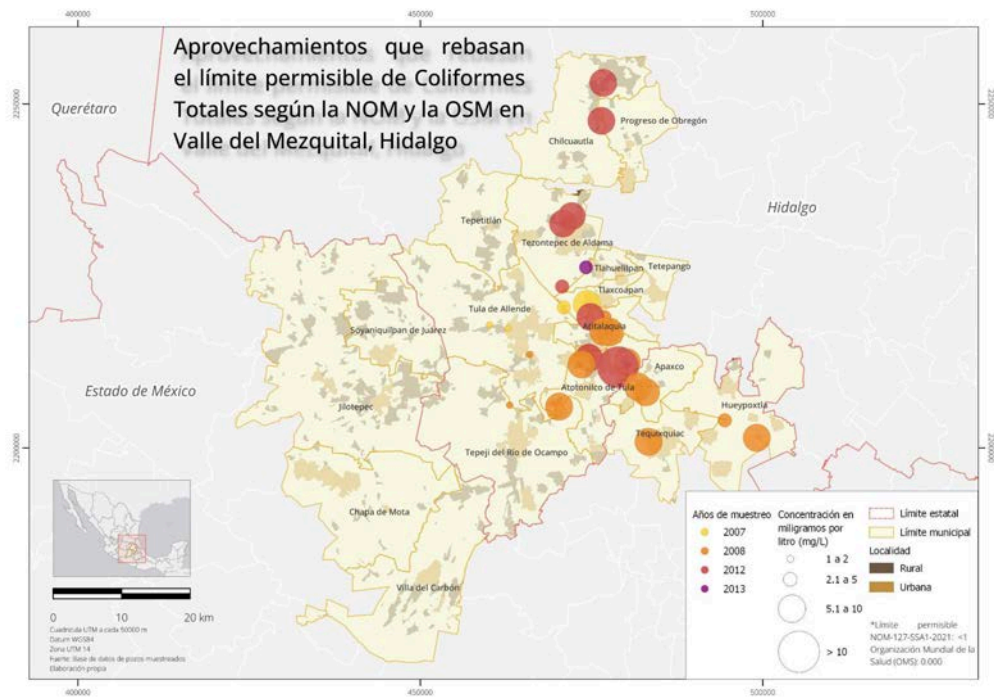


Figura 31. Distribución de aprovechamientos que rebasan los límites permisibles de Coliformes totales.

Fuente: Elaboración propia con base en información de DB, INEGI, 2023.

En el análisis de las concentraciones de coliformes (Figura 31) en el agua del VM, Hidalgo, y se observa que los aprovechamientos de agua que superan el límite permisible de coliformes según la NOM y la OMS se concentran predominantemente en la zona este del área de estudio, específicamente, los municipios afectados incluyen Chilcuautla, Tezontepec de Aldama, Apaxco, Tlaxcoapan, Atitalaquia, Atotonilco y Tula de Allende.

De estos, los municipios de Tezontepec, Atitalaquia, Atotonilco y Tula de Allende registran el mayor número de aprovechamientos de agua con concentraciones de coliformes que exceden los límites permisibles, que se destacan con diferentes colores según el año de muestreo, y por el tamaño de puntos que representan las concentraciones de coliformes. Las concentraciones más altas de coliformes, superiores a 5.1 mg/L, se observan principalmente en estos municipios. El límite permisible considerado en este análisis es 1 mg/L según la NOM-127-SSA1-2021.

En el análisis de las concentraciones de flúor (Figura 32) en el agua del VM, Hidalgo, se observa que los aprovechamientos de agua que superan el límite permisible de flúor según la NOM y la OMS se concentran predominantemente en la zona este del área de estudio, específicamente, los municipios afectados incluyen Chilcuautla, Progreso de Obregón, Tepetitlán, Tlaxcoapan, Tezontepec de Aldama, Atitalaquia, Atotonilco y Tula de Allende.

De estos, los municipios de Tezontepec, Atitalaquia, Atotonilco y Tula de Allende registran el mayor número de aprovechamientos de agua con concentraciones de flúor que exceden los límites permisibles, que se destacan con diferentes colores según el año de muestreo, y por el tamaño de puntos que representan las concentraciones de coliformes. Las concentraciones más altas de flúor, superiores a 3.1 mg/L, se observan principalmente en estos municipios.

Los límites permisibles considerados en este análisis son 1 mg/L según la NOM-127-SSA1-2021 y 1.5 mg/L según la Organización Mundial de la Salud (OMS).

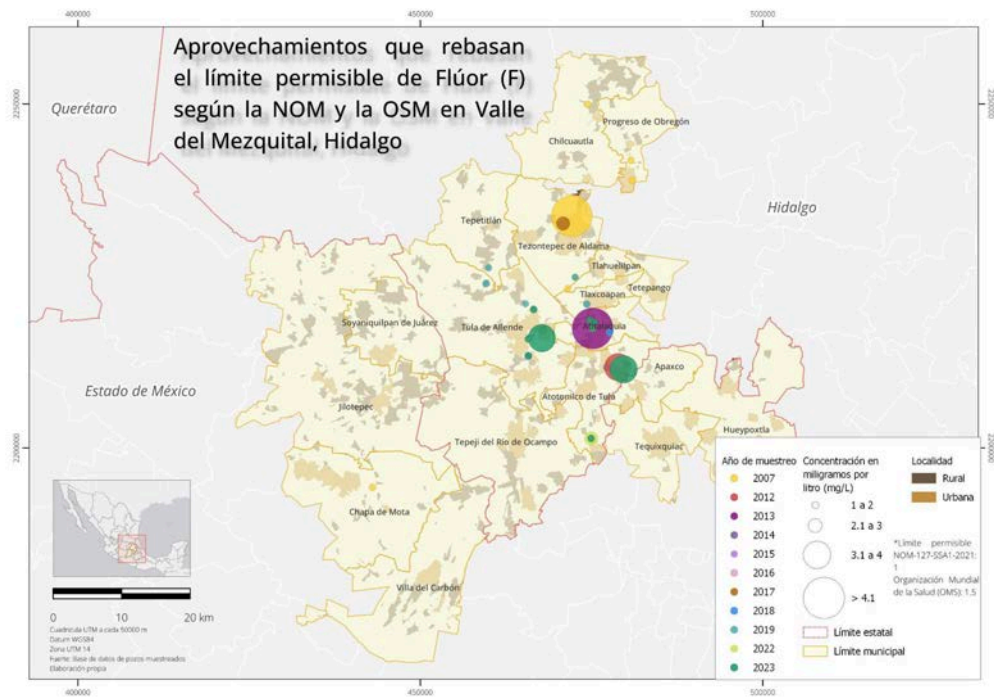


Figura 32. Distribución de aprovechamientos que rebasan los límites permisibles de Flúor.

Fuente: Elaboración propia con base en información de DB, INEGI, 2023

En el análisis de las concentraciones de nitratos (Figura 33) en el agua del VM, Hidalgo, se observa que los aprovechamientos de agua que superan el límite permisible de nitratos según la NOM y la OMS se concentran predominantemente en la zona este del área de estudio, específicamente, los municipios afectados incluyen Progreso de Obregón, Tepetitlán, Tlaxcoapan, Tetepango, Tezontepec de Aldama, Atitalaquia, Atotonilco y Tula de Allende.

De estos, los municipios de Tezontepec, Atitalaquia, y Tula de Allende registran el mayor número de aprovechamientos de agua con concentraciones de nitratos que exceden los límites permisibles, que se destacan con diferentes colores según el año de muestreo, y por el tamaño de puntos que representan las concentraciones de nitratos. Las concentraciones más altas de nitratos, superiores a 20.1 mg/L, se observan principalmente en estos municipios. El límite permisible considerado en este análisis es 11 mg/L según la NOM-127-SSA1-202.

En el análisis de las concentraciones de plomo (Figura 34) en el agua del VM, Hidalgo, se observa que los aprovechamientos de agua que superan el límite permisible de plomo según la NOM y la OMS se concentran predominantemente en la zona este del área de estudio, específicamente, los municipios afectados incluyen Chilcuautla, Progreso de Obregón, Tepetitlán, Tlaxcoapan, Tezontepec de Aldama, Atitalaquia, Atotonilco y Tula de Allende.

De estos, los municipios de Tezontepec, Atitalaquia, Atotonilco y Tula de Allende registran el mayor número de aprovechamientos de agua con concentraciones de flúor que exceden los límites permisibles, que se destacan con diferentes colores según el año de muestreo, y por el tamaño de puntos que representan las concentraciones de coliformes. Las concentraciones más altas de flúor, superiores a 3.1 mg/L, se observan principalmente en estos municipios.

Los límites permisibles considerados en este análisis son 1 mg/L según la NOM-127-SSA1-2021 y 1.5 mg/L según la Organización Mundial de la Salud (OMS).

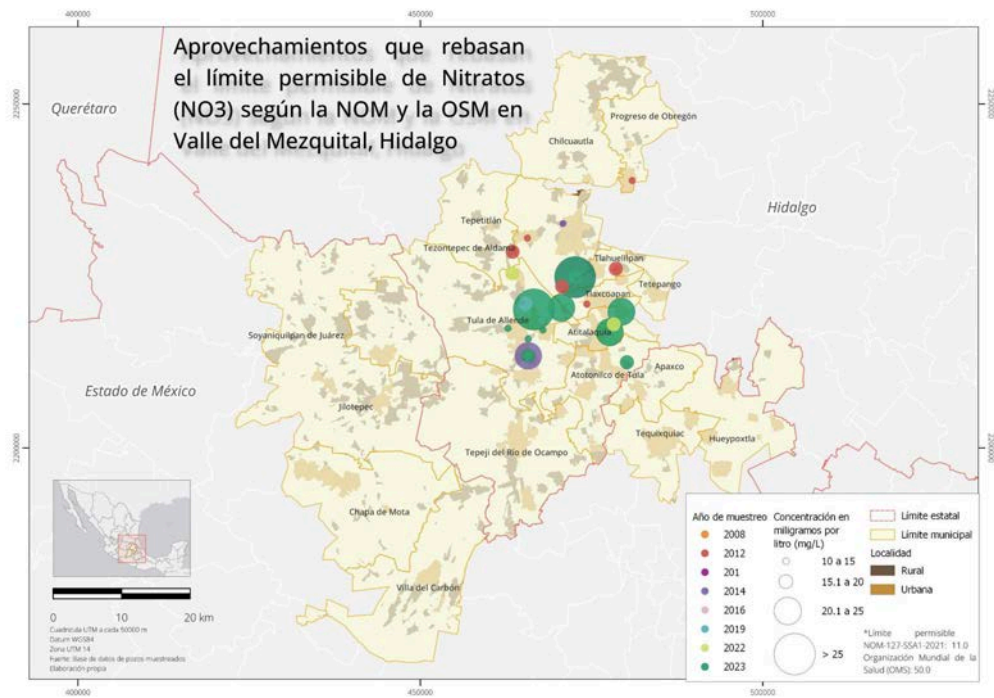


Figura 33. Distribución de aprovechamientos que rebasan los límites permisibles de Nitratos.
Fuente: Elaboración propia con base en información de DB, INEGI, 2023.

VI. *Análisis de autocorrelación espacial*

Con el objetivo de establecer la posible relación entre el consumo de agua y las enfermedades en la población local, se asoció la base de egresos hospitalarios y defunciones resultantes de las enfermedades reportadas para cada uno de los cinco elementos contaminantes, a un shapefile de las localidades de Estado de México (Apaxco, Chapa de Mota, Hueypoxtla, Jilotepec, Soyaniquilpan, Tequixquiac y Villa del Carbón) e Hidalgo (Atitalaquia, Atotonilco de Tula, Chilcuautla, Progreso de Obregón, Tepeji del Río, Tepetitlán, Tetepango, Tezontepec de Aldama, Tlahuelilpan, Tlaxcoapan y Tula de Allende) xque se consideran en el estudio. Como resultado se obtuvieron diez shapefiles, cinco de egresos hospitalarios y cinco de defunciones, correspondientes a los cinco contaminantes respectivamente.

Es importante mencionar que, también se agregó al shapefile la tasa de defunciones y egresos hospitalarios de 2010 a 2022, considerando la información de población total de las localidades de los municipios considerados anteriormente, a través de los tabulados del Censo de Población y Vivienda de 2010 y 2020, y Encuesta Intercensal 2015, a escala localidad. Esto se consideró para evitar el sesgo en localidades con un alto número de población local.

Para el estudio, se utilizó el software GeoDa, el cual es útil para el análisis espacial y permite a los usuarios explorar y visualizar datos espaciales (Anselin, L., *et al.*, 2006). Se consideró obtener el Índice I de Moran y el G de Getis-Ord, que permiten determinar si los valores de una variable están agrupados en áreas cercanas (autocorrelación positiva) o dispersos (autocorrelación negativa), y si hay patrones espaciales significativos. A continuación, se explicarán estos conceptos con más detalle.

i. I de Morán

El índice de Morán (I de Morán) es una medida de autocorrelación espacial que evalúa si un conjunto de valores en un espacio geográfico está agrupado, disperso o distribuido al azar. Para esta investigación, la I de Morán univariada se utiliza para medir la autocorrelación espacial de una sola variable en un área geográfica, permitiendo identificar si los valores similares tienden a agruparse espacialmente (Anselin, L., 2003). En este caso, se utilizó para analizar la distribución espacial de los egresos y las defunciones relacionadas a padecimientos asociados a la presencia de Arsénico, Coliformes, Flúor, Nitratos y Plomo

Un componente crucial en el análisis de autocorrelación espacial con la I de Morán es la matriz de pesos espaciales, ya que define las relaciones espaciales entre las ubicaciones geográficas en el estudio. Esta matriz determina cómo se consideran los vecinos de cada ubicación y cómo se ponderan sus valores, la cual puede estar construida a partir de pesos espaciales basado en contigüidad y distancia.

La matriz basada en pesos espaciales por contigüidad significa que dos unidades espaciales comparten un borde común de longitud distinta de cero. Operativamente, podemos distinguir además entre un criterio de contigüidad de torre y de reina , en analogía con los movimientos permitidos para las piezas con ese nombre en un tablero de ajedrez Anselin, L., (2020), puede basarse en criterios de contigüidad (vecindad inmediata), distancia (dentro de un radio específico) o k-vecinos más cercanos (los k puntos más cercanos a cada ubicación). En cambio, la matriz basada en distancia es determinación de una relación de vecindad para ponderaciones espaciales basadas en la distancia es una medida formal de distancia, o una métrica de distancia (*Ibid*), la cual puede ser obtenida mediante distancia euclidiana (la más usada) o Manhattan.

Es importante comparar los resultados obtenidos con diferentes matrices de pesos para entender cómo la vecindad seleccionada afecta el tipo de patrones espaciales obtenidos en función del contexto del estudio y las características de los datos. Además, influye en la identificación de clusters (áreas con alta autocorrelación) y outliers (ubicaciones con valores inusualmente altos o bajos comparados con sus vecinos).

Para el cálculo del I de Moran, se usó el shapefile de los polígonos de las localidades que tiene asociado las afectaciones a la salud por los cinco contaminantes con la tasa de población de egresos hospitalarios y defunciones, mencionado anteriormente. Se aseguró de que los datos estuvieran en el formato adecuado y que las variables de interés estuvieran correctamente definidas.

Cabe mencionar que, se crearon cuatro matrices de pesos espaciales yendo al menú “Tools” y seleccionando “Weights Manager”. Aquí, se crearon matrices de pesos espaciales de distancia basadas en: 1) mínima promedio, 2) percentil 95, 3) mediana y 4) la observación de la distribución del histograma (tratando de abarcar la mayor cantidad de valores del mismo), y se guardaron las matrices de pesos espaciales. La construcción de las matrices se explicará a detalle más adelante.

Para calcular el I de Moran, se seleccionó "Space" en el menú principal y luego "Univariate Moran's I". Se eligió la variable que se deseaba analizar (que fueron las tasas por año, de egresos hospitalarios y defunciones) y la matriz de pesos espaciales que se había creado anteriormente. GeoDa calculó el I de Moran y mostró los resultados, incluyendo el valor del I de Morán, el valor esperado bajo la hipótesis nula y el valor de P (probabilidad).

Un valor positivo del I de Moran indicó autocorrelación espacial positiva (valores similares a 1 tienden a estar cerca), un valor negativo indicó autocorrelación espacial negativa (valores disímiles cercanos a -1 tienden a estar cerca) y un valor cercano a cero indicó una distribución aleatoria. El valor P indicó si la autocorrelación espacial observada era significativamente diferente de lo que se esperaría por azar.

Finalmente se registraron en un archivo excel los resultados de cada valor (I de Morán, E[], P-Value, Media, Desviación estándar y Z-value), por año, por distancia y por contaminante, tanto para el caso de los egresos como para las defunciones. Por otra parte, se guardaron los resultados de clusters en sus cuatro componentes (Alto-Alto, Bajo-Bajo, Bajo-Alto, Alto-Bajo), en el mismo shapefile sobre el que se estaba trabajando, con la finalidad de trabajar con esos datos en un Sistema de Información Geográfica (SIG) como QGIS, que es un software de código abierto que permite a los usuarios visualizar, gestionar, editar, analizar y representar datos geoespaciales.

ii. G de Getis Ord*

La estadística G^* de Getis-Ord es una medida utilizada en el análisis de autocorrelación espacial para identificar clusters espaciales de valores altos o bajos en una variable determinada. A diferencia del I de Moran, que proporciona una medida global de autocorrelación espacial, la G^* de Getis-Ord es una medida local que permite detectar patrones espaciales a un nivel más granular. Esta estadística evalúa la concentración de valores en las áreas cercanas de cada punto o polígono, ayudando a identificar "hot spots" (clústeres de valores altos) y "cold spots" (clústeres de valores bajos) (Getis y Ord, 1992).

La importancia de la G^* de Getis-Ord radica en su capacidad para revelar detalles locales en la estructura espacial de los datos que podrían no ser evidentes con medidas globales como el I de Moran. Este enfoque local es especialmente útil en estudios de salud pública, criminología, y gestión ambiental, donde es crucial identificar áreas específicas de alta o baja incidencia para tomar decisiones informadas (Ord y Getis, 1995).

Una de las fortalezas de la G^* de Getis-Ord frente al I de Moran es su sensibilidad a la variación local, lo que permite una detección más precisa de patrones espaciales a nivel de vecindarios o comunidades. Además, mientras que el I de Moran puede diluir los patrones locales debido a su naturaleza global, la G^* de Getis-Ord mantiene el enfoque en las variaciones locales, proporcionando una herramienta robusta para el análisis espacial detallado (Anselin, 1995).

Para realizar un análisis G^* (G de Getis-Ord) en GeoDa, se utilizaron nuevamente los shapefiles obtenidos anteriormente. Posteriormente, se crearon cuatro matrices de pesos espaciales de distancia basadas en: 1) mínima promedio, 2) percentil 95, 3) mediana y 4) la observación de la distribución del histograma.

Para calcular el G^* (G de Getis-Ord), se seleccionó "Space" en el menú principal y luego "Univariate Local G^* ". Se eligió la variable a analizar (Tasas por año) y la matriz de pesos espaciales creada en el paso previo. GeoDa calculó el G^* y mostró los resultados, incluyendo el valor del G^* , el valor esperado bajo la hipótesis nula y el valor de P . Un valor positivo de G^* indicó la presencia de un clúster de valores altos (hot spot), un valor negativo de G^* indicó la presencia de un clúster de valores bajos (cold spot) y un valor cercano a cero indicó que no hay un patrón espacial significativo. El valor P mostró si el patrón espacial observado se desvía de manera significativa de lo que sería esperado por casualidad.

De manera análoga a lo hecho con los resultados del índice de Morán, se guardaron los datos obtenidos por distancia y por año, en nuevas columnas de la tabla de atributos del shapefile utilizado, con el objetivo de procesar esos datos en un SIG y crear la cartografía necesaria en una etapa posterior.

A continuación, se muestra un resumen de la información contenida en cada shapefile para el análisis del Índice de Morán y la G* (Getis Ord):

Tabla 12. Registros de localidades con enfermedades reportadas de cada elemento contaminante.

Elemento	Enfermedades por		Localidades iniciales	Localidades finales (sin valores NA)		Porcentaje %	
	E	D		E	D	E	D
As	658	2553	360	91	239	25	66.39
Coliformes	591	148	360	143	74	39.72	20.55
F	7597	2060	360	220	220	61.11	61.11
NO3	211	830	360	43	180	11.94	50
Pb	142	106	360	35	58	9.72	16.11

E= Egresos hospitalarios y D=Defunciones

Fuente: Elaboración propia con información de DB.

Cálculo de distancias

Como se mencionó anteriormente, la matriz de pesos espaciales basadas en distancias permiten evaluar la relación entre ubicaciones geográficas en función de su proximidad. Estas matrices se utilizan para calcular la autocorrelación espacial y entender cómo las características observadas en un lugar están relacionadas con las características en lugares cercanos. En el presente estudio se consideraron debido a que las localidades se encuentran dispersas, es decir, los polígonos no tienen contigüidad, por lo que resulta un inconveniente en el análisis.

Se realizó un análisis considerando diferentes distancias entre localidades afectadas por cada elemento contaminante, con el objetivo de incluir un número variable de vecinos. Se tomaron en cuenta cuatro distancias: 1) mínima promedio, 2) percentil 95, 3) mediana y 4) basada en el histograma. Las distancias se calcularon a través de QGIS, considerando que los shapefiles de localidad estuvieran en proyección UTM zona 14 con el Datum WGS 84.

Primero se obtuvo el centroide de cada localidad para obtener la matriz de distancia resumen, en la que se obtiene para cada localidad la distancia media, desviación estándar, mínima y máxima, respecto a las demás. Con el resultado obtenido, se calculó mediante Google Colab el promedio mínimo, el percentil 95 y la mediana de todas las localidades

respecto a las demás, con el propósito de obtener diferentes distancias. También se consideró esas distancias debido a que la distribución de los datos muestran un sesgo positivo.

La distancia respecto al histograma se obtuvo graficando la frecuencia absoluta de todas las distancias mínimas de cada localidad respecto a las demás. Observando el histograma se seleccionó la distancia idónea para el análisis. En la siguiente tabla se muestra las distancias calculadas para cada localidad respecto a las demás que tiene egresos hospitalarios y defunciones por padecimientos posiblemente causados por cada elementos contaminante:

Se obtuvo la distancia respecto al histograma graficando la frecuencia absoluta de todas las distancias mínimas de cada localidad en relación con las demás. Observando el histograma, se seleccionó la distancia idónea para el análisis. En la siguiente tabla se muestran las distancias calculadas para cada localidad en relación con las demás, que tienen egresos hospitalarios y defunciones por padecimientos posiblemente causados por cada elemento contaminante con lo que se realizó la I de Morán y G* de Getis Ord:

a. Egresos

Tabla 13. Umbrales de distancia establecidos de localidad a localidad para egresos.

<i>Elemento</i>	<i>Distancia 1 (Promedio mínimo)</i>	<i>Distancia 2 (Percentil 95)</i>	<i>Distancia 3 (Mediana)</i>	<i>Distancia 4 (Histograma)</i>
<i>Arsénico</i>	3145.09	6742.30	2604.07	7000
<i>Coliformes</i>	2532.36	5499.33	2155.17	6000
<i>Flúor</i>	2092.70	4036.87	1780,97	5000
<i>Nitratos</i>	5045.52	9969.76	3927.23	5000
<i>Plomo</i>	5492.07	11260.25	4200.102	12000

Fuente: Elaboración propia con base en resultado de QGIS.

b. Defunciones

Tabla 14. Umbrales de distancia establecidos de localidad a localidad para defunciones.

<i>Elemento</i>	<i>Distancia 1 (Promedio mínimo)</i>	<i>Distancia 2 (Percentil 95)</i>	<i>Distancia 3 (Mediana)</i>	<i>Distancia 4 (Histograma)</i>
<i>Arsénico</i>	2103.60	3724.30	1802.01	4000
<i>Coliformes</i>	3979.45	7577.39	3439.24	7000
<i>Flúor</i>	2198.40	4045.25	1855.87	4000
<i>Nitratos</i>	2465.07	4525.09	2097.32	4000
<i>Plomo</i>	4246.88	7832.29	3671.05	8000

Fuente: Elaboración propia con base en resultado de QGIS.

6. Resultados

Localidad a localidad: I de Morán

A continuación, se presentarán los resultados obtenidos mediante la aplicación del índice de Moran univariado en GeoDa, con el objetivo de evaluar las tasas de egresos y de defunciones por año, para cada uno de los cinco contaminantes en estudio. Estos resultados se han calculado considerando las distancias entre localidades, lo que permite examinar cómo la proximidad espacial influye en la distribución de estas tasas.

a. Egresos

1. Arsénico (As)

Para el caso de este elemento el análisis del Índice de Moran local respecto a los egresos hospitalarios, arrojó valores negativos en varios años, como 2022 (-0.0966 y -0.0978) y 2017 (-0.1211), dichos valores indican dispersión espacial en los egresos hospitalarios asociados al arsénico. Esto sugiere que los casos están distribuidos de manera más uniforme en el espacio, sin un patrón claro de concentración. Por otro lado, se observaron valores positivos como en 2016 (0.0578), lo que en este caso sugiere cierto grado de agrupamiento, aunque no muy agregado.

En cuanto al Valor P (P Value) se observaron valores bajos (< 0.05), que de acuerdo con la

teoría indicarían que los resultados del índice de Moran son estadísticamente significativos. Por ejemplo, para los años 2016 (0.047 y 0.044), 2017 (0.033), 2018 (0.038) y 2022 (0.026 y 0.031) esto significa que la dispersión observada no es aleatoria, sino que existe un patrón espacial significativo para ese periodo de tiempo. La dispersión de casos sugiere entonces que las fuentes de contaminación por arsénico pueden estar distribuidas en varias áreas, sin concentrarse en puntos específicos. En los años 2016, 2017, y 2022, se observa una autocorrelación espacial significativa en los egresos hospitalarios ligados al arsénico para diferentes distancias. Esto implica que durante estos años, la distribución de los egresos hospitalarios por arsénico presenta patrones espaciales definidos y no es al azar.

Tabla 15. Significancia de egresos por Arsénico (As) por diferente distancia entre localidades.

AÑO	<i>Distancia 1 (Promedio mínimo)</i>	<i>Distancia 2 (Percentil 95)</i>	<i>Distancia 3 (Mediana)</i>	<i>Distancia 4 (Histograma)</i>
2010	0,241	0,408	0,345	0,392
2011	0,075	0,342	0,230	0,372
2012	0,133	0,328	0,215	0,352
2013	0,341	0,426	0,367	0,413
2014	0,312	0,323	0,434	0,258
2015	0,170	0,474	0,342	0,405
2016	0,217	0,047	0,260	0,044
2017	0,033	0,093	0,293	0,089
2018	0,233	0,235	0,038	0,237
2019	0,070	0,141	0,128	0,153
2020	0,182	0,346	0,179	0,397
2021	0,458	0,400	0,161	0,427
2022	0,131	0,031	0,084	0,026
<i>Tasa promedio</i>	0,439	0,338	0,409	0,410

Fuente: Elaboración propia con base en resultado de Geoda.

II. Coliformes (Coli)

El Índice de Moran para egresos asociados a enfermedades causadas por coliformes devolvió valores positivos como: 0.1877 y 0.1929 en 2016, que indican un claro agrupamiento espacial, donde los egresos hospitalarios están concentrados en ciertas áreas. Asimismo, valores muy altos como el de 0.2802 en 2017 sugiere un fuerte

agrupamiento, indicando áreas específicas con alta incidencia de casos.

Respecto al Valor P se advirtieron valores muy bajos (< 0.01) en 2016 (0.015 y 0.017) y 2022 (0.028 y 0.040), los cuales indican que el agrupamiento observado es estadísticamente significativo y no es resultado del azar. Especialmente esto puede implicar que los agrupamientos indiquen que existen áreas específicas con problemas graves de contaminación por coliformes, lo cual puede facilitar la identificación y el manejo de las fuentes de contaminación.

Tabla 16. Significancia de egresos por Coliformes (Coli) por diferente distancia entre localidades.

AÑO	Distancia 1 (Promedio mínimo)	Distancia 2 (Percentil 95)	Distancia 3 (Mediana)	Distancia 4 (Histograma)
2010	0,368	0,251	0,270	0,398
2011	0,234	0,362	0,189	0,356
2012	0,481	0,229	0,215	0,290
2013	0,488	0,188	0,452	0,220
2014	0,304	0,093	0,235	0,094
2015	0,492	0,412	0,475	0,421
2016	0,050	0,017	0,072	0,015
2017	0,226	0,139	0,044	0,152
2018	0,222	0,079	0,372	0,082
2019	0,405	0,376	0,303	0,204
2020	0,106	0,468	0,110	0,239
2021	0,433	0,369	0,442	0,091
2022	0,040	0,062	0,028	0,096
Tasa promedio	0,068	0,133	0,078	0,133

Fuente: Elaboración propia con base en resultado de Geoda.

III. Flúor (F)

En cuanto al Índice de Moran para egresos asociados a enfermedades ligadas al flúor, se obtuvieron valores muy altos, como 0.6796 y 0.7044 en 2018 y 2019 respectivamente, que indican un fuerte agrupamiento espacial, sugiriendo que los egresos hospitalarios están altamente concentrados en ciertas zonas. Valores altos menores de 0.1729 por ejemplo, todavía indican agrupamiento.

Para el Valor P se encontraron valores extremadamente bajos (< 0.01), en 2018, 2019 y 2020 (0.001 en varias observaciones), estos valores extremadamente bajos indican que el fuerte agrupamiento observado es altamente significativo y no es aleatorio. Esto sugiere que puede haber áreas muy específicas con altos niveles de contaminación por flúor, posiblemente debido a fuentes puntuales como ciertos aprovechamientos o sistemas de abastecimiento de agua.

Tabla 17. Significancia de egresos por Flúor (F) por diferente distancia entre localidades.

AÑO	<i>Distancia 1 (Promedio mínimo)</i>	<i>Distancia 2 (Percentil 95)</i>	<i>Distancia 3 (Mediana)</i>	<i>Distancia 4 (Histograma)</i>
2010	0,377	0,455	0,252	0,332
2011	0,16	0,401	0,025	0,029
2012	0,472	0,158	0,46	0,084
2013	0,174	0,056	0,012	0,221
2014	0,111	0,112	0,172	0,267
2015	0,145	0,382	0,144	0,489
2016	0,215	0,151	0,075	0,048
2017	0,269	0,447	0,147	0,487
2018	0,001	0,006	0,001	0,004
2019	0,001	0,01	0,005	0,007
2020	0,036	0,019	0,032	0,018
2021	0,34	0,038	0,477	0,046
2022	0,039	0,109	0,077	0,209
<i>Tasa promedio</i>	0,014	0,031	0,018	0,2

Fuente: Elaboración propia con base en resultado de Geoda.

IV. Nitratos (NO₃)

En lo que concierne al Índice de Moran de los nitratos, resultaron valores variables, por ejemplo, en 2014 (0.1086) y 2017 (0.1724) se observan agrupamientos, mientras que en 2021 (-0.0284) hay dispersión, un valor negativo indica una distribución más uniforme de los casos. Esto sugiere variabilidad en el patrón espacial de los egresos hospitalarios.

En cuanto al Valor P, se obtuvieron valores bajos a moderados (< 0.05) en 2014 (0.022) y 2017 (0.037), los valores bajos como se había mencionado indican que los patrones de agrupamiento y dispersión son estadísticamente significativos. La variabilidad en los

patrones espaciales podría deberse a cambios en las fuentes de contaminación o en los hábitos de consumo de agua en diferentes áreas.

Tabla 18. Significancia de egresos por Nitratos (NO₃) por diferente distancia entre localidades.

AÑO	<i>Distancia 1 (Promedio mínimo)</i>	<i>Distancia 2 (Percentil 95)</i>	<i>Distancia 3 (Mediana)</i>	<i>Distancia 4 (Histograma)</i>
2010	0,418	0,3558	0,17	0,418
2011	0,44	0,358	0,33	0,444
2012	0,324	0,347	0,14	0,324
2013	0,369	0,232	0,379	0,369
2014	0,055	0,185	0,022	0,055
2015	0,089	0,292	0,199	0,089
2016	0,193	0,158	0,305	0,193
2017	0,037	0,357	0,351	0,037
2018	0,43	0,136	0,216	0,43
2019	0,347	0,295	0,131	0,347
2020	0,377	0,321	0,364	0,377
2021	0,423	0,258	0,399	0,423
2022	0,292	0,27	0,056	0,292
<i>Tasa promedio</i>	0,121	0,348	0,295	0,121

Fuente: Elaboración propia con base en resultado de Geoda.

V. Plomo (Pb)

Finalmente, el Índice de Moran respecto al Plomo, dio valores negativos: -0.1004 y -0.1321 en 2018 y 2019 que indican dispersión espacial, sugiriendo que los egresos hospitalarios por plomo están distribuidos de manera más uniforme. De igual forma, se registraron algunos valores cercanos a cero, lo que revela poca o ninguna agrupación.

En relación al valor P se encontraron valores bajos a moderados (< 0.05) en 2013 (0.038, 0,017, 0,012), 2014 (0,035, 0,022) y 2015 (0.011, 0,02. 0,026), los valores bajos indican que la dispersión observada es estadísticamente significativa, esto podría apuntar que las fuentes de contaminación por plomo están distribuidas en varias áreas, posiblemente debido a múltiples fuentes pequeñas o difusas.

Tabla 19. Significancia de egresos por Plomo (Pb) por diferente distancia entre localidades.

AÑO	<i>Distancia 1 (Promedio mínima)</i>	<i>Distancia 2 (Percentil 95)</i>	<i>Distancia 3 (Mediana)</i>	<i>Distancia 4 (Histograma)</i>
2010	0,406	0,336	0,08	0,31
2011	0,133	0,369	0,162	0,272
2012	0,409	0,246	0,448	0,452
2013	0,038	0,017	0,142	0,012
2014	0,035	0,022	0,394	0,092
2015	0,011	0,02	0,292	0,026
2016	0,182	0,262	0,001	0,158
2017	0,429	0,314	0,201	0,429
2018	0,3	0,48	0,288	0,44
2019	0,423	0,193	0,435	0,24
2020	0,421	0,45	0,248	0,212
2021	0,299	0,428	0,338	0,463
2022	0,154	0,478	0,416	0,26
<i>Tasa promedio</i>	0,057	0,087	0,182	0,028

Fuente: Elaboración propia con base en resultado de Geoda.

b. Defunciones

Respecto a las defunciones por padecimientos asociados al arsénico se observaron los siguientes resultados, derivados del análisis de significancia estadística para determinar si existen patrones de agrupamiento en los decesos asociados a enfermedades vinculadas al uso y consumo de agua con altas concentraciones de Arsénico, Coliformes, Flúor, Nitratos y Plomo.

1. Arsénico (As)

Distancia 1 (Mínima promedio): P-value para esta distancia varían significativamente a lo largo de los años. Los años 2015 y 2016 muestran valores extremadamente bajos (0.005 y 0.001), lo que sugiere una alta significancia estadística en esos años. De manera general, hay fluctuaciones considerables año a año. Distancia 2 (Percentil 95): Los P-value para esta distancia son relativamente más altos comparados con Distancia 1. Años como 2013 y 2022 tienen valores muy bajos (0.084 y 0.014 respectivamente), indicando significancia

estadística en esos años. La mayoría de los años tienen P-value por encima de 0.1, indicando menor significancia estadística.

Distancia 3 (Mediana): Los P-value en esta distancia también muestran fluctuaciones, con años como 2016 y 2022 presentando valores bajos (0.003 y 0.014). El promedio de los valores en esta categoría es 0.044, indicando una tendencia general hacia la significancia estadística. Distancia 4 (Histograma): En esta distancia, los P-value son generalmente más altos comparados con las otras distancias, con un promedio de 0.053. Aunque hay fluctuaciones, los valores tienden a ser más consistentes, con solo algunos años como 2013 y 2014 presentando valores relativamente bajos (0.028 y 0.063).

Los años 2010, 2013, 2015, 2016 y 2022 muestran una mayor frecuencia de P-value bajos en múltiples distancias, indicando una mayor significancia estadística y, por lo tanto, es probable que hayan tenido los clusters más válidos de defunciones por Arsénico. Estos años muestran una alta significancia estadística en varias métricas, lo que sugiere que en estos años hubo una detección robusta de clusters de defunciones relacionadas con Arsénico. Los promedios de los P-value en diferentes distancias, sugieren que hay una tendencia a la significancia en distancias cortas y medianas.

Tabla 20. Significancia de defunciones por Arsénico (As) por diferente distancia entre localidades.

AÑO	Distancia 1 (Promedio mínima)	Distancia 2 (Percentil 95)	Distancia 3 (Mediana)	Distancia 4 (Histograma)
2010	0,020	0,298	0,018	0,445
2011	0,336	0,468	0,321	0,406
2012	0,291	0,172	0,257	0,385
2013	0,073	0,084	0,078	0,028
2014	0,497	0,457	0,339	0,360
2015	0,005	0,319	0,006	0,283
2016	0,001	0,099	0,003	0,124
2017	0,383	0,497	0,424	0,475
2018	0,487	0,490	0,376	0,363
2019	0,178	0,092	0,236	0,114
2020	0,344	0,148	0,128	0,046
2021	0,012	0,365	0,052	0,196
2022	0,131	0,014	0,264	0,040
Tasa promedio	0,368	0,044	0,421	0,053

Fuente: Elaboración propia con base en resultado de Geoda.

II. Coliformes (Coli)

Como resultado del proceso estadístico para determinar los años con mayor significancia estadística en defunciones asociadas a los coliformes, y de acuerdo a la distancia usada en la matriz de pesos, se obtuvieron los siguientes valores: Distancia 1 (Mínima promedio): Ningún año tiene P-Values menores a 0.05. Distancia 2 (Percentil 95) en el año 2015 con 0.021. Distancia 3 (Mediana): 2014 con 0.034 y 2021 con 0.037. Distancia 4 (Histograma): Ningún año tiene valores p menores a 0.05. En resumen los años con mayor significancia estadística son 2014, 2015, y 2021, con P-values de 0.034, 0.021 y 0.037, respectivamente.

El año 2014 presenta autocorrelación espacial en distancias medianas: La significancia en Distancia 3 indica que en 2014 las defunciones por coliformes tienden a agruparse en la mediana de las distancias, sugiriendo una dispersión moderada de los eventos de defunción. En 2015 la autocorrelación espacial se observa en distancias intermedias. La significancia en Distancia 2 (percentil 95) sugiere que en 2015 las defunciones por coliformes forman clusters significativos a distancias intermedias. Finalmente 2021 tiene autocorrelación

espacial similar a 2014, la significancia en Distancia 3 indica una agrupación de defunciones en la mediana de las distancias.

Los años 2014, 2015 y 2021 presentan autocorrelación espacial significativa, sugiriendo que en estos años hubo una mayor tendencia a la formación de clusters de defunciones por coliformes. La significancia en distancias medianas (2014 y 2021) y distancias intermedias (2015) sugiere que los patrones de agrupación varían en función de la distancia, con una tendencia general hacia clusters en distancias medianas. Los resultados indican que las defunciones por coliformes tienden a agruparse en ciertos años, con una dispersión moderada en distancias medianas y clusters intermedios, reflejando variaciones espaciales en la incidencia de defunciones relacionadas con coliformes.

Tabla 21. Significancia de defunciones por (Coliformes) por diferente distancia entre localidades.

AÑO	Distancia 1 (Promedio mínima)	Distancia 2 (Percentil 95)	Distancia 3 (Mediana)	Distancia 4 (Histograma)
2010	0,375	0,268	0,349	0,229
2011	0,098	0,148	0,275	0,145
2012	0,330	0,183	0,446	0,281
2013	0,102	0,209	0,329	0,314
2014	0,058	0,360	0,034	0,407
2015	0,099	0,411	0,114	0,149
2016	0,262	0,021	0,227	0,067
2017	0,300	0,209	0,303	0,060
2018	0,344	0,335	0,445	0,157
2019	0,426	0,298	0,405	0,255
2020	0,245	0,312	0,436	0,326
2021	0,070	0,393	0,092	0,166
2022	0,391	0,112	0,037	0,114
Tasa promedio	0,387	0,090	0,740	0,056

Fuente: Elaboración propia con base en resultado de Geoda.

III. Flúor (F)

Los resultados obtenidos de la aplicación de la herramienta estadística P-value, para las defunciones asociadas al flúor, en función de matrices de peso con diferentes distancias, fueron los siguientes: Distancia 1 (Mínima promedio): Se observan valores bajos de p-value

en 2012 (0.092) y 2020 (0.068). Distancia 2 (Percentil 95) Valores bajos de P-value: 2014 (0.021), 2016 (0.038), 2020 (0.010). Distancia 3 (Mediana): Valores bajos de P-value: 2016 (0.057), 2020 (0.010). Distancia 4 (Histograma): Valores bajos de P-value: 2014 (0.023), 2016 (0.060), 2020 (0.017)

Los P-value fluctúan significativamente de año en año, indicando una variabilidad en las concentraciones de defunciones por flúor. La tendencia a lo largo del tiempo muestra que 2010-2013 tienen oscilaciones con un pico de concentración en 2012. El 2014 es un año de alta concentración de defunciones por flúor. Por otro lado, 2015-2017 es un período relativamente más estable con concentraciones significativas en 2016. De 2018 a 2022 se observa que 2020 es un año clave de alta concentración.

El análisis de los datos muestra que las defunciones ligadas al flúor tienen una tendencia a la variabilidad a lo largo de los años, con ciertos años (2012, 2014, 2016, y 2020) presentando concentraciones significativas. Los valores bajos de P-value en estos años sugieren la existencia de clústeres, y, por lo tanto, una mayor concentración de defunciones por flúor. La presencia de valores bajos de P-value en años específicos como 2014 y 2020 en varias distancias sugiere concentraciones significativas de defunciones por flúor en estos períodos. Esto podría ser un indicativo de eventos específicos que han influido en la mortalidad relacionada con el flúor.

Tabla 22. Significancia de defunciones por Flúor (F) por diferente distancia entre localidades.

AÑO	<i>Distancia 1 (Promedio mínima)</i>	<i>Distancia 2 (Percentil 95)</i>	<i>Distancia 3 (Mediana)</i>	<i>Distancia 4 (Histograma)</i>
2010	0,422	0,456	0,227	0,492
2011	0,203	0,406	0,468	0,319
2012	0,092	0,483	0,128	0,461
2013	0,341	0,073	0,200	0,067
2014	0,451	0,021	0,311	0,023
2015	0,412	0,362	0,315	0,402
2016	0,372	0,038	0,057	0,060
2017	0,237	0,393	0,443	0,373
2018	0,261	0,197	0,349	0,171
2019	0,201	0,080	0,379	0,069
2020	0,068	0,010	0,010	0,017
2021	0,451	0,257	0,393	0,262
2022	0,339	0,070	0,430	0,074
<i>Tasa promedio</i>	0,116	0,072	0,319	0,069

Fuente: Elaboración propia con base en resultado de Geoda.

IV. Nitratos (NO₃)

La identificación de años con significancia estadística ($p\text{-value} < 0.05$), arrojó los siguientes datos: para la Distancia 1 (Mínima promedio) el año 2017 con 0.038, para la Distancia 2 (Percentil 95) en los años 2010 con 0.045, 2014 con 0.101, 2015 con 0.008 y 2019 con 0.032. Para la Distancia 3 (Mediana) el año 2014 con 0.01, finalmente la Distancia 4 (Histograma) los años 2015 con 0.022, 2019 con 0.044, 2020 con 0,021 y 2021 con 0.032. Por lo que los años con mayor significancia estadística en relación con la autocorrelación espacial de las defunciones por nitratos (NO₃) son 2010, 2014, 2015, 2017, 2019, 2020 y 2021.

En términos de autocorrelación espacial para el año 2010 la significancia en Distancia 2 (percentil 95) sugiere que en dicho año las defunciones por nitratos forman clusters significativos a distancias intermedias. Para el año 2014 la autocorrelación espacial es en distancias medianas, la significancia en Distancia 3 indica que las defunciones por nitratos tienden a agruparse en la mediana de las distancias, sugiriendo una dispersión moderada de los eventos de defunción. En el caso del año 2015 la significancia en Distancia 2 (percentil

95) y Distancia 4 (histograma) sugiere que en 2015 las defunciones por nitratos forman clusters significativos a distancias intermedias.

En el año 2017 la autocorrelación espacial se observa en distancias mínimas ya que la significancia en Distancia 1 (promedio) sugiere que las defunciones por nitratos tienden a formar clusters en distancias muy cortas. En 2019 la significancia en Distancia 2 (percentil 95) y Distancia 4 (histograma) indica que se tienden a formar clusters significativos a distancias intermedias y específicas. Finalmente para los años 2020 y 2021 la Distancia 4 (histograma) es la que presenta la mayor significancia, por lo que se asumen clusters a distancias más largas.

Lo anterior sugiere que los patrones de distribución varían en función de la distancia con tendencia general a formar clusters a distancias medias a intermedias, reflejando variaciones espaciales en la incidencia de decesos. Asimismo, se observa que las defunciones por nitratos tienden a agruparse en ciertos años, siendo 2015 y 2019 los de mayor significancia estadística.

Tabla 23. Significancia de defunciones por Nitratos (NO3) por diferente distancia entre localidades.

AÑO	<i>Distancia 1 (Promedio mínima)</i>	<i>Distancia 2 (Percentil 95)</i>	<i>Distancia 3 (Mediana)</i>	<i>Distancia 4 (Histograma)</i>
2010	0,097	0,045	0,079	0,100
2011	0,208	0,244	0,090	0,272
2012	0,293	0,358	0,373	0,063
2013	0,413	0,471	0,407	0,437
2014	0,079	0,101	0,015	0,060
2015	0,347	0,008	0,297	0,022
2016	0,232	0,273	0,062	0,460
2017	0,038	0,365	0,087	0,145
2018	0,236	0,075	0,200	0,051
2019	0,433	0,032	0,279	0,044
2020	0,125	0,116	0,375	0,021
2021	0,265	0,289	0,299	0,032
2022	0,368	0,358	0,374	0,447
<i>Tasa promedio</i>	0,467	0,039	0,331	0,094

Fuente: Elaboración propia con base en resultado de Geoda.

V. *Plomo (Pb)*

Para el análisis de significancia estadística y autocorrelación espacial de las defunciones asociadas al plomo, se obtuvieron los siguientes resultados. De los 12 años procesados, solamente 3 presentan datos relevantes: 2012 con valores de significancia en Distancia 1 (Promedio) de 0.026, Distancia 2 (Percentil 95) de 0.031 y Distancia 4 (histograma) de 0.039; para el año 2019 las Distancias 1 y 3 (Promedio y Mediana) presentaron valores menores a 0,000. Finalmente el año 2022 con significancia en la Distancia 4 (histograma) de 0,034. Los demás años no arrojaron resultados significativos.

En términos de autocorrelación espacial, los valores de significancia para el año 2012 en las distancias 1 (0,026), 2 (0.031) y 4 (0.039) sugieren que las defunciones por plomo tienden a agruparse no solo en distancias cortas e intermedias, sino también en ciertas distancias particulares a lo largo del espectro espacial. En el caso del año 2019 los datos más relevantes en las distancias 1 y 3 menores a 0,000 denotan una significancia extremadamente alta lo que indica una fuerte autocorrelación espacial en localidades muy cercanas entre sí. Por último, en 2022 la significancia en distancias amplias sugiere que, aunque puede haber una dispersión general, existen ciertos puntos o áreas donde las defunciones por plomo tienden a agruparse más notablemente.

De los resultados obtenidos se deduce que la significancia en diferentes tipos de distancias refleja variaciones espaciales en la incidencia de defunciones relacionadas con el plomo. Esto quiere decir, por un lado, que las defunciones por plomo no se distribuyen de manera aleatoria en el espacio geográfico, por el otro lado, que existe una tendencia a la formación de clusters a diferentes niveles de proximidad.

Tabla 24. Significancia de defunciones por Plomo (Pb) por diferente distancia entre localidades.

AÑO	<i>Distancia 1 (Promedio mínima)</i>	<i>Distancia 2 (Percentil 95)</i>	<i>Distancia 3 (Mediana)</i>	<i>Distancia 4 (Histograma)</i>
2010	0,241	0,109	0,276	0,166
2011	0,164	0,402	0,412	0,419
2012	0,026	0,031	0,376	0,039
2013	0,376	0,110	0,402	0,141
2014	0,453	0,275	0,083	0,320
2015	0,386	0,495	0,173	0,477
2016	0,257	0,473	0,124	0,383
2017	0,057	0,489	0,284	0,431
2018	0,346	0,475	0,422	0,404
2019	0,000	0,312	0,000	0,235
2020	0,137	0,420	0,123	0,411
2021	0,267	0,415	0,340	0,351
2022	0,310	0,239	0,328	0,034
<i>Tasa promedio</i>	0,008	0,017	0,021	0,009

Fuente: Elaboración propia con base en resultado de Geoda.

Localidad a localidad: I de Morán

Como resultado del análisis del índice de Morán y LISA (Figura 35), se identificaron patrones espaciales distintivos en diferentes regiones del área de estudio. En la región norte, se detectó una localidad en el municipio de Chilcuautla con un nivel de recurrencia media, rodeada por localidades de baja frecuencia. Es relevante destacar que en este mismo municipio se encuentra un aprovechamiento que supera los límites permisibles de concentración de arsénico, lo que podría implicar un riesgo adicional para la salud de la población. En la porción central del área de estudio, no se identificaron localidades con altos niveles de recurrencia. En contraste, en los sectores sur, este y oeste, se observó un patrón similar, con tres localidades en la parte occidental del municipio de Jilotepec que presentaron un nivel medio de recurrencia. El resto de la zona de estudio se caracterizó por polígonos de baja recurrencia, lo que sugiere una menor frecuencia de eventos de interés en estas áreas.

En el análisis del índice de Morán aplicado a los egresos hospitalarios y defunciones asociadas con la presencia de coliformes (Figura 36), se identificó un patrón general de baja

recurrencia en toda la región bajo estudio. Este comportamiento se observó de manera consistente en todos los sectores que conforman la zona de análisis, lo que sugiere que la incidencia de problemas de salud relacionados con coliformes es relativamente baja y dispersa en el área evaluada. Esta tendencia podría indicar una distribución homogénea de los casos o una baja exposición general a los coliformes en las distintas localidades de la región.

En cuanto a la recurrencia de eventos asociados al flúor (Figura 37), se observó un patrón geográfico distintivo en la región de estudio. En la zona oeste, específicamente en el municipio de Jilotepec, se identificaron localidades con recurrencias de nivel alto (superiores a 4) y de nivel medio, lo que indica una mayor concentración de estos eventos en esa área. Por otro lado, en la parte sur de la región, solo el municipio de Tepeji del Río de Ocampo mostró una localidad con un nivel medio de recurrencia en los eventos relacionados con el flúor. Esta distribución sugiere que los eventos de exposición al flúor son más frecuentes en ciertas áreas, mientras que otras presentan una incidencia más baja o nula.

El análisis del Índice de Morán aplicado a los egresos y defunciones relacionadas con la exposición a nitratos (Figura 38) no reveló ningún patrón de recurrencia media o alta en los distintos sectores de la zona de estudio. Este resultado indica que los eventos de salud vinculados a los nitratos son escasos y no presentan una concentración significativa en ninguna parte del área evaluada. La ausencia de un patrón claro sugiere una dispersión de los casos o una baja incidencia general de problemas de salud atribuibles a los nitratos en la región.

Finalmente, en el análisis de la distribución de recurrencia de eventos de egresos hospitalarios y defunciones asociados a la presencia de plomo (Figura 39) en el agua, utilizando el Índice de Morán, se determinó que ninguna localidad dentro de la zona de estudio presentó valores altos de recurrencia. Este hallazgo sugiere que la incidencia de problemas de salud relacionados con el plomo es baja y dispersa en toda la región, sin concentraciones significativas de casos en ninguna área específica.

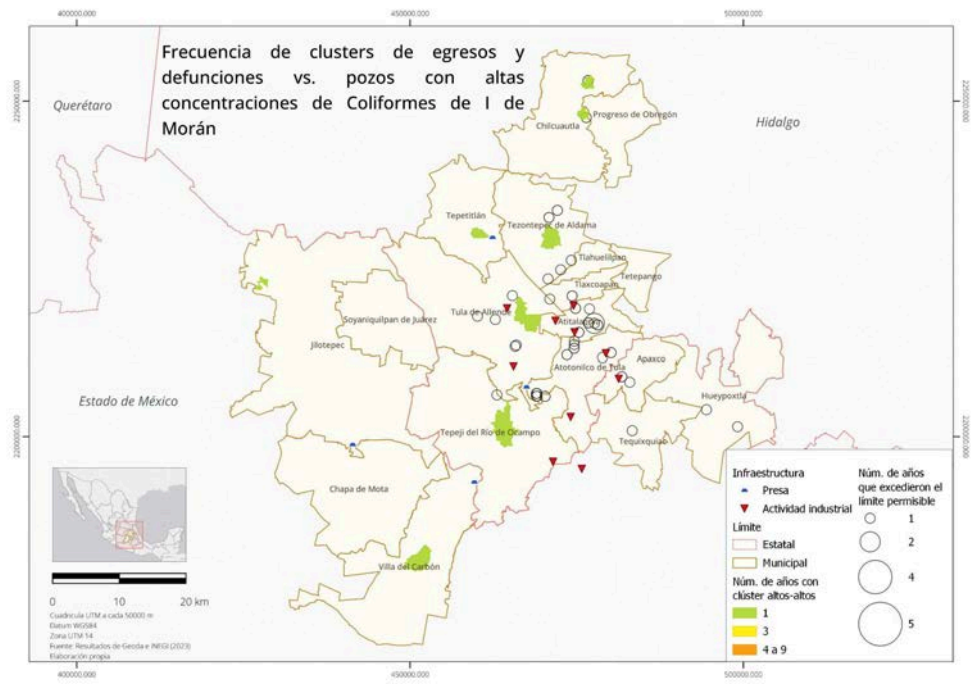


Figura 36. Frecuencia de egresos y defunciones vs aprovechamientos con altas concentraciones de Coliformes.
Fuente: Elaboración propia con base en información de DB, INEGI, 2023.

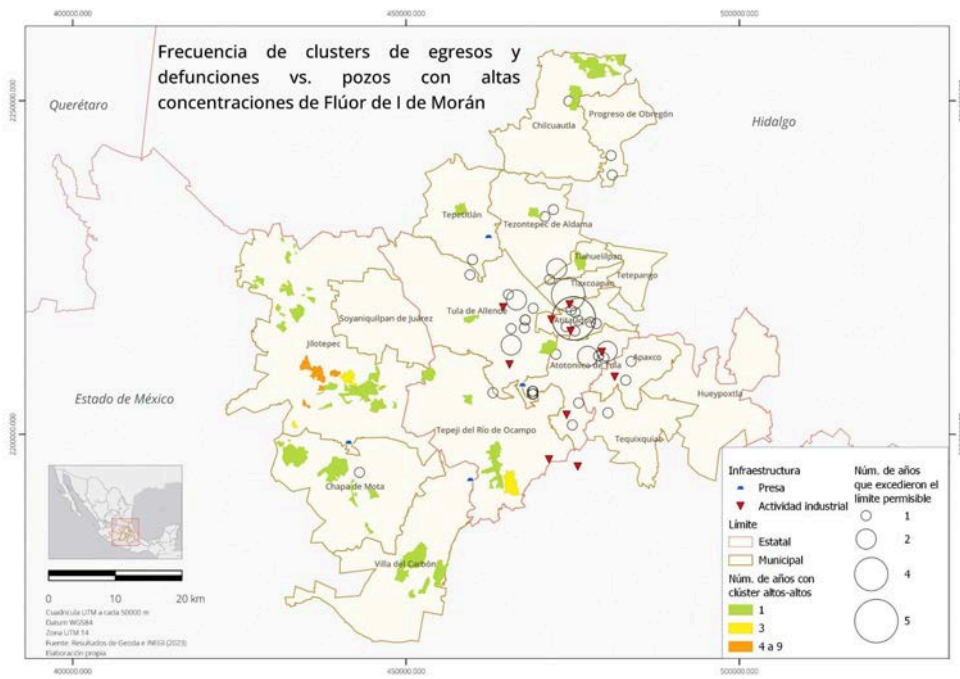


Figura 37. Frecuencia de egresos y defunciones vs aprovechamientos con altas concentraciones de Flúor.
Fuente: Elaboración propia con base en información de DB, INEGI, 2023.

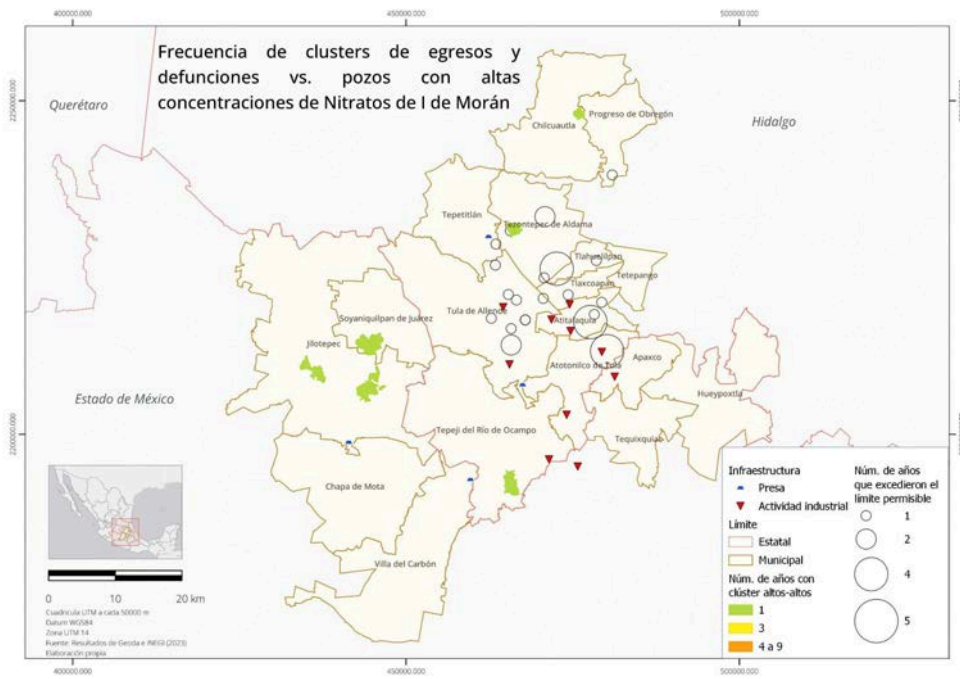


Figura 38. Frecuencia de egresos y defunciones vs aprovechamientos con altas concentraciones de Nitratos.
Fuente: Elaboración propia con base en información de DB, INEGI, 2023.

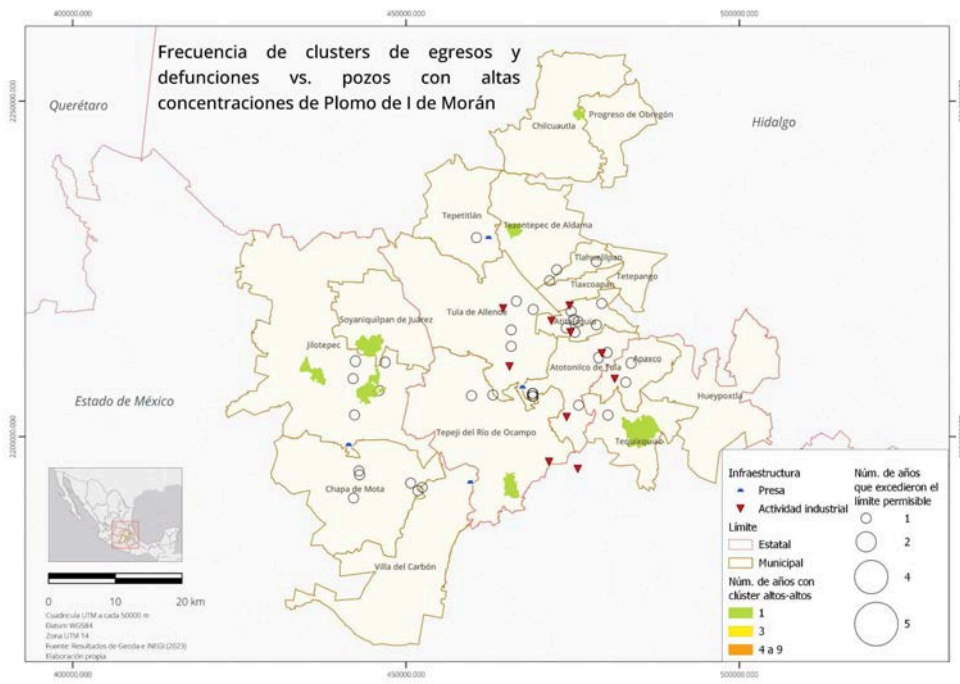


Figura 39. Frecuencia de egresos y defunciones vs aprovechamientos con altas concentraciones de Plomo.
Fuente: Elaboración propia con base en información de DB, INEGI, 2023.

Localidad a localidad: G* de Getis Ord

En el caso del Arsénico en el sector norte, se identifican polígonos que representan bajas recurrencias en casos de egresos y defunciones asociadas con arsénico (Figura 40). Sin embargo, se destaca un polígono con mayor frecuencia, ubicado en la localidad de Chilcuautla, en el límite con Progreso de Obregón, que coincide con un aprovechamiento que excedió por dos años los límites permisibles de concentración del contaminante. Además, esta zona se encuentra en el distrito de riego Alfajayucan, que drena aguas del Valle de México, considerado de alto riesgo debido al nivel de contaminación.

En el centro del Valle de México (VM), se observa una variación en las tonalidades de los polígonos de frecuencia, lo que indica un rango de recurrencia de egresos hospitalarios y defunciones, que va desde el nivel más bajo hasta el más alto, con 2 y 10 clusters respectivamente. Estos se ubican en los municipios de Tlaxcoapan, Atotonilco de Tula, Tezontepec de Aldama, Tepetitlán y Tula de Allende. Cabe señalar que en esta zona se encuentra parte del corredor industrial Tula-Tepeji del Río, así como el distrito de riego de Tula.

En la zona sur, se observan tres polígonos con alta recurrencia en el municipio de Tepeji del Río, el cual se encuentra cercano a la Zona Industrial. Finalmente, en los sectores este y oeste, se identificó un único polígono de alta recurrencia en los municipios de Jilotepec y Hueypoxtla, respectivamente.

Para coliformes (Figura 41) en la zona norte se identificaron tres localidades del municipio de Chilcuautla y una de Progreso de Obregón con altas recurrencias, rodeadas de localidades con muy baja frecuencia de egresos hospitalarios y defunciones. Todas ellas se encuentran en el distrito de riego de Alfajayucan.

En la parte central del Valle de México (VM), se ubicaron tres localidades del municipio de Tula de Allende y una del municipio de Tepetitlán, con una recurrencia de 3 clusters a lo largo del periodo de estudio.

En la región sur, en el municipio de Villa del Carbón, se encuentra una localidad con alta recurrencia y tres con un nivel medio, sin observarse la presencia de aprovechamientos que rebasen los límites permisibles.

En el sector este, se encontraron tres localidades entre los municipios de Tequixquiac y Hueypoxtla, que presentaron niveles altos de recurrencia en egresos hospitalarios y defunciones. Es importante señalar que en la zona aledaña a dichas localidades se encuentran al menos tres pozos que rebasaron los límites permisibles.

Finalmente, en la porción oeste, solo se identificaron dos localidades con alta recurrencia en el municipio de Jilotepec, rodeadas de poblaciones con bajos niveles de recurrencia.

Para fluor (Figura 42), en la parte norte de la zona de estudio se observan seis localidades con altos niveles de recurrencia, seguidas de cinco con niveles medios y dos con niveles bajos, todas pertenecientes al municipio de Chilcuautla. En esa misma área, se identificaron una localidad con alta recurrencia y otra con baja recurrencia en el municipio de Progreso de Obregón. Es importante señalar que en estos dos municipios también se encontraron tres aprovechamientos que exceden los límites permisibles.

En cuanto a la zona centro, solo los municipios de Tepetitlán y Tula de Allende presentan localidades con niveles medios y altos de recurrencia. En este último municipio, no existe coincidencia en la ubicación de un aprovechamiento con una localidad de recurrencia media. En el resto de la zona, se observan localidades con baja recurrencia.

En la porción sur, hay dos localidades de alta recurrencia y una de media recurrencia en el municipio de Tepeji del Río de Ocampo, mientras que en Villa del Carbón sólo se encontraron localidades de baja recurrencia. En la parte este, se identificaron dos localidades de alta recurrencia.

Por último, en la parte oeste, el municipio de Jilotepec presenta un alto número de demarcaciones con altos niveles de recurrencia, superando las 15 localidades, seguido de 11 localidades con bajos niveles de recurrencia. Por otro lado, el municipio de Chapa de Mota tiene tres localidades con alta recurrencia y tres con media, mientras que el municipio de Soyaniquilpan de Juárez solo presentó dos localidades con alto nivel de recurrencia.

Para el caso de los nitratos (Figura 43), sólo se identificó una localidad en la zona norte con un alto nivel de recurrencia, la cual no coincide con la presencia de un aprovechamiento que excede el límite permisible. En la zona centro se encontraron tres localidades con alta recurrencia en Tepetitlán, Tezontepec de Aldama y Tula de Allende, respectivamente. En cuanto a las localidades con niveles de mediana recurrencia, se ubicaron dos localidades, una en Tezontepec de Aldama. En la zona sur, solo se identificó una localidad con alta

recurrencia en el municipio de Tepeji del Río de Ocampo. De manera similar, en la porción este solo se encontró la localidad de Hueypoxtla con un alto nivel de recurrencia. Por último, en el sector oeste se identificaron dos localidades en Jilotepec y una en Chapa de Mota, todas con alta recurrencia, mientras que en Soyaniquilpan de Juárez y Jilotepec se encontraron dos localidades con mediana recurrencia.

En el análisis de la frecuencia de eventos de defunciones y egresos relacionados con la exposición al plomo (Figura 44), se observó que, de los cinco sectores en los que se divide la zona de estudio, solo en las porciones este y sur se identificaron localidades con alta recurrencia. Específicamente, estas localidades se encuentran en los municipios de Hueypoxtla, en el sector este, y Villa del Carbón, en el sector sur. Por otro lado, las localidades con mediana recurrencia se distribuyeron en diferentes sectores: en la zona norte se ubicó en el municipio de Progreso de Obregón; en el oeste, se identificaron en los municipios de Jilotepec y Chapa de Mota; y en el sur, nuevamente en Villa del Carbón. Estos hallazgos resaltan que la recurrencia de eventos relacionados con el plomo varía significativamente entre los diferentes sectores, con solo algunas localidades mostrando altos niveles de afectación.

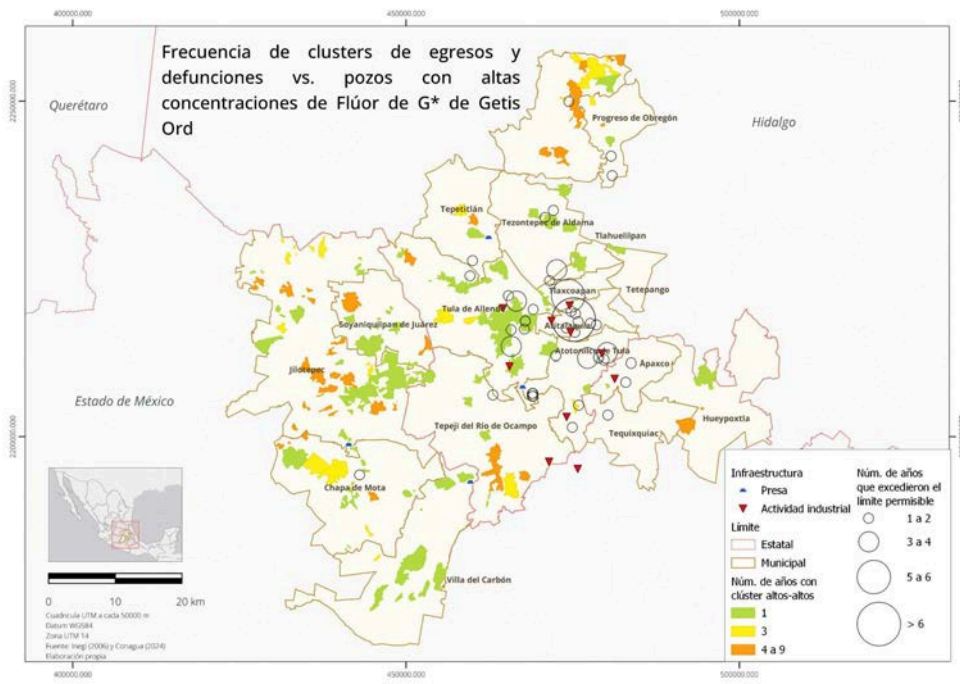


Figura 42. Frecuencia de egresos y defunciones vs aprovechamientos con altas concentraciones de Fluor.

Fuente: Elaboración propia con base en información de DB, INEGI, 2023.

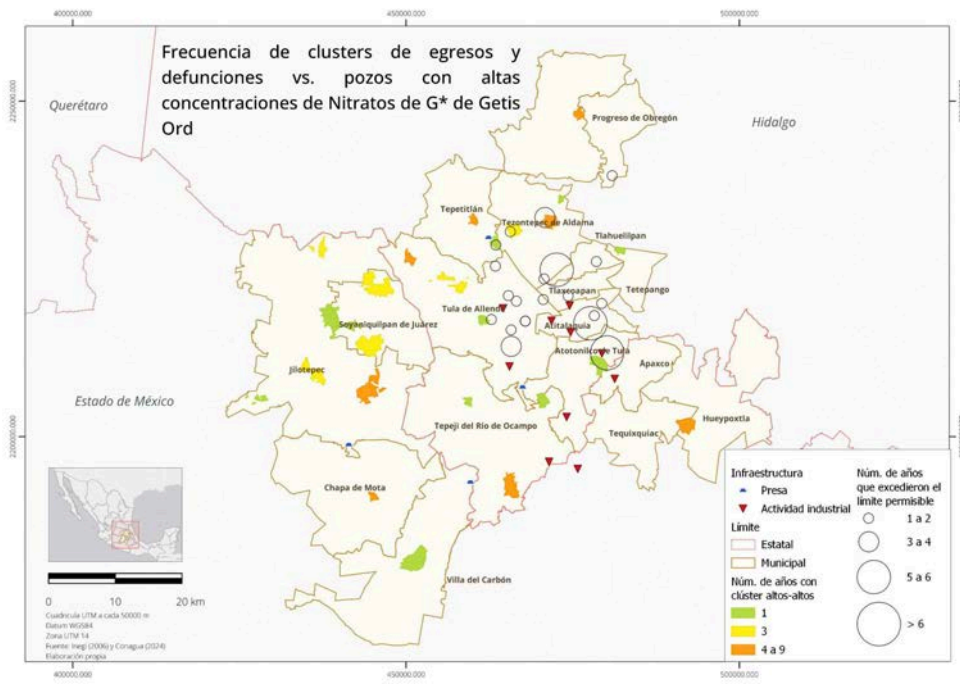


Figura 43. Frecuencia de egresos y defunciones vs aprovechamientos con altas concentraciones de Nitratos.
Fuente: Elaboración propia con base en información de DB, INEGI, 2023.

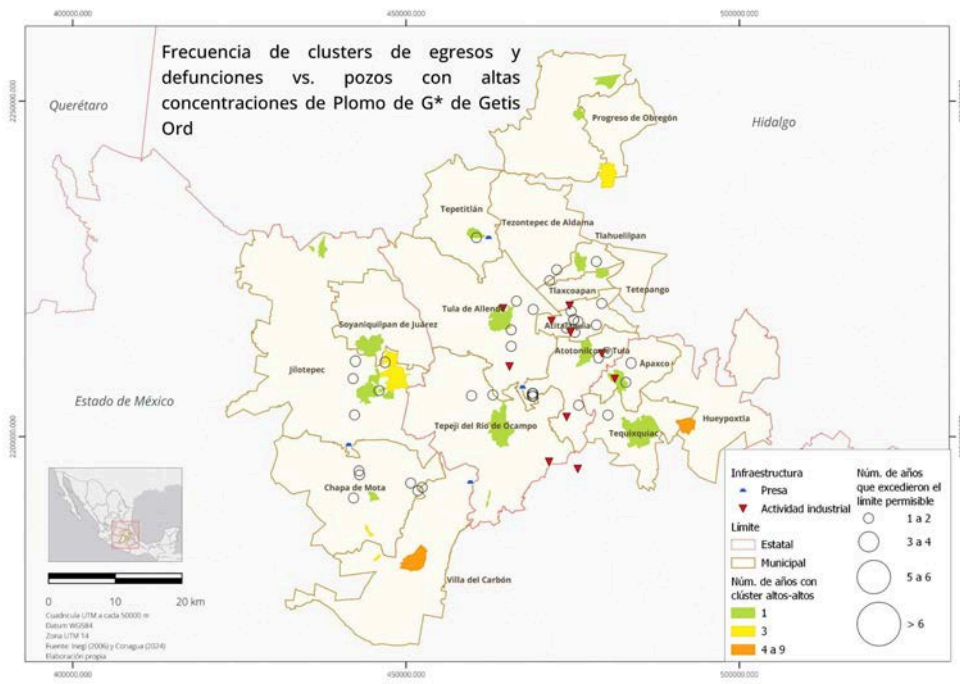


Figura 44. Frecuencia de egresos y defunciones vs aprovechamientos con altas concentraciones de Plomo.
Fuente: Elaboración propia con base en información de DB, INEGI, 2023.

5. Conclusiones

El suministro de agua potable en el Valle del Mezquital, Hidalgo, enfrenta serios desafíos debido a la contaminación de sus aprovechamientos, particularmente por el uso prolongado. La contaminación, exacerbada por actividades industriales, descargas de aguas residuales provenientes de la Zona Metropolitana del Valle de México y condiciones hidrotermales, afecta no solo la calidad del agua utilizada para la agricultura, sino también la empleada para consumo doméstico. Los estudios han revelado que el consumo y uso de esta agua contaminada está vinculado a la aparición de diversas enfermedades, como infecciones gastrointestinales, problemas cutáneos e incluso cánceres asociados a la presencia de metales pesados.

Ante este escenario, se ha llevado a cabo un análisis detallado de la calidad del agua en la región, utilizando métodos de análisis espacial. Los resultados han mostrado concentraciones de contaminantes que superan los límites establecidos por la normativa mexicana y la OMS, lo que subraya la necesidad de dirigir la atención a las problemáticas de saneamiento ambiental y gestión de recursos hídricos. Este estudio busca apoyar el diseño de políticas públicas y el empoderamiento social de las comunidades sobre la gestión del agua para que se adopten medidas que garanticen un acceso seguro a agua potable.

Entre los años 2007 y 2023, se analizaron 157 aprovechamientos de agua, evaluando 40 parámetros relacionados con las características del agua y la concentración de elementos químicos. Para que un elemento se considere contaminante, debe superar los Límites Máximos de Concentración Permitidos (LMCP). Según la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA, 1988), un contaminante se define como "toda materia o energía en cualquiera de sus estados físicos y formas, que al incorporarse o actuar en la atmósfera, agua, suelo, flora, fauna o cualquier elemento natural, altere o modifique su composición y condición natural." Los elementos analizados en el estudio considerados como contaminantes relevantes por su afectación en la salud de la población fueron: Arsénico (As), Coliformes (Coli), Flúor (F), Nitratos (NO₃) y Plomo (Pb).

Los resultados de los análisis muestran que 74 aprovechamientos superan el Límite Máximo Permitido (LMP) de arsénico y se ubican en los municipios de Tula de Allende, Atotonilco de Tula, Tezontepec de Aldama, Apaxco, Atitalaquia, Progreso de Obregón, Chilcuautla, y Tlaxcoapan. En cuanto a coliformes fecales, 31 aprovechamientos presentan valores

superiores al LMP, distribuidos en los municipios de Tula de Allende, Atotonilco de Tula, Atitalaquia, Tezontepec de Aldama, Apaxco, Tlaxcoapan, y Chilcuautla. Para coliformes totales, se identificaron 41 aprovechamientos con excedencias en los municipios de Atotonilco de Tula, Tezontepec de Aldama, Chilcuautla, Tlaxcoapan, Atitalaquia, Apaxco, Tequixquiac, Hueypoxtla, Tula de Allende, y Tepeji del Río de Ocampo.

En cuanto al flúor, 75 aprovechamientos presentan niveles superiores al LMP, ubicados en los municipios de Tezontepec de Aldama, Atitalaquia, Atotonilco de Tula, Tula de Allende, Tlaxcoapan, Tepetitlán, Chilcuautla, Progreso de Obregón, y Chiapa de Mota. Para nitratos, 48 aprovechamientos exceden los límites permitidos, en los municipios de Tula de Allende, Tezontepec de Aldama, Atitalaquia, Tepetitlán, Atotonilco de Tula, Tlahuelilpan, y Progreso de Obregón. Finalmente, se registraron 41 aprovechamientos con niveles de plomo por encima del LMP en los municipios de Tula de Allende, Tepetitlán, Tezontepec de Aldama, Atotonilco de Tula, Chapa de Mota, Atitalaquia, Apaxco de Ocampo, Tlahuelilpan, Tepeji del Río de Ocampo, y Jilotepec.

Se analizaron las bases de datos de egresos hospitalarios y defunciones de 2010 a 2022 y se hicieron análisis de correlación con el software Geoda. Los análisis de correlación mostraron que existe una correlación espacial usando I de Moran en las localidades de tal y tal. El análisis combinado de los índices de Morán y G de Getis-Ord revela patrones complejos en la distribución espacial de egresos hospitalarios y defunciones asociadas a contaminantes como arsénico, coliformes, flúor, nitratos y plomo en el Valle del Mezquital.

Arsénico: Los resultados del Índice de Morán muestran que la recurrencia de eventos asociados con arsénico es baja en la mayoría de las regiones, exceptuando el municipio de Chilcuautla, donde se identificó una localidad con nivel medio de recurrencia. Este patrón se correlaciona con la presencia de un aprovechamiento de agua que supera los límites permisibles de arsénico. El análisis de G de Getis-Ord refuerza esta observación al destacar que la zona norte presenta localidades de baja recurrencia, con un área específica en Chilcuautla que muestra una alta recurrencia, especialmente en las proximidades del distrito de riego Alfajayucan, conocido por su alta contaminación.

Coliformes: El Índice de Morán indica una baja recurrencia general en toda la región, sugiriendo una distribución dispersa y una exposición relativamente baja. El análisis de G de Getis-Ord confirma esta tendencia al mostrar una baja concentración de eventos

relacionados con coliformes en la mayoría de los sectores, sin identificarse patrones de alta recurrencia significativos en ningún área.

Flúor: Mientras que el Índice de Morán señala una alta recurrencia en la zona oeste, particularmente en Jilotepec, el análisis de G de Getis-Ord también resalta la presencia de alta recurrencia en esta área, con una menor frecuencia en el sur y los sectores este y oeste. Esto sugiere que la exposición al flúor es más prevalente en Jilotepec y menor en otras áreas, aunque se observan algunas localidades con recurrencia media en el sur.

Nitratos: Según el Índice de Morán, la recurrencia de eventos asociados con nitratos es baja en general. Este hallazgo es consistente con el análisis de G de Getis-Ord, que identifica pocas localidades con alta recurrencia, localizadas en la zona norte y sur, sin una correlación directa con los límites permisibles de contaminación.

Plomo: El Índice de Morán muestra una dispersión en la recurrencia de eventos relacionados con plomo, con algunos sectores, como el este y sur, presentando alta recurrencia. El análisis de G de Getis-Ord también destaca localidades con alta recurrencia en estos sectores, y mediana recurrencia en diversas áreas. Este patrón refleja una distribución desigual de los problemas de salud relacionados con el plomo, concentrándose en áreas específicas como Hueyoxtla y Villa del Carbón, mientras que otras regiones muestran menos afectación.

En conclusión, la combinación de los análisis del Índice de Morán y el índice de G de Getis-Ord proporciona una visión detallada de cómo los contaminantes afectan la salud en el Valle del Mezquital. La alta recurrencia en algunas localidades específicas, como Chilcuautla para el arsénico y Jilotepec para el flúor, indica zonas críticas que requieren atención prioritaria. Las variaciones en la recurrencia y la dispersión observadas sugieren la necesidad de enfoques diferenciados en la gestión de la calidad del agua y la salud pública en diferentes regiones del estudio.

6. Recomendaciones

Para abordar de manera integral la problemática de la contaminación en la región, es fundamental realizar muestreos constantes en tiempo y espacio, con especial atención a las zonas oeste y norte, donde se han identificado mayores concentraciones de clusters de egresos hospitalarios y defunciones por contaminantes. Estos muestreos deben extenderse a diversas fuentes de agua, incluyendo presas, canales de riego y corrientes superficiales, con el objetivo de obtener una visión más completa y precisa del estado del agua en toda la zona.

Además, es crucial implementar un programa de registro y seguimiento médico constante para los habitantes, particularmente en las localidades con altas tasas de egresos hospitalarios y defunciones. Esto permitirá establecer una relación directa entre las enfermedades presentes en la población y la contaminación del agua que consumen.

Paralelamente, es necesario identificar otras variables que puedan influir en la incidencia de enfermedades, tales como la calidad de vida, costumbres, actividades económicas, acceso a agua potable y calidad del aire. Estos factores deben considerarse en conjunto con estudios detallados que identifiquen las fuentes de contaminación en áreas críticas, evaluando aspectos hidrogeoquímicos y posibles fuentes como industrias, filtraciones de aguas residuales y actividades hidrotermales.

Este enfoque multidimensional no solo permitirá una mejor comprensión de la situación, sino que también facilitará la implementación de medidas de mitigación más efectivas para proteger la salud de los habitantes y mejorar la calidad de vida en la región.

7. Referencias

- Anselin, L. (1995). Local indicators of spatial association—LISA. *Geographical Analysis*, 27(2), 93-115.
- Anselin, L. (2000). Geoda: Spatial regression. Recuperado el 5 de mayo de 2024 de <https://geodacenter.github.io/download.html>
- Anselin, L. (2003). Spatial econometrics. En *A companion to theoretical econometrics* (pp. 310–330). Wiley.
- Anselin, L., Syabri, I., & Kho, Y. (2006). Geoda: An introduction to spatial data analysis. *Geographical Analysis*, 38(1), 5-22.
- Anselin, L. (2010). GeoDa Center for Geospatial Analysis and Computation. GeoDa. Recuperado el 21 de julio de 2024 de https://geodacenter.github.io/workbook/4a_contig_weights/lab4a.html
- Avelar-Roblero, J. U., Ortega-Escobar, H. M., Mancilla-Villa, O. R., Khalil-Gardezi, A., Isabel Mendoza-Saldivar, I., Sánchez-Bernal, E. I., & Álvaro Can-Chulim, A. (2023). Variación de la calidad del agua en el cauce principal de la cuenca del río Pánuco. *Terra Latinoamericana*, 41(0), 1–14.
- Bakhtiyari, S., Karimi, A., & Naddafi, K. (2018). Association of exposure to wastewater with agricultural field and farmers' health: A review. *Environmental Health Perspectives*, 10(1), 1-8.
- Cáceres Torres, A. S. (2020). Análisis geoestadístico de los parámetros físico-químicos de los pozos profundos ubicados en el área urbana del municipio de Tunja para los años 2015-2019. Recuperado el 16 de marzo de 2024 de <https://repositorio.uniandes.edu.co/entities/publication/6ef56565-3d87-4f4c-aa3c-86f7e0690387>
- Carabaña, N. C. (2023, febrero 14). Los olvidados de Hidalgo. *N+*. <https://investigaciones.nmas.com.mx/los-olvidados-de-hidalgo/>
- Cárdenas Calvachi, G. L., & Sánchez Ortiz, I. A. (2013). Nitrógeno en aguas residuales:

orígenes, efectos y mecanismos de remoción para preservar el ambiente y la salud pública. *Universidad y Salud*, 15(1), 72-88.

Carrillo, E. M., & Lozano, A. M. (2008). Validación del método de detección de coliformes totales y fecales en agua potable utilizando Agar Chromocult [Trabajo de grado, Pontificia Universidad Javeriana]. Facultad de Ciencias, Microbiología Industrial.

Celemín, J. P. (2009). Autocorrelación espacial e indicadores locales de asociación espacial: Importancia, estructura y aplicación. *Revista Universitaria de Geografía*, 18(1), 11-31. Recuperado en 01 de agosto de 2024, de http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1852-42652009000100002&lng=es&tlng=es

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2004). Estudio técnico del impacto por la explotación del agua subterránea de los acuíferos: Valle del Guadiana, Estado de Durango; Actopan-Santiago de Anaya y Valle del Mezquital, Estado de Hidalgo. Elaborado por Ariel Consultores, S.A. de C.V.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2022). Distritos de riego. Sistema de Información Nacional del Agua. <https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/SINA/?opcion=distritosr>

Comisión Nacional del Agua. (2012). Estudios técnicos de geohidrología, calidad del agua, tenencia de la tierra y aspectos sociales en la zona de captación para el “Sistema Mezquital para el abastecimiento de agua en bloque al Valle de México e Hidalgo”. Elaborado por Lesser y Asociados S.A. de C. V.

Comisión Nacional del Agua. (2024). Principales Presa de México. Recuperado el 16 de julio de 2024 de <https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/SINA/>

Crespo-Lambert, M., Moraima Fernández-Rodríguez, M., & Pérez-García, L. A. (2022). Evaluación de la calidad del agua para consumo humano según ICA de Montoya en el poblado de Yamanigüey. *Minería y Geología*, 38(2), 157–167.

Escamilla, Y. M., Corona, F. Y. P., & Santillán, I. Á. (2020). Identificación de posibles prospectos geotérmicos utilizando álgebra de mapas en la porción central del Estado de Hidalgo, México. *Tópicos de Investigación en Ciencias de la Tierra y Materiales*, 7(7), 85-92.

El Sol de Hidalgo. (2022, 13 de diciembre). En región de Tula, presas Requena y Endhó al

máximo. *El Sol de Hidalgo*. Recuperado el 21 de julio de 2024 de <https://www.elsoldehidalgo.com.mx/local/regional/en-region-de-tula-presas-requena-y-endhoal-maximo-7246546.html>

EPA. (2020). Health impacts of water pollution. *Environmental Protection Agency*. Recuperado el 17 de marzo de 2024 de <https://www.epa.gov/sites/production/files/2019-10/documents/health-impacts-water-pollution.pdf>

García-Salazar, E. M. (2019). El agua residual como generadora del espacio de la actividad agrícola en el Valle del Mezquital, Hidalgo, México. *Estudios Sociales: Revista de Alimentación Contemporánea y Desarrollo Regional*, 29(54), 1–35.

Getis, A., y Ord, J. K. (1992). The analysis of spatial association by use of distance statistics. *Geographical Analysis*, 24(3), 189-206.

Gorell, J. M., Johnson, C. C., & Rybicki, B. A. (1999). Occupational exposure to manganese, copper, lead, iron, mercury and zinc and the risk of Parkinson's disease. *Neurotoxicology*, 20(2–3), 239.

Gobierno del Estado de Hidalgo. (2016-2022). *Plan Estatal de Desarrollo Hidalgo*. Recuperado el 19 de marzo de 2024 de <http://planestataldedesarrollo.hidalgo.gob.mx/>

Hernández, A., et al. (2017). Contaminación microbiológica en agua para consumo humano en comunidades rurales del estado de Hidalgo, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 33(3), 417-426.

Hui Zhu, Lili Zhu, Baixing Yan, & Jiunian Guan. (2014). Accumulation of lead, zinc, and copper in scalp hair of residents in a long-term irrigation area downstream of the Second Songhua River, Northeast China. *Human and Ecological Risk Assessment*, 20(1), 137–149.

Hurtado-Jiménez, R., & Gardea-Torresdey, J. (2005). Estimation of exposure to fluoride in "Los Altos de Jalisco", México.

INECC. (2015). Reporte de calidad del agua en México. *Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático*. Recuperado el 12 de marzo de 2024 de <http://www.inecc.gob.mx/descargas/publicaciones/375.pdf>

INEGI. (2010). Censo de Población y Vivienda 2010. Panorama sociodemográfico de México, México. *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. Recuperado el 26 de marzo de 2024 <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2010/>

INEGI. (2020). Censo de Población y Vivienda 2020. Panorama sociodemográfico de México, México. *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. Recuperado el 26 de marzo de 2024 <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/>

INEGI. (2015). Encuesta Intercensal 2015. *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. Recuperado el 26 de marzo de 2024 de <https://www.inegi.org.mx/programas/intercensal/2015/#tabulados>

INEGI. (s.f.) Mapas. Recuperado el 04 de marzo de 2024 de <https://www.inegi.org.mx/app/mapas/default.html?t=193&ag=20>

INEGI. (2013). Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM). Recuperado el 04 de marzo de 2024 de <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>

INEGI. (2016). Relieve continental. Recuperado el 04 de marzo de 2024 de <https://www.inegi.org.mx/temas/relieve/continental/#mapas>

INEGI. (2006). Red Hidrográfica Digital de México. Escala 1:250 000. Edición 1.0. Recuperado el 16 de julio de 2024 de <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463598428>

INEGI. (2023). Marco Geoestadístico. Recuperado el 1 de agosto de 2024 de <https://www.inegi.org.mx/temas/mg/#descargas>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2024). Encuesta Demográfica Retrospectiva (EDR). Recuperado el 06 de marzo de 2024, de <https://www.inegi.org.mx/programas/edr/>

INSP (Instituto Nacional de Salud Pública). (2020). Impacto de la contaminación del agua en la salud pública en México. *Instituto Nacional de Salud Pública*. Recuperado el 1 de marzo de 2024 de <https://www.insp.mx/>

IARC (International Agency for Research on Cancer). (2004). monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans: *Some drinking-water disinfectants and contaminants*,

including arsenic (Vol. 84). Lyon, France: World Health Organization. Recuperado el 12 de marzo de 2024.

Lara Figueroa, H. N., & García Salazar, E. M. (2019). Prevalencia de enfermedades asociadas al uso de agua contaminada en el Valle del Mezquital. *Entreciencias: Diálogos En La Sociedad Del Conocimiento*, 7(21), 91–106.

Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. (1988). Disposiciones generales (Artículo 3). Ciudad de México, México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

López, M., et al. (2019). Impacto de la contaminación ambiental en la salud de la población en la región de Tula, Hidalgo. *Revista de Salud Pública*, 21(4), 492-499.

Manual MSD. (2022). *Envenenamiento con plomo*. Manual MSD. Recuperado el 5 de agosto de 2024 de <https://www.msdmanuals.com/es-mx/professional/lesiones-y-envenenamientos/intoxicaci%C3%B3n/envenenamiento-con-plomo>

Martínez, E., et al. (2017). Efectos de la contaminación ambiental en la salud reproductiva de mujeres en la cuenca del río Tula. *Revista de Investigación en Salud Pública*, 9(2), 175-182.

MedlinePlus. (s. f.). Examen de urea en sangre. Recuperado el 5 de agosto de 2024 de <https://medlineplus.gov/spanish/ency/article/000296.htm>

MedlinePlus. (2023). Enteritis por E. coli. Recuperado el 5 de agosto de 2024 de <https://medlineplus.gov/spanish/ency/article/000296.htm>

Mendoza-Cano, O., Sánchez-Piña, R. A., Barrón-Quintana, J., Cuevas-Arellano, H. B., Escalante-Minakata, P., & Solano-Barajas, R. (2017). Riesgos potenciales de salud por consumo de agua con arsénico en Colima, México. *Salud Pública de México*, 59(1), 34-40.

Morales, C. E. (s.f.). La contaminación del agua subterránea. *Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnología*. Recuperado el 1 de marzo de 2024, de <https://conahcyt.mx/la-contaminacion-del-agua-subterranea/>

Mokondoko, P., Manson, R. H., & Pérez-Maqueo, O. (2016). Evaluación del servicio de regulación de la calidad del agua en la cuenca del Río La Antigua, Veracruz. Recuperado el

5 de abril de 2024 de
<https://remexcu.org/documentos/boletines/MIC-2018-04-%20Mokondoko.pdf>

Office of Research and Development, National Center for Environmental Assessment. (1987). *Toxicological review of cadmium*. Washington, D. C.

Octavio-Aguilar, P., & Olmos-Palma, D. A. (2022). Efectos sobre la salud del agua contaminada por metales pesados. *Herreriana*, 4(1), 43-47.

Olmos-Palma y Octavio-Aguilar (2022). Publicación semestral, Herreriana, Vol. 4, No. 43-47

OMS. (2023). Drinking-water. *World Health Organization*. Recuperado el 1 de marzo de 2024 de <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>

OPS. (2021). Dengue. *Pan American Health Organization*. Recuperado el 17 de marzo de 2024 de <https://www.paho.org/es/enfermedades-transmisibles-por-vectores/dengue>

Ord, J. K., & Getis, A. (1995). Local spatial autocorrelation statistics: Distributional issues and an application. *Geographical Analysis*, 27(4), 286-306.

Ortiz-Espejel, B. (2020). Hacia un modelo de restauración ecológica. *Gob.mx*. Recuperado el 26 de abril de 2024, de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/538909/22_TulaD.pdf

Othax, N., Peluso, F., & Gonzales Castelain, J. (2014). Riesgo a la salud integrado por fluoruros, nitratos y arsénico en agua subterránea: caso del partido de Tres Arroyos, Argentina. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 30(1), 27-41.

Pollack, A. Z., Sjaarda, L., Ahrens, K. A., Mumford, S. L., Browne, R. W., Wactawski-Wende, J., & Schisterman, E. F. (2014). Association of cadmium, lead and mercury with paraoxonase 1 activity in women. *PLoS ONE*, 9(3), e92152.

Quintero-Somaini, A., & Quirindongo, M. (2004). *Peligro oculto, riesgos ambientales a la salud de la comunidad latina*. New York, NY: Natural Resources Defense Council.

Rea-Padilla, D. (2020). Estrategias de planeación territorial y ambiental para procurar el equilibrio sustentable entre el desarrollo de la ciudad y sus áreas verdes en el sur poniente del AMG. *Guadalajara México*.

Secretaría de Salud. (2016). *¿Sabías qué es la amebiasis o amibiasis?* Gobierno de México. Recuperado el 18 de febrero de 2024 de <https://www.gob.mx/salud/articulos/sabias-que-es-la-amebiasis-o-amibiasis>

Secretaría de Salud. (2024). Egresos hospitalarios. Recuperado el 4 de marzo de 2024 de http://www.dgis.salud.gob.mx/contenidos/basesdedatos/da_egresoshosp_gobmx.html

Secretaría de Salud. (2021). *NORMA Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021, Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua*. Diario Oficial de la Federación. Recuperado el 4 de marzo de 2024 de https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5650705&fecha=02/05/2022#gsc.tab=0

SEMARNAT. (1997). Norma Oficial Mexicana NOM-004-CONAGUA-1996: Requisitos para la protección de acuíferos durante el mantenimiento y rehabilitación de pozos de extracción de agua y para el cierre de pozos en general. *Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diario Oficial de la Federación, 8 de agosto de 1997.*

SEMARNAT. (2018). Gestión de recursos hídricos. *Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales*. Recuperado el 8 de marzo de 2024 de <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/tema/cap6.html>

SEMARNAT. (2019). Informe de la calidad del agua en México. *Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales*. Recuperado el 1 de marzo de 2024 de <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/informe-de-la-calidad-del-agua-en-mexico>

Servicio Geológico Mexicano. (2022). GeoInfoMex. Recuperado el 4 de mayo de 2024 de <https://www.gob.mx/sgm/articulos/conoce-el-sistema-de-consulta-de-informacion-geocientifica-geoinfomex>

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH). (s.f.). Río Tula, uno de los desagües más importantes de la zona Centro de México. Recuperado el 17 de marzo de 2024 de <https://www.uaeh.edu.mx/gaceta/3/numero32/octubre/rio-tula.html>

WHO. (2011). *Guidelines for drinking-water quality* (4th ed.). Geneva: World Health Organization.

World Health Organization. (s.f.). Drinking water. Recuperado el 17 de marzo de 2024 de

<https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>