

AGUA SUBTERRÁNEA Y SALUD PÚBLICA: POBLACIONES VULNERABLES A CONTAMINACIÓN EN LA REGIÓN NORPONIENTE DEL ESTADO DE MORELOS, MÉXICO

Groundwater and public health: Vulnerability of the population in a central region of Mexico

Bertín TRUJILLO-PÉREZ¹, Elisabet V. WEHNCKE¹, Xavier LÓPEZ-MEDELLÍN^{1*},
Urinda ÁLAMO-HERNÁNDEZ², Valentina CARRASCO-CARBALLIDO¹,
Marcela OSORIO-BERISTÁIN¹ y Eric MORALES-CASIQUÉ³

¹ Centro de Investigación en Biodiversidad y Conservación, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Av. Universidad 1001, Chamilpa, 62210 Cuernavaca, Morelos, México.

² Instituto Nacional de Salud Pública, Av. Universidad 655, Santa María Ahuacatitlán, 62100 Cuernavaca, Morelos, México.

³ Departamento de Dinámica Terrestre Superficial, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito de la Investigación Científica s/n, Ciudad Universitaria, 04510 Ciudad de México, México.

*Autor para correspondencia: xlmedellin@uaem.mx

(Recibido: agosto de 2024; aceptado: enero de 2025)

Palabras clave: agua potable, sistema de flujos de agua subterránea, riesgo contaminante, basurero, minería.

RESUMEN

El agua subterránea es la principal fuente de agua potable en México, la cual es indispensable para el adecuado desarrollo biológico y socioeconómico de las personas. En la región norponiente del estado de Morelos se identificaron tres sitios con alto riesgo de contaminación del agua subterránea: el relleno sanitario Loma de Mejía, el basurero de Tetlama (actualmente clausurado) y la zona concesionada a una empresa minera (Cerro El Jumil). Para evaluar la vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea, se construyó un mapa de vulnerabilidad DRASTFU, el cual utiliza cinco variables del método tradicional DRASTIC más la ubicación de los sitios con peligro de contaminación y la dirección predominante del sistema de flujos del agua subterránea. Se identificaron áreas de vulnerabilidad extrema al sureste del basurero de Tetlama y de vulnerabilidad media y alta en regiones cercanas al relleno sanitario Loma de Mejía. Se aplicó una encuesta para evaluar las condiciones sociales y de salud de pobladores de la zona de estudio, encontrándose diferencias en las prevalencias de algunas afectaciones a la salud relacionadas con el uso y consumo de agua contaminada o no potable, lo cual resalta las diferencias en problemas gastrointestinales entre Loma de Mejía y Cerro El Jumil. Asimismo, se identificó la presencia de arsénico en concentraciones superiores al límite permisible (0.01 mg/L, estipulado en la Norma Oficial Mexicana de calidad de agua para uso y consumo humano) en el agua de cinco pozos de la zona de estudio. Se recomienda un abordaje preventivo para reducir la afectación a la salud pública y ambiental, y aplicar un adecuado ordenamiento ecológico territorial.

Key words: drinking water, groundwater flow system, pollution risk, garbage dump, mining.

ABSTRACT

In Mexico, the main source of drinking water is groundwater, which is essential for the proper biological and socioeconomic development of people. In the northwestern region of the state of Morelos, three sites with a high risk of groundwater contamination were identified: the Loma de Mejía landfill, the Tetlama dump (which is currently closed), and the area licensed to a mining company (Cerro El Jumil). To assess the vulnerability to groundwater contamination in this area, a DRASTFU vulnerability map was constructed, which uses five variables from the traditional DRASTIC method, plus the location of sites at risk of contamination and the predominant direction of the groundwater flow system. Areas of extreme contamination vulnerability were identified southeast of the Tetlama dump, and areas of medium and high vulnerability for regions near the Loma de Mejía landfill. A survey was applied to evaluate the social and health conditions of residents in the study area, revealing differences in the prevalence of various health problems related to the use and consumption of contaminated or non-potable water. This highlighted differences in gastrointestinal problems between Loma de Mejía and Cerro El Jumil. Likewise, the presence of arsenic was identified in concentrations above the permissible limit (0.01 mg/L, stipulated in the Mexican Official Standard for water quality for human use and consumption) in the water of five wells in the study area. This study on groundwater contamination vulnerability suggests a prevention-focused approach to reduce the impact on public and environmental health, as well as to implement appropriate ecological land-use planning.

INTRODUCCIÓN

El agua subterránea es vital para la subsistencia de la humanidad y un componente esencial de todos los ecosistemas. Sin embargo, su uso excesivo y su contaminación afectan negativamente tanto al ambiente como a la salud pública, sobre todo considerando que, por lo general, es la principal fuente de abastecimiento para uso y consumo humano (Downs et al. 1999, OMS 2006). En la mayoría de las ciudades de Latinoamérica, el agua subterránea es la principal fuente de abastecimiento para sus habitantes, por lo que debe asegurarse la integridad de los acuíferos para mantener la cantidad y calidad de esta. Debido a la disminución de los niveles freáticos ante la creciente demanda de agua subterránea, han aumentado los costos energéticos y económicos para mantener su abasto. También han aumentado los casos de pozos de abasto con sustancias que convierten el agua en no potable, como el arsénico, lo cual representa un riesgo a la salud pública (Bundschuh et al. 2012, UNESCO 2022).

La interacción entre el agua subterránea y la salud poblacional en México es de particular interés debido a la presencia de zonas con alta vulnerabilidad a la contaminación (Alarcón-Herrera et al. 2020). En México, la principal fuente de abastecimiento de agua que se utiliza para potabilizar es la extraída directamente de pozos (Cardona et al. 2010, Hatch-Kuri 2017). Una vez extraída, el agua es clorada para

disminuir el peligro de contaminación microbiológica, actividad que ha reducido sustancialmente el riesgo de enfermedades gastrointestinales en la población mexicana (Haro et al. 2012, Andrade et al. 2018). En el trayecto y durante su almacenamiento también existe el peligro de contaminación por diferentes sustancias (OMS 1998, GBM 2003, Li et al. 2021, Xie et al. 2023).

El análisis del peligro de contaminación del agua subterránea debe considerar la interacción entre la vulnerabilidad de un acuífero ante el tipo y cantidad de contaminantes presentes, pudiendo ser estos de origen antrópico o geológico (Huizar-Álvarez y Carrillo-Rivera 2021). Además, debido a que se encuentra en movimiento constante, es necesario no sólo hacer una evaluación local cercana a un foco contaminante, sino que se debe considerar la dirección y sentido de los flujos de agua subterránea (SFAS), así como la movilidad y las características fisicoquímicas de los contaminantes para valorar el riesgo de afectación a poblaciones vulnerables (GBM 2002).

La vulnerabilidad es el impacto potencial negativo que puede presentar un organismo, grupo o sistema (físico, biológico o social). Se trata de un fenómeno dinámico que debe ser evaluado para cada sujeto de estudio y ante una amenaza particular (delimitada de forma espacial y temporal). El grado de vulnerabilidad depende del nivel de exposición, que es la probabilidad de que el ente vulnerable coincida, espacial y temporalmente, con un peligro determinado;

de la sensibilidad, que es el grado de afectación que ocasiona dicho peligro, y de la capacidad de adaptación o atenuación, que es el grado en que estos impactos pueden ser evitados, atenuados o soportados (IPCC 2007). El riesgo de contaminación del agua subterránea depende principalmente de dos factores: *i*) las características hidrogeológicas del medio físico (subsuelo) y *ii*) la carga contaminante a la que se exponga el acuífero. Debido a su ubicación, el agua subterránea se encuentra siempre en peligro de contaminación por las actividades realizadas en superficie, entre las que destacan los diversos procesos agrícolas, industriales, mineros y de zonas urbanas. Estas actividades generan una inmensa cantidad de sustancias contaminantes que se pueden clasificar por su origen o por sus características físicas y químicas (GBM 2003).

El estudio de la vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación y el subsecuente riesgo de afectación a la salud de los pobladores que la consumen es multidimensional, por lo que se requiere conjuntar información de salud poblacional y ambiental, ubicar sitios con alto peligro de contaminación y considerar la dinámica del agua subterránea, así como conocer los hábitos de uso y consumo de la población (Howard et al. 2006, Domínguez-Cortinas et al. 2012, Palomino-Moral et al. 2014, Mendoza-Cano et al. 2017, Andrade et al. 2018), como se muestra en la **figura 1**.

En la región norponiente del estado de Morelos se han identificado actividades y sitios con alta carga contaminante antrópica (un basurero a cielo abierto y un relleno sanitario) y de tipo geológico (que coincide con una zona concesionada a una minera), los cuales representan un peligro de contaminación para el agua subterránea (Ochoa-Chi 2014, Pohle-Morales 2020, SEMARNAT 2023). Además, existe el riesgo de afectación a la salud pública debido a que las inmediaciones de estos tres sitios se encuentran habitadas.

Se realizó un estudio transversal en el que se integraron tres componentes: una evaluación hidrogeológica, una caracterización social y una de salud de los pobladores. El estudio busca delinear zonas de protección para las áreas de captación de agua subterránea y perímetros de flujo, avanzando en el conocimiento sobre el impacto en el agua subterránea de sitios en superficie con alto riesgo de contaminación. En las dimensiones social y de salud se realizó un estudio multidimensional con alcance exploratorio (Wehncke y Mariano 2021).

MATERIALES Y MÉTODOS

La zona de estudio se ubica en el estado de Morelos, México, entre los municipios de Temixco, Miaatlán y Xochitepec dentro de la cuenca del Río Amacuzac, en los límites de los acuíferos

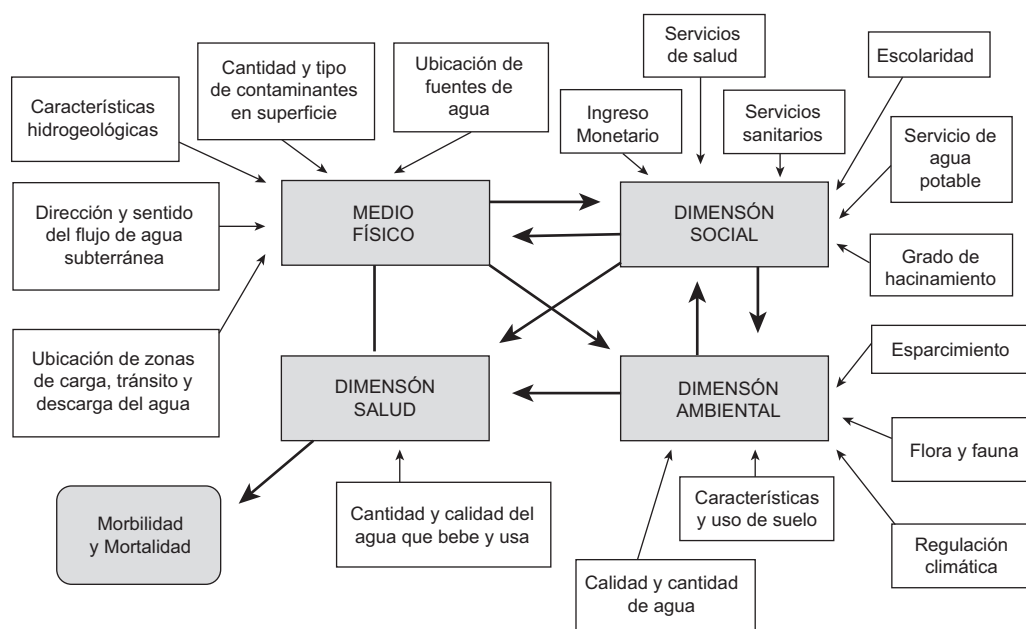


Fig. 1. Relaciones multidimensionales en la vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación y el subsecuente riesgo de afectación a la salud de pobladores que al usan y beben. Modificado de Domínguez-Cortinas et al. (2012).

administrativos de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) “Cuernavaca” y “Zacatepec” (**Fig. 2**). En ambos existe un nivel freático con profundidad variable de 5 a 100 m con formaciones geológicas heterogéneas y anisótropas, tanto en el sentido vertical como horizontal (CONAGUA 2020a, b). Es un área rectangular de 214 km² delimitada por las latitudes 18.9109° N y 18.7487° S, y las longitudes -99.2209° E y -99.3340° O.

La aplicación de las encuestas para obtener información sociodemográfica y de salud de los pobladores se limitó a una distancia no mayor de 4 km de tres sitios identificados con alto peligro de contaminación. Por la dinámica del agua subterránea, se considera a los hogares de estas zonas próximas los de mayor vulnerabilidad. Los sitios identificados con alto peligro de contaminación para el agua subterránea en la zona de estudio fueron:

- Relleno sanitario Loma de Mejía (LM; UTM -99.2751°, 18.8998°). Relleno sanitario que inició funcionamiento en 2008, a donde actualmente se destinan los residuos sólidos urbanos del municipio de Cuernavaca y área conurbada. Se localiza en la región geológica Glacis Buenavista (zona de

alta recarga de agua subterránea para el acuífero Cuernavaca). Región de interfluvios caracterizada por una capa superficial de suelo arenoso de alta permeabilidad. Pobladores que habitan cerca del relleno LM se opusieron a que este se instalara e iniciara operaciones por considerarlo inadecuado para el transporte y confinamiento de la basura (Morales-Cruz 2023), además de que representa un riesgo alto de contaminación ambiental (SEMARNAT 2004, Pohle-Morales 2020). Este relleno sanitario se encontraba en operaciones al momento de realizar esta investigación. La población con mayor riesgo de afectación dentro del área circular con un radio de 4 km con centro en LM es de 1323 personas en 385 viviendas habitadas (INEGI 2023).

- Cerro EL Jumil (CJ; UTM -99.2737°, 18.7944°). Se localiza a 17 km de la ciudad de Cuernavaca, Morelos. El inicio de actividades de esta mina se ha detenido debido a la falta de autorización de su manifiesto de impacto ambiental por el volumen de agua requerido para su funcionamiento, y por disconformidades y protestas de pobladores de comunidades cercanas, que refieren carestía de agua y alto riesgo de contaminación ambiental.

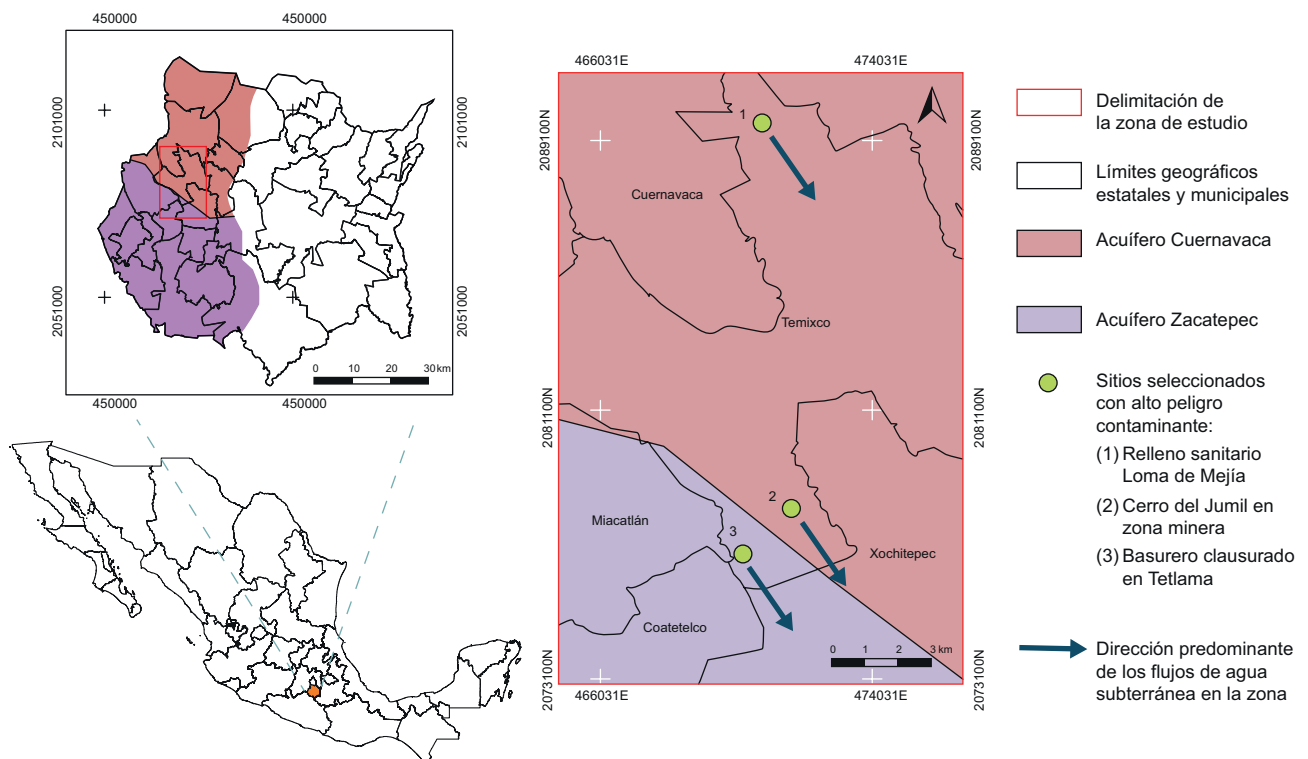


Fig. 2. Ubicación de la zona de estudio en la región norponiente del estado de Morelos, México.

La población aproximada dentro del área circular de 4 km de radio de CJ es de 24 500 personas en 6350 viviendas (INEGI 2023).

- Basurero clausurado de Tetlama (BT; UTM -99.2812°, 18.7839°). Este basurero se clausuró en 2006 después de 35 años de actividad, debido a las protestas de pobladores de las comunidades aledañas al mismo. Después de su cierre, se confinó ahí mismo la basura, conteniéndola y cubriéndola con tierra (Ochoa-Chi 2014). La población aproximada dentro del área circular con radio de 4 km con centro en BT es de 2902 personas en 823 viviendas habitadas (INEGI 2023).

Se seleccionaron estos sitios por la actividad, cantidad y tipo de contaminantes que acopian actualmente (y los que se estima pueden acumular y/o generar), ya que representan un peligro de contaminación para el agua subterránea (Parvin y Tareq 2021); además, por la dirección y sentido predominante de los flujos de agua subterránea (Morales-Casique et al. 2016), los cuales suponen un riesgo de afectación a zonas urbanas con alta población.

La orografía general de la zona de estudio presenta un cambio altitudinal ascendente, de sur a norte, de 1050 a 1600 msnm. La región norte, donde se ubica LM, tiene un clima semicálido subhúmedo con temperatura media de 18 a 22 °C, con una precipitación anual entre 1000 y 1250 mm. Los suelos más comunes son Andosol y Feozem. Los ecosistemas predominantes son pastizal inducido, selva baja caducifolia, bosque de encino y bosque de galerías. Los sitios CJ y BT tienen un clima cálido subhúmedo con temperatura media de 22 a 26 °C y precipitación anual entre 850 y 900 mm (con lluvias principalmente de mayo a octubre). Los suelos predominantes son leptosol, regosol y vertisol. En esta región sur predominan la selva baja caducifolia y los pastizales inducidos (Magaña-Rueda et al. 2020, Sorani-Dalbon et al. 2020a, b).

Un dato relevante es que el monitoreo de calidad del agua subterránea de la CONAGUA para el periodo 2012-2023 reportó la presencia de arsénico en concentraciones hasta cinco veces superiores al límite máximo indicado en la NOM-127-SSA1-2021 (SSA 2022) en muestras de 14 pozos de agua, cinco dentro de la zona de estudio y los restantes nueve a menos de 5 km de esta (CONAGUA 2023). Además, en el análisis de suelo para un sitio ubicado en la zona minera cercana a CJ, se obtuvo una concentración de arsénico de 271.69 mg/kg, cantidad casi 13 veces superior a lo permitido en suelos para uso agrícola (SEMARNAT 2023).

Evaluación hidrogeológica

Para evaluar el impacto de la dimensión hidrogeológica se construyó un mapa de vulnerabilidad de contaminación del agua subterránea (DRASTFU, por su sigla en inglés), adaptando el modelo DRASTIC (USEPA 1987) comúnmente utilizado para estos fines. Se emplearon cinco de los siete indicadores del modelo DRASTIC: profundidad a la que se encuentra el nivel freático (D), recarga neta de agua (R), características del acuífero (A), características del suelo (S) y topografía de la zona (T). Esta evaluación consideró, además de los indicadores tradicionales, la dirección y sentido de los flujos del agua subterránea (F), así como la ubicación y peligro ponderado de tres sitios con alto riesgo contaminante en la zona de estudio (U). A diferencia del método DRASTIC, el modelo propuesto, DRASTFU, no toma en cuenta el impacto de la zona vadosa (I), debido a que consideramos que esta información se considera en las categorías D, A y S. Tampoco se tomó en cuenta la conductividad (C) y en su lugar se consideró la dirección predominante de los SFAS y la ubicación de los principales sitios con peligro de contaminación en la zona de estudio. Los nuevos factores incorporados indican cuáles pobladores tienen actualmente el mayor riesgo; asimismo, cuáles podrían ser afectados (a futuro) en caso de que se presente la contaminación del agua subterránea (Marín et al. 2001, León-Gómez et al. 2015).

En esta metodología se asigna un valor relativo (r) entre 1 y 5, así como una puntuación (w) entre 1 y 10, a cada uno de los factores. Se emplearon los mismos valores relativos (r) de DRASTIC mientras que las puntuaciones (w) se asignaron de acuerdo con las características específicas de cada indicador en la zona de estudio (**Cuadro CI** en el material complementario). El mapa DRASTFU obtenido es el resultado de la sumatoria de los puntajes de los siete parámetros considerados. Los sitios en los cuales el agua subterránea tiene mayor vulnerabilidad a la contaminación son los que obtienen un puntaje más alto de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$DRASTFU = Dr (Dw) + Rr (Rw) + Ar (Aw) + Sr (Sw) + Tr (Tw) + F + Ur (Uw)$$

La dirección y sentido predominante del SFAS (F) no se ponderaron en esta instancia. En su lugar, este modelo utilizó un polígono en forma de cono con su vértice ubicado en el foco contaminante (U) y la base del cono, orientada hacia donde fluyen los SFAS predominantes.

Las características generales de los factores usados en DRASTFU fueron:

- Profundidad del nivel freático (D). Distancia entre la superficie del suelo y el nivel freático. Se presenta mayor vulnerabilidad cuando el nivel freático está a menor profundidad.
- Recarga neta de agua pluvial (R). Cantidad de agua que se infiltra en el suelo y puede alcanzar el nivel freático. Una mayor recarga neta representa mayor vulnerabilidad.
- Características geológicas del subsuelo, formación geológica predominante (A). Se toma en cuenta el tipo de roca y el grado de compactación que presenta la litología del área de estudio. Materiales con granos grandes y poco compactados tienen alta permeabilidad; por lo tanto, alta vulnerabilidad. Zonas con granos pequeños y muy compactados tienen baja permeabilidad y menor vulnerabilidad.
- Tipo de suelo (S). Es la capa superior del suelo que normalmente tiene un grosor menor a 1 m. Mayor permeabilidad se relaciona con mayor vulnerabilidad.
- Pendiente del terreno (T). Pendientes pronunciadas generan un alto nivel de escurrimientos, disminuyendo la infiltración. Se considera más vulnerables a sitios planos que presenten alta precipitación y suelo poroso.
- Dirección y sentido de los flujos predominantes de agua subterránea (F). Con fundamento en la teoría de los SFAS, se considera que el agua, una vez que se infiltra en el subsuelo, viaja de manera vertical hasta alcanzar el nivel freático. Al alcanzar el nivel freático, el agua que se ha infiltrado (junto con los contaminantes acarreados y/o disueltos), viajará en la dirección y sentido del flujo predominante para la zona, formándose una “pluma” de dispersión con los elementos o sustancias contaminantes (Tóth 1999, GBM 2002).
- Efecto de sitios con alto peligro de contaminación al agua subterránea (U). Se identifican tres sitios con alto peligro de contaminación: *i*) relleno sanitario ubicado en Loma de Mejía (LM), *ii*) zona minera que incluye al Cerro El Jumil (CJ) y *iii*) basurero clausurado cercano a la comunidad de Milpillitas Tetlamsa (BT). De acuerdo con las características actuales observadas en los tres sitios respecto a su peligro de contaminación, se les asigna el siguiente valor relativo: 1x para CJ, 1.5x para LM y 3x para BT.

Para el análisis y transformación de estos factores se empleó el programa informático de código abierto QGIS (2022). Esta evaluación de vulnerabilidad

es de tipo inespecífico, ya que no se centra en algún contaminante o grupo de estos (Massone 2013). Sin embargo, particularmente en cuanto a las concentraciones de arsénico, debido a su toxicidad y a su frecuente presencia a nivel nacional en pozos de agua usada para consumo de pobladores, se consultaron los resultados de la Red Nacional de Monitoreo de la Calidad del Agua Subterránea de la CONAGUA para ubicar los pozos con niveles elevados de As en la zona de estudio (Fariás et al. 2021, CONAGUA 2023, Mahlke et al. 2023).

Caracterización social y de salud

Se recopiló información sociodemográfica, así como de hábitos de uso y consumo de agua por pobladores en la región de estudio mediante la aplicación del instrumento “Cuestionario uso y consumo de agua subterránea y salud poblacional” (investigación 071122-89 aprobada por el Comité de Ética del CITPSI-UAEM). Dicho cuestionario se aplicó en un total de 134 hogares ubicados en un radio menor a 4 km de cada uno de los sitios identificados con alto riesgo contaminante. Los hogares fueron seleccionados mediante muestreo no probabilístico y a conveniencia (dando preferencia a practicar la entrevista con la madre de familia o tutora del hogar). Los criterios de inclusión fueron: ubicación del domicilio en el interior de las áreas circulares delimitadas, tener al menos 5 años de residencia en la localidad (considerando que algunas de las afectaciones de salud evaluadas se desarrollan de manera crónica), ser mayor de 18 años, aceptar la participación y firmar el consentimiento informado del proyecto.

Los resultados obtenidos con los cuestionarios se complementaron con datos existentes en fuentes secundarias del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), el Consejo Nacional de Población (CONAPO 2020) y la base de datos Cubos Dinámicos de la Dirección General de Información en Salud (DGIS). Se llevó también un registro etnográfico a través de un diario de campo durante los cuestionarios y visitas a las zonas de estudio.

Las posibles afectaciones a la salud de los pobladores consideradas en este estudio corresponden a las observadas con mayor frecuencia en el uso y consumo de agua contaminada o no potable relacionada con basureros y zonas con actividad minera (Hostýnek et al. 1993, Hopenhayn 2006, Jaisankar et al. 2014, Briffa et al. 2020, Li et al. 2021, Xie et al. 2023). Las variables y las abreviaturas usadas en los análisis de datos se presentan en el **Cuadro I**.

CUADRO 1. LISTADO DE VARIABLES SOCIOECONÓMICAS, DE UBICACIÓN Y DE SALUD USADAS EN LOS ANÁLISIS DE CORRELACIONES Y EN EL ANÁLISIS DE FUNCIONES DISCRIMINANTES.

VARIABLES SOCIOECONÓMICAS	
AE	Años de estudio de la persona encuestada
AR	Años de residencia de la familia en hogar encuestado
CAPT	Gasto económico mensual en agua (por persona)
COAP	Gasto económico mensual para abastecimiento alternativo de agua (por persona)
IM	Ingreso monetario mensual en el hogar encuestado
PH	Número de personas que habitan en el hogar encuestado
SA	Contar o no con el servicio público de abastecimiento de agua
VARIABLES DE UBICACIÓN	
DFC	Distancia del hogar al sitio con alto peligro de contaminación
DPA	Distancia del hogar al pozo de abastecimiento de agua
VUL	Nivel de vulnerabilidad (obtenido con el modelo DRASTFU) en el que se ubica el hogar encuestado
ZONA	Zona en que se encuentra el hogar encuestado: Tetlama (BT), Cerro del Jumil (CJ) o Loma de Mejía (LM)
VARIABLES DE SALUD	
PANE	Anemia
PANSI	Ansiedad
PCAL	Cálculos renales
PCAN	Cáncer
PCE	Problemas de comportamiento en estudiantes (agrupado)
PCHIP	Hiperactividad, estudiantes
PCDA	Dificultad en aprendizaje, estudiantes
PCFA	Falta de atención, estudiantes
PCIRR	Irritabilidad frecuente, estudiantes
PDAM	Fluorosis dental
PDEM	Demencia
PDFR	Dientes fracturados
PDH	Problemas de salud en dientes y/o huesos (agrupados)
PDIAB	Diabetes
PDIAL	Necesidad de diálisis renal
PDIAR	Diarreas
PDO	Dificultad para orinar
PG	Problemas de salud gastrointestinales (agrupados)
PIH	Infecciones en piel por hongos
PHIPER	Hipertensión
PINS	Insomnio
PM	Problemas de salud metabólicos (agrupados)
PPARK	Enfermedad de Parkinson
PP	Problemas de salud en piel (agrupados)
PPR	Piel reseca
PPS	Salpullido
POST	Osteoporosis
PR	Problemas de salud en riñones y vías urinarias (agrupado)
PSN	Problemas de salud relacionados con el sistema nervioso (agrupado)
PTM	Temblores de pies o manos
PVO	Vómito

Análisis de datos

Se aplicaron 59 encuestas en CJ, 37 en LM y 38 en BT para un total de 134. Se categorizó la variable SA (0: no contar con servicio de agua; 1: contar con servicio de agua). La variable VUL se categorizó de acuerdo con el grado de vulnerabilidad obtenido en

el mapa DRASTFU: baja (1), moderada (2), media (3), alta (4) y extrema (5).

El cálculo de la prevalencia de afectaciones de salud se hizo dividiendo el número de casos referidos entre el número total de personas en cada grupo de estudio (225 personas en CJ, 180 personas

en LM y 174 personas en BT), y multiplicando este resultado por 100. Para facilitar el análisis de las afectaciones de salud, se realizó la siguiente clasificación de las enfermedades consideradas: 1) problemas gastrointestinales (vómito y diarrea); 2) problemas de la piel (piel reseca, salpullido, infecciones por hongos y manchas negras en palmas de manos o plantas de los pies); 3) problemas renales (dificultad para orinar, cálculos renales, necesidad de diálisis); 4) problemas en el sistema nervioso (temblores, insomnio, ansiedad, demencia, enfermedad de Parkinson); 5) enfermedades metabólicas (anemia, diabetes, hipertensión); 6) cáncer; 7) problemas en huesos y dientes (osteoporosis, dientes manchados por fluorosis dental, dientes fracturados), y 8) problemas de atención y comportamiento en estudiantes (hiperactividad, dificultad en el aprendizaje, falta de atención e irritabilidad frecuente). Se aplicó el estadístico chi-cuadrado (con la prueba exacta de Fisher cuando fue requerido) para valorar diferencias significativas ($p \leq 0.05$)

en la prevalencia de enfermedades agrupadas para los tres sitios encuestados.

El análisis integral de la información multidimensional se realizó en primer lugar construyendo una red de correlaciones entre todas las variables y, en segundo lugar, mediante un análisis de funciones discriminantes (FDA) con 18 variables evaluadas en las tres zonas estudiadas. El análisis de la base de datos se realizó con el programa de acceso libre R-studio (2020).

RESULTADOS

Se generó un mapa de la región de estudio en el que se presenta la ubicación de los tres sitios identificados con alto peligro de contaminación del agua subterránea, las áreas urbanizadas y los pozos autorizados por la CONAGUA. Se identifican en color rojo los pozos que superan el límite en la concentración de arsénico para el agua de uso y consumo humano (**Fig. 3**).

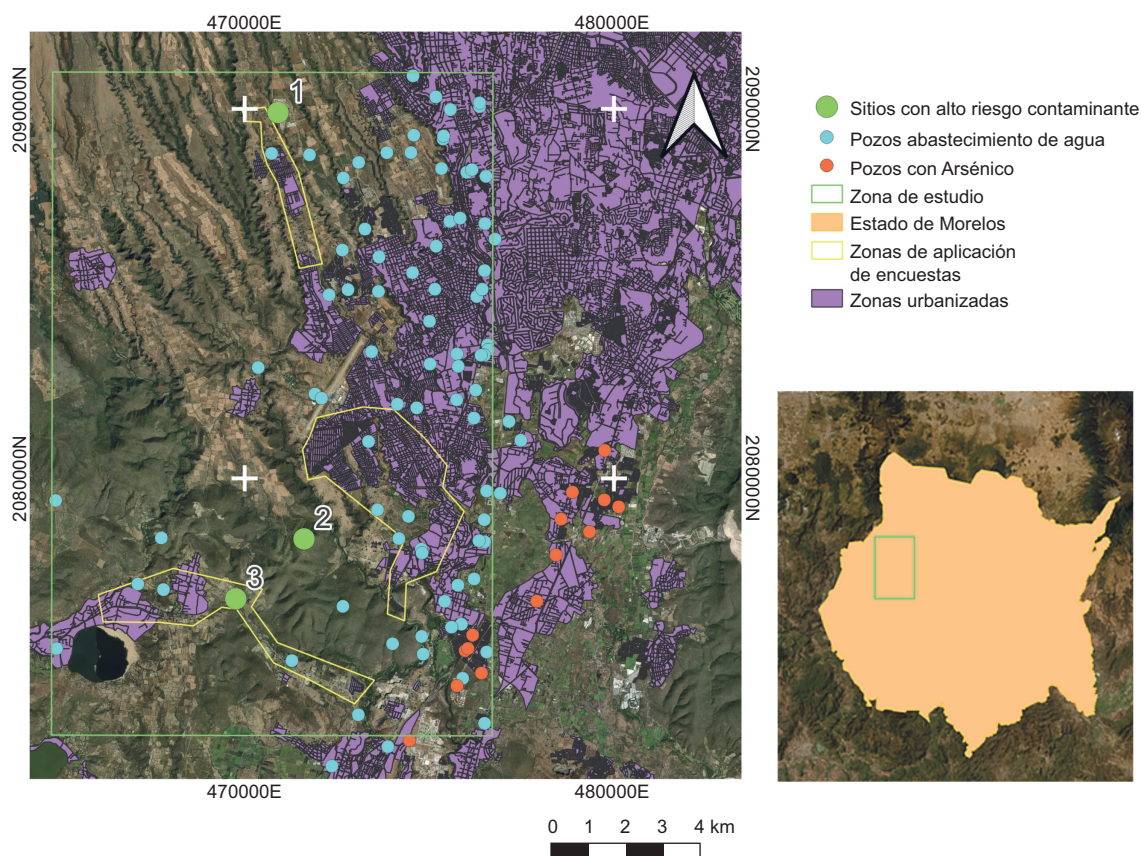


Fig. 3. Ubicación de zonas urbanizadas y de los tres sitios identificados con alto peligro de contaminación al agua subterránea dentro de la zona de estudio.

Mapa de vulnerabilidad de contaminación DRASTFU

Se identificaron regiones de vulnerabilidad extrema a la contaminación del agua subterránea al sureste de BT. En esta zona se ubican dos pozos dentro de un área de vulnerabilidad extrema, uno de ellos a 4.3 km del antiguo basurero, que es el que actualmente abastece de agua a los hogares de la región. La zona al extremo poniente de BT (donde se encuentran dos pozos de abastecimiento público) presenta un nivel de vulnerabilidad entre moderado y medio. En LM existen 12 pozos dentro del polígono de mayor peligro de contaminación, ubicados en zonas con vulnerabilidad media y alta. Las mesetas, que son las regiones con mayor urbanización en la zona, se calificaron con un nivel de vulnerabilidad alto, mientras que los ubicados en el fondo de los barrancos se calificaron como sitios con vulnerabilidad extrema. Dentro del polígono de mayor peligro de contaminación en CJ se encuentran siete pozos, cinco de ellos ubicados en zonas de vulnerabilidad media y dos en zonas de vulnerabilidad alta. Dos de los pozos dentro del polígono de influencia de CJ presentan (de acuerdo con la red de monitoreo de calidad del agua subterránea de CONAGUA) una concentración de arsénico que sobrepasa el límite de 0.01 mg/L permitido por la Norma Oficial Mexicana, por lo que no se recomienda su uso como fuente de agua para potabilizar (**Fig. 4**).

Se identificó que para los sitios BT y CJ, no existe actualmente un proceso paliativo o correctivo que disminuya el peligro de contaminación al agua subterránea (observación personal). En el caso del relleno sanitario LM, se observó la presencia de una geomembrana para contener la infiltración de lixiviados al subsuelo (sin que se haya podido comprobar la integridad y buen manejo de esta); sin embargo, se mantiene como un sitio con alto peligro de contaminación del agua subterránea por la alta permeabilidad del suelo y por ubicarse entre dos barrancas, de las cuales una presenta un caudal perenne.

Caracterización social y de salud de la población

La población total encuestada (113 mujeres y 21 varones) tuvo un promedio de edad de 48.3 años. El promedio de años de residencia fue de 13 en LM, 20 en BT y 26 en CJ. Respecto a la percepción de la calidad del agua que reciben los hogares, el 60 % de los ubicados en CJ y LM refieren que el agua es “buena”, mientras que en BT este rubro baja a 41 % con un 23 % de hogares donde refieren que el agua es de “mala calidad”, ya que esta proviene de un canal (agua superficial) y frecuentemente llega turbia

y con mal olor. Únicamente en BT se abastece agua de origen superficial a algunos hogares encuestados (24 %).

La principal fuente de abastecimiento de agua para los hogares es la red pública (BT, 57 %; LM, 63 %; y CJ, 95 %). Los tinacos de plástico y las cisternas de cemento son los medios más frecuentemente utilizados para almacenar agua. Los hogares que no se encuentran conectados a la red de agua potable la obtienen principalmente comprándola a particulares (servicio de pipas). La principal fuente de agua para beber son garrafones de purificadoras locales (LM, 58 %; CJ, 93 %; y BT, 97 %). El agua de la red pública es la principal fuente para beber en los hogares que no la compran en garrafones (14 % del total de hogares). De los hogares que beben agua de la red pública, el 38 % refiere que la hierven o le aplican gotas desinfectantes antes de beberla, mientras que en el porcentaje restante no se aplica ningún tratamiento. El gasto económico promedio que se realiza en cada hogar para abastecerse de agua (para beber y para uso diario) es del 7.8 % en CJ, 12.4 % en LM y 18.2 % en BT del ingreso monetario mensual promedio referido para cada sitio. En la **figura 5** se muestra el diagrama general del origen del agua para uso y consumo humano encontrado en la región de estudio.

El 94% de la población total encuestada respondió afirmativamente a la pregunta “¿Sabe usted si el tomar agua contaminada o no potable genera o puede generar alguna enfermedad?”. Al pedirle a los encuestados que mencionaran las afectaciones a la salud ocasionadas por el consumo de agua contaminada o no potable que conocieran, la principal respuesta fue “dolor” y/o “infecciones de estómago”, seguidas de “diarreas”, “cólera”, “infecciones” y “parásitos”. Sólo tres personas (dos en CJ y una en LM) refirieron “cáncer”, mientras que “problemas renales”, “presencia de plomo” y “retraso mental” fueron referidos en una sola ocasión.

En cuanto a la prevalencia de enfermedades y afectaciones posiblemente originadas por el uso y consumo de agua contaminada o no potable, se encontró que en CJ, las cinco principales afectaciones a la salud referidas fueron: diabetes (11.6 %), piel reseca (9.8 %), hipertensión (8 %), ansiedad (7.6 %) e insomnio (6.7 %). Para los hogares encuestados en LM, las principales afectaciones fueron: diarreas (13.9 %), piel reseca (12.8 %), diabetes (8.3 %), salpullido (7.2 %) e hipertensión (6.7 %). En BT, las cinco principales afectaciones a la salud fueron: diarreas (8 %), dificultad para orinar (7.5 %), hipertensión (7.5 %), diabetes (7 %) y salpullido (7 %).

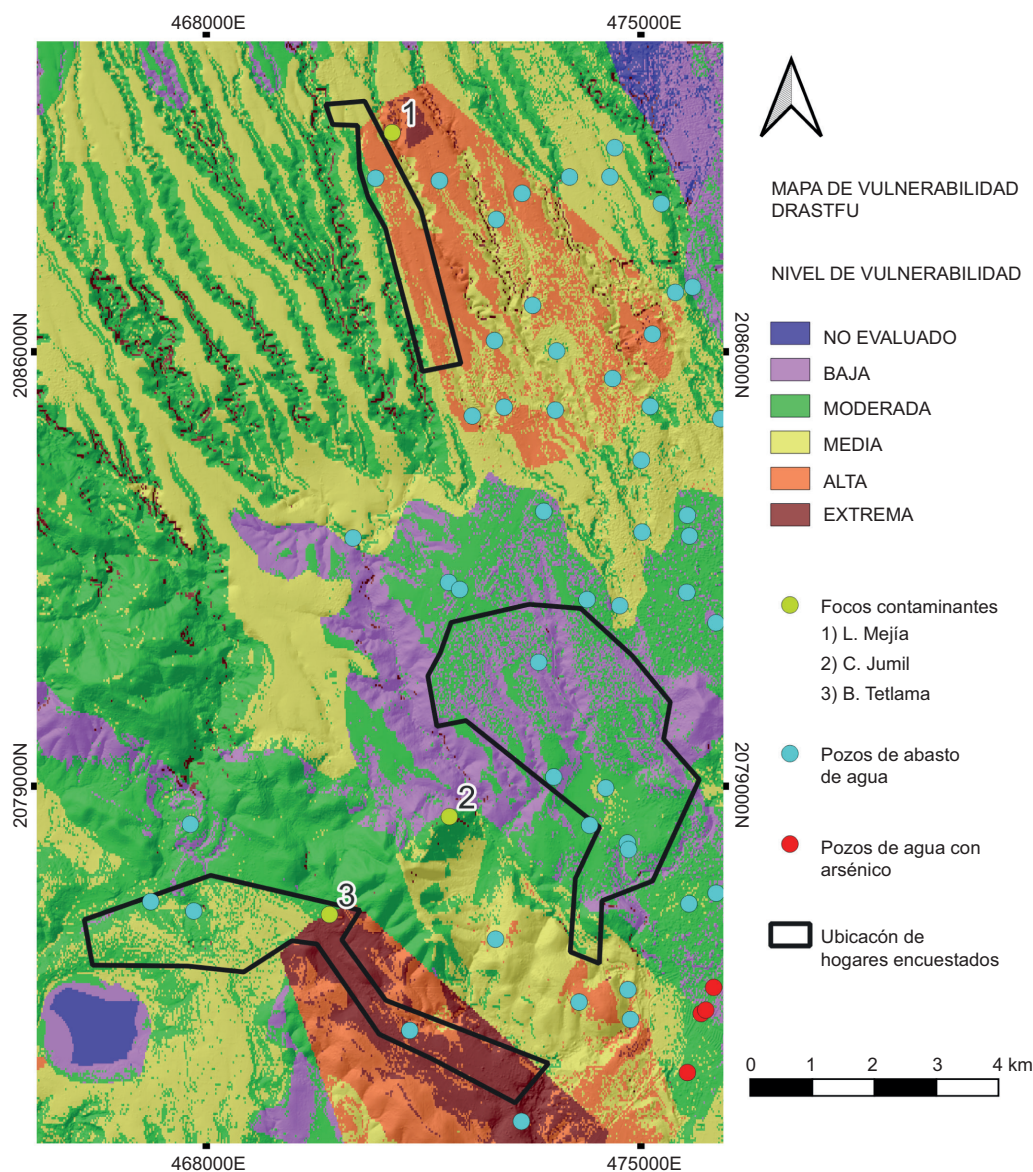


Fig. 4. Mapa de vulnerabilidad de contaminación obtenido con el modelo DRASTFU para la región norponiente del estado de Morelos.

Considerando a la población total encuestada (579 habitantes), las afectaciones a la salud referidas con mayor frecuencia fueron: piel reseca (9.5 %), diabetes (9.2 %), diarreas (7.4 %) e hipertensión (7.4 %). Las afectaciones a la salud referidas con menor frecuencia en la población total estudiada fueron: manchas negras en palmas de manos y/o plantas de los pies (0), Parkinson (1 %), necesidad de diálisis renal (3 %), demencia (4 %) y osteoporosis (5 %). En el caso del cáncer, la población total refirió nueve casos (1.6 %), de los cuales cinco se ubicaron en BT, dos en LM y dos en CJ (**Fig. 6**).

Las frecuencias de afectaciones a la salud (agrupadas) obtenidas, mostraron diferencias estadísticamente significativas ($p \leq 0.05$) entre los hogares encuestados en CJ y LM para problemas gastrointestinales, afectaciones al sistema nervioso y problemas en dientes y/o huesos. Al comparar los resultados obtenidos entre CJ y BT, se encontraron diferencias significativas ($p \leq 0.05$) en la prevalencia de problemas gastrointestinales y problemas del comportamiento en estudiantes. También se encontraron diferencias con significancia estadística ($p \leq 0.05$) entre LM y BT en la prevalencia de problemas renales y problemas de comportamiento de estudiantes (**Fig. 7**).

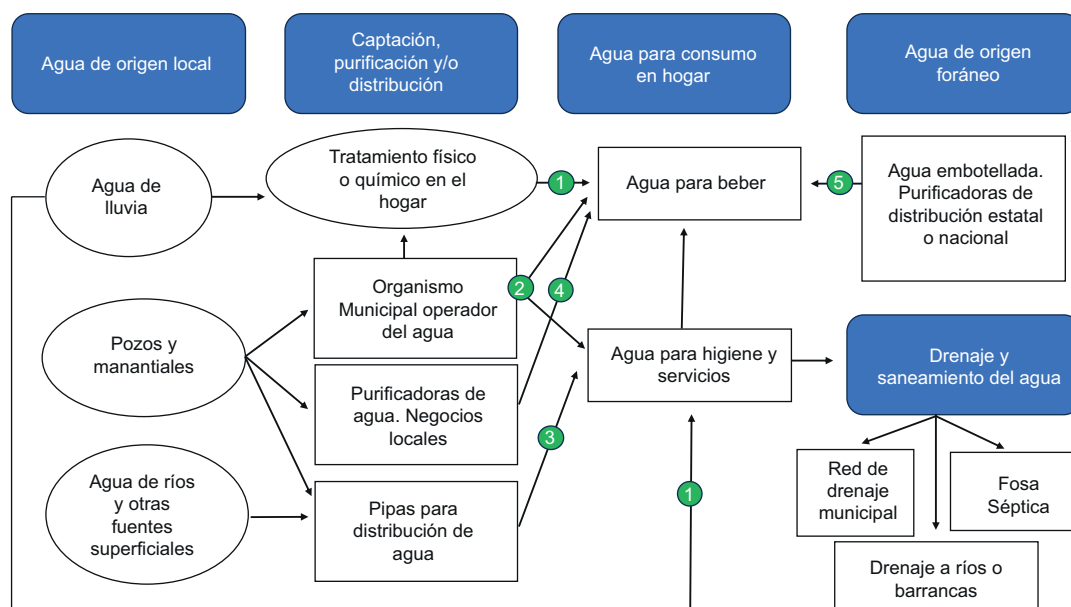


Fig. 5. Fuentes de abastecimiento y destino final del agua para uso en hogar y para beber en la región norponiente del estado de Morelos. En los círculos verdes se indica una relación general de costo del agua, de menor (1) a mayor (5).

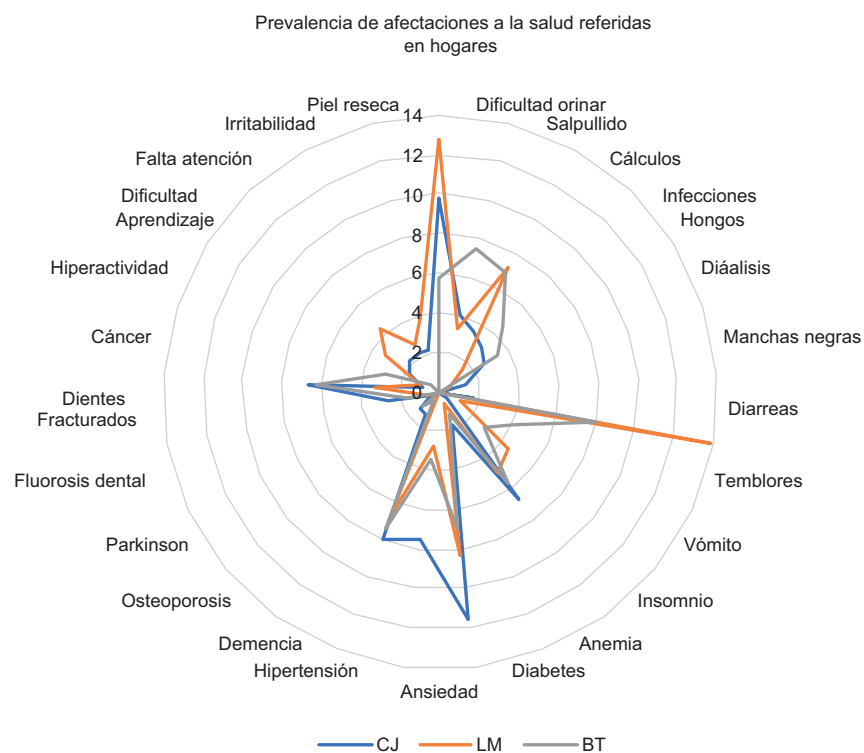


Fig. 6. Prevalencia (en porcentaje) de afectaciones a la salud referidas por encuestados para los tres sitios dentro de la zona de estudio. Sitios encuestados: Cerro del Jumil (CJ), Loma de Mejía (LM) y Tetlama (BT).

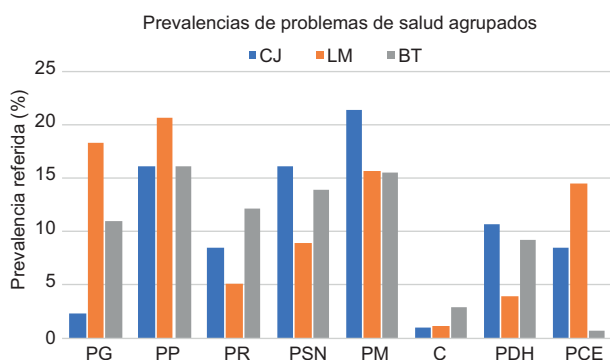


Fig. 7. Prevalencia de afectaciones a la salud (agrupadas) referidas por encuestados en los tres sitios dentro de la zona de estudio: Cerro del Jumil (CJ), Loma de Mejía (LM) y Tetlama (BT). PG: problemas gastrointestinales; PP: problemas en piel; PR: problemas en vías urinarias y riñones; PSN: problemas relacionados con el sistema nervioso; PM: problemas metabólicos; C: cáncer; PDH: problemas en dientes y huesos; PCE: problemas de comportamiento en estudiantes.

Aun cuando en 2020 CONAPO indicó el mismo grado de marginación para los habitantes de los tres municipios, encontramos diferencias en las condiciones socioeconómicas de los tres sitios estudiados. Los habitantes de CJ están en una zona de mayor densidad poblacional donde la mayoría de los pobladores cuentan con servicios públicos como agua potable, luz eléctrica, transporte, drenaje, recolección de basura, escuelas y centros de salud. LM es una comunidad de formación más reciente, en la que sólo cerca de la mitad de los hogares cuenta con servicio de agua potable. En LM sólo se encuentran pavimentadas las calles principales y no se cuenta con drenaje. En BT se encontró mayor precariedad en los hogares, en especial en aquellas familias que viven a escasos metros del antiguo basurero, las cuales originalmente se dedicaban a la separación y recolección de materiales valorizables de la basura (pepenadores). Esta colonia no cuenta con servicio de agua potable ni drenaje; tampoco hay escuelas ni servicios de salud gubernamentales.

Perfil general de salud de los habitantes de Xochitepec, Temixco y Miacatlán

Como resultado de la consulta a la base de datos Cubos Dinámicos de la Dirección General de Información en Salud (SSA 2024) con el objetivo de conocer las principales causas de mortalidad y motivos de consulta en las poblaciones más cercanas a los tres focos contaminantes seleccionados (Temixco, LM; Xochitepec, CJ, y Miacatlán, BT) se encontró que

dos de las afectaciones consideradas en la encuesta aplicada (enfermedad renal crónica y diálisis, y diabetes mellitus tipo 2), están entre los 10 principales motivos de consulta en los servicios de atención a la salud pública. La afectación “enfermedad crónica y cuidados relativos a diálisis” presentó los siguientes casos por cada cien mil habitantes: 2681 en Miacatlán, 1068 en Temixco y 800 en Xochitepec. Respecto a la diabetes mellitus tipo 2, los casos reportados fueron: 130 en Miacatlán, 39 en Temixco y 27 en Xochitepec. Por otro lado, la principal causa de muerte en los tres municipios estudiados fue enfermedad hipertensiva, infartos y otras afecciones relacionadas. Entre las 20 principales causas de muerte en los tres municipios se encuentran siete consideradas en este estudio: diabetes mellitus tipo 2, hipertensión, enfermedad renal y cuatro tipos de cáncer: próstata, estómago, cuello uterino e hígado. Al agrupar las muertes por algún tipo de cáncer, se encontraron los siguientes casos por cada cien mil habitantes: 75 en Miacatlán, 82 en Temixco y 87 en Xochitepec.

Análisis correlacional entre variables

Las principales correlaciones positivas con significancia estadística ($p \leq 0.05$) fueron: ZONA-VUL (0.73), SA-DFC (0.45) y AE-IM (0.42). Entre las variables de salud, los problemas de conducta en estudiantes presentaron las correlaciones positivas más elevadas: PCDA-PCIRR (0.75), PCDA-PCHIP (0.69), PCHIP-PCIRR (0.67), PCDA-PCFA (0.62) y PCFA-PCIRR (0.6). En enfermedades gastrointestinales se encontró la correlación PVO-PDIAR (0.48). Respecto a correlaciones con la cuestión monetaria, la correlación PPS-COAP es de 0.4 y PCAL-CATP de 0.34. Las principales correlaciones negativas con significancia estadística ($p \leq 0.05$) fueron: DFC-ZONA (-0.84), DFC-VUL (-0.72), SA-VUL (-0.5), AR-VUL (-0.39). Al agrupar los problemas o afecciones de salud, las principales correlaciones con significancia estadística ($p \leq 0.05$) fueron: PP-CATP (0.36) y PSN-PR (0.36). No se obtuvieron correlaciones con significancia estadística entre las variables contempladas con PM, PCAN y PCE (**Fig. 8**).

Análisis de funciones discriminantes (FDA)

La dimensión 1 del gráfico obtenido con el FDA explica el 98 % de la varianza de la muestra total, con lo cual se logra una separación clara entre los hogares encuestados en CJ respecto de los hogares en BT y LM. Las variables que más contribuyen a la separación de los grupos en la dimensión 1 son:

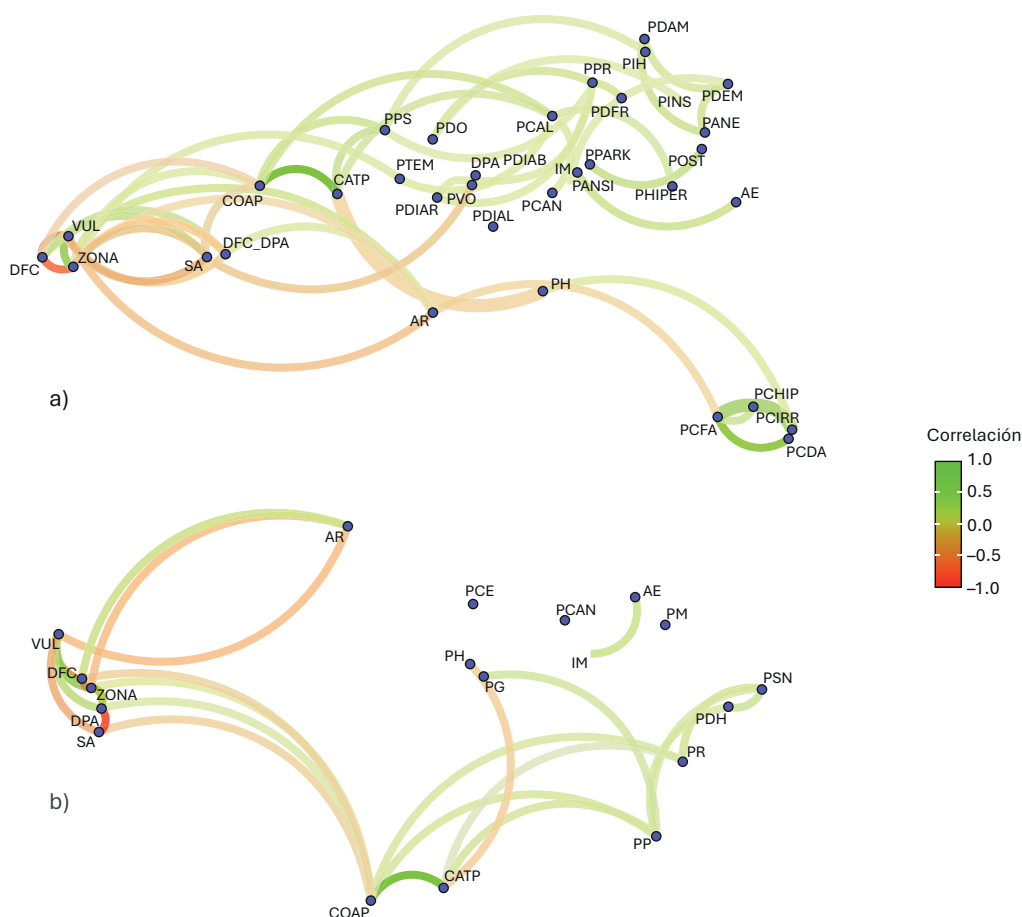


Fig. 8. Mapa de correlaciones de Pearson entre variables. (a) Correlaciones considerando todas las afectaciones de salud encuestadas. (b) Correlaciones considerando las variables de salud agrupadas. Se presentan únicamente las correlaciones con valor absoluto mayor a 0.25. Variables socioeconómicas: AE: años de estudio de la persona encuestada; AR: años de residencia de la familia en el hogar encuestado; COAP: gasto económico mensual en agua por persona; IM: ingreso monetario mensual en el hogar encuestado; PH: número de personas que habitan en el hogar encuestado; SA: cuenta o no con el servicio público de abastecimiento de agua. Variables de ubicación: DFC: distancia del hogar al sitio con alto peligro de contaminación; DPA: distancia del hogar al pozo de abastecimiento de agua; VUL: nivel de vulnerabilidad DRASTFU en el que se ubica el hogar encuestado; ZONA: zona en que se encuentra el hogar encuestado; Tetlama, Cerro del Jumil o Loma de Mejía. Variables de salud: PANE: anemia; PCAL: cálculos renales; PCAN: cáncer; PCE: problemas de comportamiento en estudiantes, agrupado; PCHIP: hiperactividad, estudiantes; PCDA: dificultad en aprendizaje, estudiantes; PCFA: falta de atención, estudiantes; PCIRR: irritabilidad frecuente, estudiantes; PDAM: fluorosis dental; PDEM: demencia; PDFR: dientes fracturados; PDH: problemas de salud en dientes y/o huesos, agrupados; PDIAB: diabetes; PDIAL: necesidad de diálisis renal; PDIAR: diarreas; PDO: dificultad para orinar; PG: problemas de salud gastrointestinales, agrupados; PIH: infecciones en piel por hongos; PHIPER: hipertensión; PINS: insomnio; PM: problemas de salud metabólicos, agrupados; PPARK: enfermedad de Parkinson; PP: problemas de salud en piel, agrupados; PPR: piel reseca; PPS: salpullido; POST: osteoporosis; PR: problemas de salud en riñones y vías urinarias, agrupados; PSN: problemas de salud relacionados con el sistema nervioso, agrupados; PTEM: temblores de pies y/o manos; PVO: vómito

PCAN, SA, VUL y PM. Aunque la dimensión 2 sólo explica el 2 % de la variabilidad de las muestras, es importante para discriminar entre los grupos LM y BT. En la dimensión 2, las variables que más contribuyen a la separación intergrupar son: PCE, PR, PP Y PH. Tomando en cuenta los tres sitios encuestados, se sometió a las 18 variables del modelo FDA a un análisis de varianza multivariado (MANOVA), resultando diferencias entre grupos ($p \leq 0.05$)

en las variables DFC, AR, SA, PH, COAP, CATP, VUL, PG y PCE. (**Fig. 9 y Cuadro II**).

DISCUSIÓN

La salud de las personas es un fenómeno dinámico que depende de múltiples factores tanto ambientales (físicos) como socioeconómicos, culturales e incluso

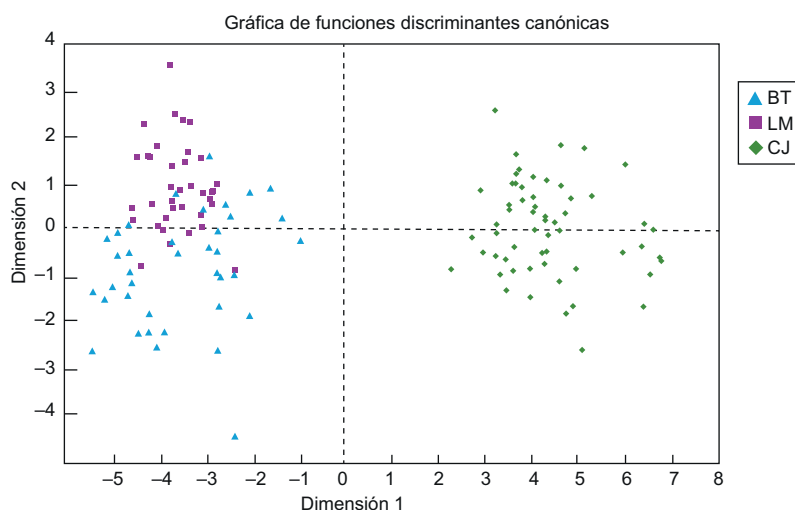


Fig. 9. Gráfica en plano del análisis de funciones discriminantes. Ordenamiento de los hogares encuestados en Cerro de Jumil (CJ), Loma de Mejía (LM) y Tetlama (BT).

CUADRO II. IMPORTANCIA RELATIVA DE LAS 18 VARIABLES CONSIDERADAS EN LA CLASIFICACIÓN INTERGRUPAL DEL ANÁLISIS DE FUNCIONES DISCRIMINANTES. SE IDENTIFICAN CON ASTERISCO LAS VARIABLES CUYOS VALORES MUESTRAN DIFERENCIAS CON SIGNIFICANCIA ESTADÍSTICA ($p \leq 0.05$) EN EL ANÁLISIS MULTIVARIADO DE VARIANZAS.

Variable	Dimensión 1	Dimensión 2
Distancia del hogar al foco contaminante*	0.000833	-1.04E-04
Distancia del hogar al pozo de abastecimiento	-0.000363	1.50E-05
Años de residencia de persona encuestada*	-0.007835	-2.21E-02
Años de estudio de persona encuestada	-0.008659	4.06E-02
Contar en el hogar con el servicio público de agua*	-0.597372	-2.17E-01
Número de personas que habitan el hogar*	-0.07348	-2.39E-01
Gasto económico mensual para abastecimiento alternativo de agua, por persona*	-0.004435	9.17E-03
Gasto económico mensual en agua por persona*	0.003611	-1.04E-02
Ingreso monetario mensual en el hogar encuestado	-0.107184	1.62E-02
Nivel de vulnerabilidad del modelo DRASTFU en el que se ubica el hogar encuestado*	-0.587832	-5.52E-01
Problemas de salud gastrointestinales, agrupados*	0.058597	1.37E-01
Problemas de salud en piel, agrupados	-0.124086	2.57E-01
Problemas de salud en riñones y vías urinarias, agrupados	0.117832	-4.82E-01
Problemas de salud relacionados con el sistema nervioso, agrupados	0.130467	-1.58E-01
Problemas de salud metabólicos, agrupados	0.153061	2.39E-01
Problemas de salud, cáncer	-0.75266	-6.06E-01
Problemas de salud en dientes y/o huesos, agrupados	0.013632	-1.92E-01
Problemas de comportamiento en estudiantes, agrupados*	0.07512	5.47E-01

psicológicos (Thomas et al. 2019). El gran número de factores implicados y la diversidad de estos vuelven muy complejo el análisis del fenómeno. En esta investigación se realizó una evaluación de riesgos no convencional enfocada a la posible afectación a la salud de pobladores que habitan cerca de tres focos con alto peligro de contaminación (Massone 2013). El principal factor evaluado fue la vulnerabilidad de contaminación del agua que usan y consumen los

pobladores de la zona de estudio. Si bien el método tradicional (DRASTIC) ha mostrado ser efectivo en la evaluación de esta vulnerabilidad, su construcción es compleja, ya que requiere información de siete categorías que en ocasiones no se encuentra disponible o está incompleta (Khosravi et al. 2018).

Al incluir la ubicación de los sitios con mayor peligro de contaminación en el mapa DRASTFU, se logró evaluar también el riesgo de contaminación del agua

subterránea que abastece a los hogares de la zona de estudio. Existen otras fuentes contaminantes en la zona que recomendamos evaluar en futuros estudios, como efluentes con aguas negras o residuales de procesos urbanos e industriales; sin embargo, es posible que incluir un número elevado de fuentes contaminantes (tanto puntuales como difusas) genere un efecto de “saturación” en el mapa DRASTFU obtenido, lo cual impediría discriminar entre los diferentes niveles de vulnerabilidad, además de aumentar la complejidad de construcción y los recursos requeridos.

En la evaluación de salud, si bien tuvimos acceso a la base de datos Cubos Dinámicos (SSA 2023), la información en esta se encuentra descrita hasta el nivel municipal. Consideramos que los posibles efectos negativos en la salud de los pobladores tienen relación con los peligros de contaminación locales. Por lo anterior, la distancia máxima en la cual se aplicaron las encuestas se limitó a un radio de 4 km de los focos contaminantes, ya que el proceso de infiltración (recorrido vertical) de los contaminantes hasta alcanzar el nivel freático suele ser lento (entre 1 y 2 m por año) (Enríques-Sánchez 2019). Una vez alcanzado el nivel freático, las sustancias contaminantes que perduren se moverán en la dirección y con la velocidad del SFAS en cada región geológica.

Respecto al conocimiento de los pobladores encuestados sobre la relación entre la calidad del agua que usan y consumen y su salud, si bien el 94 % reconoció la existencia de dicha relación, menos del 1 % refirió el vínculo con alguna enfermedad o problema de salud diferente a los padecimientos gastrointestinales. Se encontraron diferentes prevalencias de los problemas de salud en los tres sitios encuestados, con excepción de la afección “manchas negras en palmas de manos” (cero casos en los tres sitios), la cual se relaciona con exposición crónica al arsénico. La prevalencia de los problemas gastrointestinales es la que mostró mayor diferencia entre los tres sitios: 2.2 % en CJ, 10.9 % en BT y 18.3 % en LM (**Fig. 7**). La prevalencia de los problemas de comportamiento en estudiantes también mostró diferencias marcadas; sin embargo, este resultado puede estar influido por el diferente número de estudiantes en los tres grupos, además de que en el mapa de correlaciones de los problemas de salud agrupados no se observa relación con otras variables. El análisis FDA permitió evaluar las relaciones multidimensionales entre las variables consideradas, resaltando que PG y PCE son las afectaciones de salud que más aportan a la discriminación intergrupala.

A partir de la información obtenida en esta investigación no es posible asegurar que estas afectaciones

sean causadas por el agua usada y/o consumida. Para atribuir una relación causal se requiere un estudio epidemiológico diferente, con muestreo probabilístico y aleatorio, en el cual se analice químicamente el agua consumida y se consideren los indicadores biológicos o agentes etiológicos de cada una de las afectaciones, además de controlar para diferentes variables (Fariás et al. 2021). Asimismo, es necesario considerar otras posibles vías de exposición a los contaminantes, como es la vía aérea (Sánchez-Arias et al. 2019). Otra limitante de esta evaluación radica en que las correlaciones de salud encontradas pueden estar condicionadas por grupos de edad, o bien que las patologías referidas sean diferentes síntomas de una misma enfermedad o afección; pero, sobre todo, debemos considerar que en esta evaluación no se realizó un diagnóstico clínico o médico sino únicamente una evaluación general de las afectaciones de salud referidas por los mismos encuestados.

La dinámica del agua subterránea no está influida por límites geográficos administrativos, a menos que estos coincidan con los límites de las cuencas hidrológicas o accidentes orográficos, como fallas geológicas. Por esta razón, consideramos que los esfuerzos enfocados a mantener la calidad y cantidad del agua subterránea para consumo humano y ambiental deben planificarse tomando en cuenta la ubicación de los sitios con alto peligro de contaminación, así como la dirección predominante de los SFAS y sus zonas de recarga, tránsito y descarga.

Respecto a los pozos identificados con concentraciones de arsénico superiores a las indicadas en la normativa mexicana, es importante conocer si con esa agua se abastece a la población de la zona. En caso de tratarse de pozos destinados como fuente de agua potable, es indispensable implementar acciones para disminuir el riesgo de afectación a la salud de estos pobladores. Es importante mencionar que contaminantes como arsénico y fluoruros no pueden removerse con los métodos de potabilización actualmente usados en la zona y normalmente no modifican las propiedades organolépticas del agua, pudiendo pasar inadvertidos por los pobladores que la beben (Huizar-Álvarez et al. 2016). Con la información obtenida y analizada en esta investigación, no es posible determinar el origen o fuente de este arsénico.

CONCLUSIONES

Debido a que la principal fuente de agua potable para los pobladores de la región norponiente del estado de Morelos es el agua subterránea, es

indispensable mantenerla con la calidad y en la cantidad requeridas para su uso y consumo diario. Contemplar la ubicación de los principales sitios con peligro de contaminación, así como la dirección y sentido de los SFAS, nos permitió identificar zonas con vulnerabilidad “alta” y “extrema” de contaminación al agua subterránea al sureste de BT. La región sureste de LM es la que presenta mayor riesgo de afectación debido a que allí se encuentra la mayor densidad poblacional, la cual coincide con la dirección y sentido de los SFAS, además de encontrarse 12 pozos al interior del polígono de mayor vulnerabilidad. En la región CJ el nivel de vulnerabilidad es de “medio” a “alto”. El mapa DRASTFU permitió evaluar la vulnerabilidad de contaminación del agua subterránea considerando la ubicación de los principales sitios con peligro de contaminación (en superficie) y la dirección y sentido de los SFAS predominantes para la zona. Es importante recalcar que el nivel de vulnerabilidad presentado para CJ sólo es válido mientras no inicie la explotación minera en la zona.

En las poblaciones estudiadas se encontraron injusticias socioeconómicas y ambientales, empezando por la cercanía de sus hogares a los sitios con alto peligro de contaminación identificados como BT, CJ y LM, lo que compromete la calidad y cantidad del agua asequible. Cuatro de cada 10 de los hogares ubicados en LM y BT carecen del servicio municipal de agua potable, por lo que deben obtenerla de fuentes alternas. Lo anterior implica un mayor gasto económico para las familias y mayor riesgo de afectación a su salud. La mayor prevalencia de enfermedades gastrointestinales en LM y en BT con relación a CJ coincide con la diferente accesibilidad al servicio de agua potable.

Existen diferencias en la prevalencia de los problemas de salud relacionados con el uso y consumo de agua entre los tres sitios evaluados, destacándose los gastrointestinales. No se encontraron diferencias entre las prevalencias de enfermedades crónicas como cáncer, diabetes e hipertensión; sin embargo, PCAN es una variable importante en el reacomodo de los grupos en el FDA. Este muestra una diferenciación clara entre el grupo CJ respecto a BT y LM, lo cual coincide con el tipo de peligro de contaminación (comunidades de CJ cercanas a la región concesionada a una empresa minera con relación al relleno sanitario LM y el basurero BT). Lo anterior sugiere características y/o condiciones similares en BT y LM.

El abordaje de la vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación, así como la posible afectación a la salud pública y ambiental, deben

centrarse en la prevención. Dada la importancia del agua subterránea, es primordial protegerla ante peligros de contaminación, pues se ha demostrado que una vez contaminada, se requiere una gran cantidad de recursos económicos y técnicos con los cuales, además, no se garantiza la remediación del problema. Recomendamos que el abordaje por parte de las diferentes instancias públicas implicadas en el tema sea multidisciplinario; sobre todo, que se consideren las zonas de protección o afectación con base en características hidrogeológicas y de la dinámica del agua subterránea, y no de acuerdo con divisiones administrativas como límites municipales.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) por la beca del Programa Nacional de Posgrados de Calidad otorgada para la realización de este trabajo, así como al Mtro. Josué Reyes Amaya por su colaboración para el desarrollo del modelo GIS y al Dr. José J. Blancas Vázquez por su asesoría para el análisis estadístico multivariado. Agradecemos también a todas las personas encuestadas en las comunidades consideradas por su tiempo, confianza, hospitalidad e interés en este estudio.

REFERENCIAS

- Alarcón-Herrera M.T., Martín-Alarcón D.A., Gutiérrez M., Reynoso-Cuevas L., Martín-Domínguez A., Olmos-Márquez M.A. y Bundschuh J. (2020). Co-occurrence, possible origin, and health-risk assessment of arsenic and fluoride in drinking water sources in Mexico: Geographical data visualization. *Science of The Total Environment* (698), 134-168. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134168>
- Andrade L., O'Dwyer J., O'Neill E. y Hynds P. (2018). Surface water flooding, groundwater contamination, and enteric disease in developed countries: A scoping review of connections and consequences. *Environmental Pollution* 236, 540-549. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.01.104>
- Briffa J., Sinagra E. y Blundell R. (2020). Heavy metal pollution in the environment and their toxicological effects on humans. *Heliyon* 6 (9), 1-26. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04691>
- Bundschuh J., Litter M.I., Parvez F., Román-Ross G., Nicolli H.B., Jiin-Shuh J., Chen-Wuing L., López D., Armienta M.A., Guilherme L.R.G., Gómez A., Cornejo

- L., Cumbal L. y Toujaguez R. (2012). One century of arsenic exposure in Latin America: A review of history and occurrence from 14 countries. *Science of The Total Environment* 429, 2-35. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.06.024>
- Cardona A., Carrillo-Rivera J., Herrera-Zamarrón G. y López-Álvarez B. (2010). La contaminación del agua subterránea en México. En: *Calidad del agua. Un enfoque multidisciplinario* (Aguilar A., Ed.). Instituto de Investigaciones Económicas, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México, pp. 55-77.
- CONAGUA (2020a). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Cuernavaca 1701, estado de Morelos. Gerencia de Aguas Subterráneas, Comisión Nacional del Agua, Ciudad de México, México, 26 pp.
- CONAGUA (2020b). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Zacatepec 1703, estado de Morelos. Gerencia de Aguas Subterráneas, Comisión Nacional del Agua, Ciudad de México, México, 30 pp.
- CONAGUA (2023). Calidad del agua en México. Indicadores de la calidad del agua a nivel nacional. Calidad del agua subterránea. Periodo 2012-2023 [en línea]. <https://www.gob.mx/conagua/articulos/calidad-del-agua> 26/09/2024
- CONAPO (2020). Índice de marginación por entidad federativa y por municipio 2020, Consejo Nacional de Población, Ciudad de México, México, 411 pp.
- Domínguez-Cortinas G., Cifuentes E., Rico E.E. y Díaz-Barriga M.F. (2012). Assessment of environmental health children's population living in environmental injustice scenarios. *Journal of Community Health* 2012 (37), 1199-1207. <https://doi.org/10.1007/s10900-012-9555-y>
- Downs T.J., Cifuentes-García E. y Suffet I.M. (1999). Risk screening for exposure pollution in a wastewater irrigation district of the México city region. *Environmental Health Perspectives* 107 (7), 553-561. <https://doi.org/10.1289/ehp.99107553>
- Enríques-Sánchez E. (2019). Evaluación del riesgo de contaminación del agua subterránea desde un enfoque hidrodinámico basado en un modelo numérico unidimensional. Tesis de Maestría. Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua, Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, México, 175 pp.
- Farías P., Estévez-García J.A., Onofre-Pardo E.N., Pérez-Humara M.L., Rojas-Lima E., Álamo-Hernández U. y Rocha-Amador D.O. (2021). Fluoride exposure through different drinking water sources in a contaminated basin in Guanajuato, Mexico: A deterministic human health risk assessment. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 18 (21), 1-16. <https://doi.org/10.3390/ijerph18211490>
- GBM (2002). Protección de la calidad del agua subterránea: guía para empresas de agua, autoridades municipales y agencias ambientales. Groundwater Management Advisory Team, Grupo Banco Mundial, Washington D.C., EUA, 115 pp.
- GBM (2003). Protección de la calidad del agua subterránea: definición de estrategias y establecimiento de prioridades. Groundwater Management Advisory Team, Grupo Banco Mundial. Washington D.C., EUA, 6 pp.
- Haro J.A., Nubes G. y Calderón-Ortiz J.R. (2012). Riesgos sanitarios en calidad bacteriológica del agua: una evaluación en diez estados de la República Mexicana. *Región y Sociedad* 24 (3), 257-288.
- Hatch-Kuri G. (2017). Agua subterránea en México: retos y pendientes para la transformación de su gestión. En: *El agua en México. Actores, sectores y paradigmas para una transformación social-ecológica*. (Denzin C., Taboada F. y Pacheco-Vega R., Eds.). Fundación Friedrich Ebert, Ciudad de México, México, pp. 149-170.
- Hopenhayn C. (2006). Arsenic in drinking water: Impact on human health. *Elements* 2 (2), 103-107. <https://doi.org/10.2113/gselements.2.2.103>
- Hostýnek J.J., Hinz R.S., Lorence C.R., Price M. y Guy R.H. (1993). Metals and the skin. *Critical Reviews in Toxicology* 23 (2), 171-235. <https://doi.org/10.3109/10408449309117116>
- Howard G., Bartram J., Pedley S., Schmoll O., Chorus I. y Berger P. (2006). Groundwater and public health. En: *Protecting groundwater for health: Managing the quality of drinking-water sources* (Schmoll O., Howard G., Chilton J. y Chorus I., Eds.). IWA Publishing-Organización Mundial de la Salud, Londres, Reino Unido, pp. 3-19
- Huizar-Álvarez R., Carrillo-Rivera J.J. y Juárez F. (2016). Fluoruro en el agua subterránea: niveles, origen y control natural en la región de Tenextepango, Morelos, México. *Investigaciones Geográficas* (90), 40-58. <https://doi.org/10.14350/rig.47374>
- Huizar-Álvarez R. y Carrillo-Rivera J.J. (2021). Hydrogeochemical characterization of groundwater and its interaction with other components of the environment in Mexico. En: *Intensified land and water use* (Alconada-Maglianoni M.M., Ed.). Springer, Cham, Suiza, pp. 115-140. http://doi.org/10.1007/978-3-030-65443-6_6
- INEGI (2023). Espacio y datos de México. Áreas geoestadísticas básicas. Marco geoestadístico, Instituto Nacional de Estadística y Geografía [en línea]. <https://www.inegi.org.mx/app/mapa/espaciodydatos/default.aspx> 10/10/2023

- IPCC (2007). Climate change 2007: Synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the Fourth Assessment. Intergovernmental Panel on Climate Change, World Meteorological Organization-United Nations Environment Programme, Ginebra, Suiza, 103 pp.
- Jaishankar M., Tseten T., Anbalagan N., Mathew B.B. y Beeregowda K.N. (2014). Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals. *Interdisciplinary Toxicology* 7 (2), 60-72. <https://doi.org/10.2478/intox-2014-0009>
- Khosravi K., Sartaj M., Tsai F.T.C., Singh V.P., Kazakis N., Melesse A.M., Prakash I., Bui D.T. y Pham B.T. (2018). A comparison study of DRASTIC methods with various objective methods for groundwater vulnerability assessment. *Science of The Total Environment* 642, 1032-1049. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.130>
- León-Gómez H., Cruz-Vega C.R., Dávila-Pórcel R.A., Velasco-Tapia F. y Chapa-Guerrero J.R. (2015). Impacto del lixiviado generado en el relleno sanitario municipal de Linares (Nuevo León) sobre la calidad del agua superficial y subterránea. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 32 (3), 514-526.
- Li P., Karunanidhi D., Subramani T. y Srinivasamoorthy K. (2021). Sources and consequences of groundwater contamination. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* 80, 1-10. <https://doi.org/10.1007/s00244-020-00805-z>
- Magaña-Rueda V.O. y Galicia-Sarmiento L. (2020). Diversidad climática actual y futura. En: *La biodiversidad en Morelos. Estudio de estado 2* (Cruz-Angón A., Ed.). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Ciudad de México, México, 522 pp.
- Mahlknecht J., Aguilar-Barajas I., Fariás P., Knappett P.S., Torres-Martínez J.A., Hoogesteger J. y Mora A. (2023). Hydrochemical controls on arsenic contamination and its health risks in the Comarca Lagunera region (Mexico): Implications of the scientific evidence for public health policy. *Science of The Total Environment* 857 (1), 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159347>
- Marín L.E., Bautista R.M.L., Rubio R. y Prieto E. (2001). Geochemistry of the Chiltepec sanitary landfill, Puebla, Mexico. *Geofísica Internacional* 40 (4), 301-307. <https://doi.org/10.22201/igef.00167169p.2001.40.4.413>
- Massone H.E. (2013). El concepto de riesgo de contaminación de aguas subterráneas. Un análisis de sus perspectivas y alcances. *Memorias. VIII Congreso Argentino de Hidrogeología y VI Seminario Latinoamericano sobre Temas Actuales de la Hidrología Subterránea*. La Plata, Argentina, 17-20 de septiembre [en línea]. <https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/104184> 05/04/2023
- Mendoza-Cano O., Sánchez-Piña R.A., Barrón-Quintana J., Cuevas-Arellano H.B., Escalante-Minakata P. y 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. <https://doi.org/10.21149/8413>
- Morales-Casique E., Guinzberg-Belmont J. y Ortega-Guerrero A. (2016). Regional groundwater flow and geochemical evolution in the Amacuzac River Basin, Mexico. *Hydrogeology Journal* 24 (7), 1873-1890. <https://doi.org/10.1007/s10040-016-1423-x>
- Morales-Cruz R. (2023). Exigen clausura del tiradero de Loma de Mejía en Morelos. *La Jornada* [en línea]. <https://www.jornada.com.mx/notas/2021/08/03/estados/exigen-clausura-del-tiradero-de-loma-de-mejia-en-morelos/> 01/03/2024
- Ochoa-Chi J. (2014). Los tiraderos de basura y sus impactos socioambientales en la población circunvecina. El caso del tiradero de Milpillás, Tetlama, en el estado de Morelos. Tesis de Doctorado. Facultad de Ciencias Políticas y Sociales, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México, 317 pp.
- OMS (1998). Guías para la calidad del agua potable. Vol. 3. Vigilancia y control de los abastecimientos de agua a la comunidad. Organización Mundial de la Salud, Ginebra, Suiza, 255 pp.
- OMS (2006). Guías para la calidad del agua potable. Vol. 1. Organización Mundial de la Salud, Ginebra, Suiza, 398 pp.
- Palomino-Moral P.A., Grande-Gascón M.L. y Linares-Abad M. (2014). La salud y sus determinantes sociales. Desigualdades y exclusión en la sociedad del siglo XXI. *Revista Internacional de Sociología* 72 (1), 71-91. <https://doi.org/10.3989/ris.2013.02.16>
- Parvin F. y Tareq S.M. (2021). Impact of landfill leachate contamination on surface and groundwater of Bangladesh: A systematic review and possible public health risks assessment. *Applied Water Science* 11 (100), 1-17. <https://doi.org/10.1007/s13201-021-01431-3>
- NSW (2001). Groundwater vulnerability map explanatory notes, Centre of Natural Resources. New South Wales, Department of Land and Water Conservation, Nueva Gales del Sur, Australia 14 pp.
- Pohle-Morales O.M. (2020). Evaluación general de las condiciones hidrogeológicas del sitio de disposición final Loma de Mejía. En: *La biodiversidad en Morelos. Estudio de estado 2* (Cruz-Angón A., Ed.). Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad-Gobierno del Estado de Morelos, Ciudad de México, México, 522 pp.

- QGIS (2022). Sistema de Información Geográfica QGIS. Quantum Geographic Information System. Proyecto de la Fundación Geoespacial de código abierto [en línea]. <http://qgis.org> 01/02/2023
- R-studio (2020). RStudio: Integrated development for RStudio. Public Benefit Corporation, Boston, Massachusetts, EUA [en línea]. <http://www.rstudio.com> 01/02/2023
- Sánchez-Arias M., Riojas-Rodríguez H., Catalán-Vázquez M., Terrazas-Meraz M.A., Rosas I., Espinosa-García A.C., Santos-Luna R. y Siebe C. (2019). Socio-environmental assessment of a landfill using a mixed study design: A case study from Mexico. *Waste Management* 85, 42-59. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.12.012>
- SEMARNAT (2004). Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003. Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México. *Diario Oficial de la Federación*, 20 de octubre.
- SEMARNAT (2023). Dictamen diagnóstico socioambiental de la zona de influencia del proyecto de la Minera La Esperanza S.A. de C.V. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Ciudad de México, México, 166 pp.
- Sorani-Dalbon V. y Rodríguez-Gallegos G. (2020a). Diversidad de regiones ecológicas. En: *La biodiversidad en Morelos. Estudio de estado 2* (Cruz-Angón A., Ed.). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad-Gobierno del Estado de Morelos, Ciudad de México, México, 522 pp.
- Sorani-Dalbon V. y Román L. (2020b). Diversidad de suelos. En: *La biodiversidad en Morelos. Estudio de estado 2* (Cruz-Angón A., Ed.). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad-Gobierno del Estado de Morelos, Ciudad de México, México, 522 pp.
- SSA (2022) Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021. Agua para uso y consumo humano, límites permisibles de la calidad del agua. Secretaría de Salud, México. *Diario Oficial de la Federación*, Ciudad de México, 2 de mayo.
- SSA (2024). Base de datos Cubos Dinámicos. Dirección General de Información en Salud, Secretaría de Salud, México [en línea]. http://www.dgis.salud.gob.mx/contenidos/basesdedatos/BD_Cubos_gobmx.html 01/03/2024
- Thomas K., Hardy R.D., Lazrus H., Mendez M., Orlove B., Rivera-Collazo I., Roberts J.T., Rockman M., Benjamin P., Warner P. y Winthrop R. (2019). Explaining differential vulnerability to climate change: A social science review. *Climate Change* 10 (2), 1-18. <https://doi.org/10.1002/wcc.565>
- Tóth J. (1999). Groundwater as a geologic agent: An overview of the causes, processes, and manifestations. *Hydrogeology Journal* 7, 1-14. <https://doi.org/10.1007/s100400050176>
- UNESCO (2022). Groundwater. Making the invisible visible. The United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. París, Francia, 246 pp.
- USEPA (1987). DRASTIC: A standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings. Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, Office of Research and Development, United States Environmental Protection Agency, Oklahoma, EUA, 622 pp.
- Wehncke E.V. y Mariano N.A. (2021). Groundwater and its role in maintaining the ecological functions of ecosystems. A review. En: *Intensified land and water use* (Alconada-Mariano M., Ed.). Springer Earth System Sciences, Cham, Suiza, pp. 55-86. https://doi.org/10.1007/978-3-030-65443-6_4
- Xie X., Shi J., Pi K., Deng Y., Yan B., Tong L., Yao L., Dong Y., Li J., Ma L., Zheng C. y Jiang G. (2023). Groundwater quality and public health. *Annual Review of Environment and Resources* 48, 395-418. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-112321-114701>

MATERIAL COMPLEMENTARIO

CUADRO CI. PARÁMETROS EMPLEADOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL MODELO DRASTFU DE EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD DE CONTAMINACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA.

Características en la zona de estudio	Valor original	Valor asignado	Fuente
CAPA D (valor r = 5). Se realiza una red de interpolación en el área de estudio a partir de la información de piezometría reportada por la CONAGUA. Se emplea el método de interpolación IDW en el software QGIS.	Profundidad (m)		
	≤ 7.5	10	Red piezométrica de México. CONAGUA [en línea]. https://datos.gob.mx/busca/dataset/red-piezometrica-mapas
	7.5-22.5	9	
	22.5-30	7	
	37.5-45	5	
	52.5-60	3	
	60-67.5	2	
	> 67.5	1	
CAPA R (valor r = 4). Se consideran la precipitación media anual, la pendiente del terreno y la permeabilidad de los suelos presentes en el área de estudio (NSW 2001). Se suman los puntajes de las tres capas (mínimo 4 y máximo 14) y se reclasifican de acuerdo con el puntaje obtenido: 1 (4-5 puntos), 3 (5-7 puntos), 5 (7-9 puntos), 8 (9-11 puntos) y 10 (11-14 puntos).	Precipitación (mm)		El mapa vector edafológico y el de isoyetas de precipitaciones medias anuales de la República Mexicana se obtuvieron del Geoportal de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) [en línea]. http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/
	800-1000	2	
	1000-1200	3	
	1200-1500	5	
	Pendiente (%)		
	0-2	4	
	2-10	3	
	10-33	2	
	33-99	1	
	Permeabilidad		
	Alta	5	
	Media-alta	4	
	Moderada	3	
CAPA A (valor r = 3). Se clasifican las diferentes áreas del acuífero de acuerdo con su litología, tipo de roca y nivel de compactación. Se utiliza la clasificación del Servicio Geológico Mexicano	Clave litológica SGM		Se obtuvo el mapa vector litológico de la carta E14-5 (Cuernavaca) del portal del Servicio Geológico Mexicano [en línea]. https://www.sgm.gob.mx/GeoInfoMexGobMx/#
	QpthoB-A (basalto-andesita, extrusiva)	9	
	KapceCz (caliza, sedimentaria)	6	
	Qhoal (aluvial, sedimentaria)	5	
	TpILh (lahar, extrusiva)	4	
	ToR (riolita, extrusiva)	3	
	TpaeCgp-Lm (conglomerado poligenico- limolita, sedimentario)	3	
CAPA S (valor r = 2). Se clasifica la zona de estudio de acuerdo con el mapa edafológico de la República Mexicana.	Suelo y textura (Media: M; Fina: F)		Se obtuvo el mapa vector edafológico del Geoportal de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) [en línea]. http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/
	Feozem háplico (M)	6	
	Feozem calcárico (M)	5	
	Acrisol húmico (M)	4	
	Rendzina (M)	4	
	Rendzina (F)	3	
	Feozem lúvico (M)	3	
	Feozem pélico (M)	2	
	Vertisol pélico (F)	2	
CAPA T (valor r = 1). La zona de estudio presenta gran variabilidad en su topografía. En la parte norte se encuentran varias cañadas con pendientes pronunciadas en la región geológica Glacis Buenavista. Las regiones de pendiente ligera coinciden con zonas urbanizadas y de cultivo. La clasificación del nivel de pendiente se realiza con el porcentaje de esta.	Porcentaje de pendiente (%)		Para construir el mapa de porcentaje de pendientes se emplean los mapas DEM (Modelo Digital de Elevación) de la Carta E14A59 correspondiente a la región “Cuernavaca”. Estas cartas DEM se descargan de la sección “geografía y medio ambiente” del portal de INEGI [en línea]. https://www.inegi.org.mx/temas/relieve/continental/
	0-2	10	
	2-6	9	
	6-12	5	
	12-18	3	
	> 18	1	

CUADRO CI. PARÁMETROS EMPLEADOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL MODELO DRASTFU DE EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD DE CONTAMINACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA.

Características en la zona de estudio	Valor original	Valor asignado	Fuente
CAPA T (valor $r = 1$). La zona de estudio presenta gran variabilidad en su topografía. En la parte norte se encuentran varias cañadas con pendientes pronunciadas en la región geológica Glacis Buenavista. Las regiones de pendiente ligera coinciden con zonas urbanizadas y de cultivo. La clasificación del nivel de pendiente se realiza con el porcentaje de esta.	Porcentaje de pendiente (%)		
	0-2	10	Para construir el mapa de porcentaje de pendientes se emplean los mapas DEM (Modelo Digital de Elevación) de la Carta E14A59 correspondiente a la región "Cuernavaca". Estas cartas DEM se descargan de la sección "geografía y medio ambiente" del portal de INEGI [en línea]. https://www.inegi.org.mx/temas/relieve/continental/
	2-6	9	
	6-12	5	
	12-18	3	
	> 18	1	
CAPA F. La dirección y sentido predominante de los SFAS en el área de estudio es de norte a sureste (Morales-Casique et al. 2016).	Se considera la dirección y el sentido norte-sureste como la predominante de los SFAS		Se realiza una caracterización hidrogeológica del área de estudio para confirmar la dirección y sentido de los SFAS en el área de estudio
CAPA U. La evaluación del peligro de contaminación para cada uno de estos sitios se realiza ubicando un polígono con forma de cono con nueve segmentos de 650 m perpendiculares a su altura. Cada uno de los segmentos se divide en una sección central (C) y dos secciones laterales (L). Se coloca el vértice del cono construido en cada uno de los tres sitios contaminantes. La línea de la altura del cono se hace coincidir con la dirección predominante de los sistemas de flujo de agua subterránea de la zona.	Segmento	Central-lateral	
	1	20-18	Considerando el diferente nivel de peligro de contaminación que tiene cada uno de los sitios contaminantes, se asigna un valor (r) de 1 al cono de zona de C. Jumil, 1.5 al cono de L. Mejía y de 3 al cono que se ubica en B. Tetlama. El mayor peso relativo se asigna a B. Tetlama por no presentar medios de contención para posibles lixiviados.
	2	19-17	
	3	18-16	
	4	17-15	
	5	16-14	
	6	15-13	
	7	14-12	
	8	13-11	
	9	12-10	