



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS

Centro de Investigación en Biodiversidad y Conservación

**“Interacción Agua Subterránea y Salud Humana:
vulnerabilidad de ambos sistemas en la región norponiente
del estado de Morelos, México”**

T E S I S

**PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN CIENCIAS NATURALES**

PRESENTA:

BERTÍN TRUJILLO PÉREZ

DIRECTOR:

DR. XAVIER LÓPEZ MEDELLÍN

CODIRECTORA:

DRA. ELISABET V. WEHNCKE

Cuernavaca, Morelos. Mayo, 2026

El alumno del Doctorado en Ciencias Naturales de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Bertín Trujillo Pérez, recibió una beca por parte del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología del 01 de julio de 2021 a 31 de julio de 2025.

El presente trabajo se llevó a cabo en el Centro de Investigación en Biodiversidad y Conservación (CIByC) de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos.



Citar como: Trujillo-Pérez B. (2025). Interacción Agua Subterránea y Salud Humana: vulnerabilidad de ambos sistemas en la región norponiente del estado de Morelos, México. Tesis de Doctorado. Doctorado en Ciencias Naturales, Centro de Investigación en Biodiversidad y Conservación, Universidad Autónoma del estado de Morelos, México. 181 pp.

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a todas las personas que reconocen el verdadero valor del agua, a quienes la respetan, la protegen y comprenden que sin ella la vida no podría sostenerse en nuestro planeta. También está dedicado a todas aquellas voluntades anónimas en el mundo que, día a día, realizan acciones (pequeñas o grandes) para conservar este recurso vital. A ellas, cuyo esfuerzo silencioso y constante inspira esperanza y compromiso, va dirigido este estudio como un homenaje a su conciencia y a su labor en favor de la vida misma.

De manera muy especial, dedico este trabajo a mis hijos Sarita y Daniel quienes son mi principal motivación y a quienes, junto con mi esposa Lucía, buscamos guiarlos en los valores correctos, con la esperanza de que puedan disfrutar siempre de un agua limpia y saludable, indispensable para una vida plena y digna.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a los integrantes de mi comité tutorial: Dr. Xavier López Medellín, Dra. Elisabet V. Wehncke, Dra. Valentina Carrasco Carballido, Dra. Marcela Osorio Beristain y Dr. Eric Morales Casique, quienes con sus valiosas recomendaciones, observaciones y correcciones enriquecieron de manera significativa el desarrollo de esta investigación. Su guía académica, su acompañamiento constante y el rigor científico con el que orientaron cada etapa de este trabajo fueron pilares fundamentales para la consolidación de este estudio. Un agradecimiento muy especial a la Dra. Elisabet Wehncke, por haberme recibido en su grupo de investigación. Su confianza, paciencia y apoyo marcaron un punto decisivo en mi formación académica. Extiendo mi más sincero reconocimiento al Dr. Joel Carrillo Rivera[†], quien me introdujo a los temas de hidrogeología y me mostró la importancia del enfoque basado en los sistemas de flujo del agua subterránea. Su orientación y visión contribuyeron de forma significativa a la consolidación de las bases conceptuales y metodológicas que sostienen este trabajo.

También quiero agradecer al personal académico y administrativo del CIByC y del CEIB de la UAEM, cuya colaboración, apoyo y disposición facilitaron la realización de esta investigación. Cada contribución, desde la gestión institucional hasta la asistencia técnica y académica, fue invaluable para alcanzar este logro.

ÍNDICE

Resumen General	10
INTRODUCCIÓN GENERAL	14
Contaminación del agua subterránea	16
Teoría de los Sistemas de Flujo de agua subterránea	20
Vulnerabilidad de contaminación del agua subterránea	24
Modelo de contaminación del agua subterránea	27
Pozos de abastecimiento de agua en la zona de estudio	29
JUSTIFICACIÓN	31
HIPÓTESIS	32
REFERENCIAS	34

Capítulo 1

RESUMEN	41
INTRODUCCIÓN	42
MÉTODOS	49
RESULTADOS	70
DISCUSIÓN	73
CONCLUSIONES	75
Recomendaciones para trabajos futuros	76
REFERENCIAS	77
ANEXO 1. Especificaciones sanitarias y límites permisibles del agua para uso y consumo humano	81
ANEXO 2. Principales contaminantes reportados para el agua subterránea	83
ANEXO 3. Principales tipos de contaminantes clasificados de acuerdo con el tipo de fuente o actividad que los genera en la zona de estudio	89

Capítulo 2

RESUMEN	93
INTRODUCCIÓN	95
JUSTIFICACIÓN	98
HIPÓTESIS	99
MÉTODOS	99
RESULTADOS	110
DISCUSIÓN	124
CONCLUSIONES	127
Recomendaciones para trabajos futuros	128
REFERENCIAS	129
ANEXO 1. Cuestionario: Uso y consumo de agua subterránea y salud poblacional	132
ANEXO 2. Carta de aprobación del protocolo de investigación por parte del Comité de Ética del CITPsi de la UAEM	135
ANEXO 3. Carta de consentimiento informado	138
ANEXO 4. Información obtenida con el cuestionario: Uso y consumo de agua subterránea y salud poblacional.	141
ANEXO 5. Prevalencias de causas de morbilidad y de mortalidad para los municipios de Miacatlán, Temixco y Xochitepec	148

Capítulo 3

Artículo científico: Agua subterránea y salud pública: poblaciones vulnerables a contaminación en la región norponiente del estado de Morelos, México	156
Discusión y Conclusiones generales	178

ÍNDICE DE TABLAS

Capítulo 1

Tabla 1. Valores "w" para capa de profundidad del nivel freático (Capa D)	55
Tabla 2. Valores "w" empleados y puntos asignados para la construcción de la capa R	58
Tabla 3. Valores empleados y puntos asignados para la construcción de la capa A	61
Tabla 4. Valores "w" para capa tipo de suelo. Capa S	63
Tabla 5. Valores "w" para capa de la pendiente del suelo. Capa T	65

Capítulo 2

Tabla 1. Localidades y número de habitantes dentro del sitio LM de acuerdo con el Censo Nacional INEGI 2020	103
Tabla 2. Localidades y número de habitantes dentro del sitio CJ de acuerdo con el Censo Nacional INEGI 2020	105
Tabla 3. Localidades y número de habitantes dentro del sitio BT de acuerdo con el Censo Nacional INEGI 2020	107
Tabla 4. Datos generales de las 3 poblaciones encuestadas al interior de la zona de estudio	111
Tabla 5. Medios de almacenamiento de para el agua empleados en los hogares encuestados	111

Tabla 6. Resultados de comparación de grupos con el estadístico Chi Cuadrada	117
Tabla 7. Importancia relativa de las 18 variables consideradas en la clasificación intergrupar del análisis de funciones discriminantes (FDA)	122

ÍNDICE DE FIGURAS

Introducción general

Figura 1. Efectos y manifestaciones del Sistema de Flujos de Agua Subterránea en la cuenca hídrica.	24
Figura 2. Ubicaciones de pozos de agua dentro de la zona de estudio	30

Capítulo 1

Figura 1. Diagrama de procesos realizados para generar el mapa de vulnerabilidad DRASTFU	47
Figura 2. Ubicación de la zona de estudio y de los sitios identificados con alto peligro contaminante	53
Figura 3. Capa D. Profundidad del Nivel Freático en zona de estudio clasificado en valores w de DRASTFU	56
Figura 4. Precipitaciones anuales para zona de estudio	59
Figura 5. Nivel de recarga pluvial neta (CAPA R) en la zona de estudio	60
Figura 6. CAPA A; Clasificación del área de estudio con base en características litológicas del acuífero	62
Figura 7. CAPA S; clasificación del área de estudio con base en los diferentes tipos de suelo presentes	64
Figura 8. CAPA T; Clasificación topográfica de la zona de estudio	66

de acuerdo con el porcentaje de pendiente presente	
Figura 9. Polígono de influencia de sitios con alto peligro contaminante	68
Figura 10. Ubicaciones de los polígonos de influencia para los sitios con mayor peligro contaminante en la zona de estudio	69
Figura 11. DRASTFU. Mapa de vulnerabilidad de contaminación del agua subterránea y riesgo de afectación a pozos de agua potable	72

Capítulo 2

Figura 1. Ampliación de la zona del relleno sanitario Loma de Mejía (LM)	104
Figura 2. Ampliación de la región del Cerro del Jumil (CJ)	106
Figura 3. Ampliación de la región del Milpillas Tetlama (BT)	108
Figura 4. Enfermedades y problemas de salud relacionados al consumo de agua contaminada o no potable	113
Figura 5. Prevalencia de afectaciones a la salud referidas por encuestados.	115
Figura 6. Prevalencia de afectaciones a la salud (agrupados por tipo afección) referidas por encuestados	116
Figura 7. Cuadro de correlaciones de Pearson entre variables	119
Figura 8. Resultados de correlaciones de Pearson entre variables. Afectaciones de salud encuestadas agrupadas	120
Figura 9. Gráfica en plano del análisis de funciones discriminantes (FDA).	122

RESUMEN GENERAL

Este proyecto explora la estrecha relación entre la calidad del agua subterránea y los riesgos para la salud humana en una región que enfrenta una creciente presión ambiental, conflictos por el uso del territorio y desigualdades en el acceso a servicios básicos. El agua subterránea representa la principal fuente de abastecimiento de agua potable en México y, en particular, en la región norponiente del estado de Morelos. Su disponibilidad en cantidad y calidad adecuadas es indispensable para el desarrollo biológico y socioeconómico de la población. Sin embargo, en esta zona se han identificado tres sitios con alto peligro contaminante: el relleno sanitario ubicado en Loma de Mejía (LM), el basurero clausurado en Tetlama (BT) y la zona concesionada a una empresa minera que incluye al cerro El Jumil (CJ).

Para evaluar la vulnerabilidad del agua subterránea ante la contaminación, se desarrolló el modelo DRASTFU, una adaptación y mejora del modelo clásico DRASTIC. Esta versión incorpora cinco de las variables tradicionales, además de dos elementos clave: la ubicación y actividad de los principales sitios con peligro de contaminación, así como la dirección y sentido de los sistemas de flujo de agua subterránea (SFAS). Esta mejora metodológica permitió generar un mapa de vulnerabilidad más preciso, que evidenció zonas de vulnerabilidad “alta” y “extrema” al sureste del basurero de Tetlama, así como niveles medio a alto en áreas cercanas a LM, particularmente en su zona sureste, donde se encuentra la mayor densidad poblacional.

El nivel de vulnerabilidad estimado para la región de CJ fue clasificado como “medio” a “alto”; sin embargo, es importante subrayar que esta estimación podría cambiar

significativamente si llegara a iniciarse la explotación minera en la zona, lo que aumentaría el riesgo de afectación al agua subterránea y, por lo tanto, a la salud pública en la región. En complemento al análisis hidrogeológico, se aplicó una encuesta a pobladores cercanos a los tres sitios de estudio, con el objetivo de conocer sus hábitos de uso y consumo de agua, algunos factores sociodemográficos, condiciones de salud, y nivel de acceso al servicio municipal de agua potable. Los resultados revelaron la presencia de injusticias socioeconómicas y ambientales, ya que por ejemplo, gran parte de las familias que habitan en las inmediaciones de LM y BT carecen de acceso formal al servicio de agua potable, lo que los obliga a recurrir a fuentes alternas generando mayores gastos económicos y una mayor exposición a riesgos sanitarios.

Se observaron diferencias significativas en la prevalencia de enfermedades gastrointestinales entre las comunidades cercanas a LM y BT con respecto a las de CJ, coincidiendo con la distinta accesibilidad al servicio municipal de agua potable. Aunque no se encontraron diferencias con significancia estadística en la prevalencia de enfermedades crónicas como cáncer, diabetes o hipertensión, el análisis factorial discriminante permite un reagrupamiento de los hogares encuestados con base a los factores sociodemográficos y de salud considerados en el estudio.

A diferencia de los modelos usados tradicionalmente para la evaluación de riesgos ambientales, nuestra aproximación metodológica no se especializó en algún contaminante o grupo de estos. Esto nos permitió construir el mapa de vulnerabilidad DRASTFU con la información hidrogeológica ya disponible en las diferentes bases de datos y fuentes indicadas en el documento. El considerar

únicamente a los principales sitios con peligro contaminante en la zona de estudio es conveniente para evitar el efecto de “saturación” que impida discriminar claramente entre los diferentes niveles de vulnerabilidad. Además, este abordaje nos permitió reducir los recursos necesarios para la elaboración del mapa DRASTFU lo que resulta ideal para un primer acercamiento de la problemática en la zona de estudio.

Los hallazgos obtenidos en esta investigación reflejan la urgente necesidad de adoptar un enfoque preventivo y multidisciplinario para abordar tanto la vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación como sus impactos en la salud pública. Es crucial que las políticas de gestión ambiental y sanitaria no se limiten a intervenciones acotadas por cuestiones administrativas como son los límites municipales, sino que se basen en criterios hidrogeológicos y en la dinámica real del flujo subterráneo del agua, de manera ideal a nivel de cuenca. Es muy importante considerar que una vez que el agua subterránea se contamina, las posibilidades de remediación son limitadas, costosas y no garantizan una recuperación efectiva. Por ello, esta tesis enfatiza la importancia de proteger las fuentes subterráneas antes de que sean afectadas, como parte de un ordenamiento ecológico y territorial que considere tanto los riesgos ambientales como las necesidades sociales de las comunidades involucradas.

La presente tesis doctoral se estructura de la siguiente manera: en primer lugar, se presenta una INTRODUCCIÓN GENERAL que ofrece una visión global sobre la vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea y la importancia de preservar su calidad para evitar posibles afectaciones a la salud pública.

En el **Capítulo 1** se expone el modelo DRASTIC, tradicionalmente utilizado para evaluar la vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea. A continuación, se describe la metodología empleada para desarrollar el modelo DRASTFU, el cual incorpora la dirección de los sistemas de flujo del agua subterránea y la ubicación de los principales focos contaminantes.

En el **Capítulo 2** se analizan las posibles relaciones entre el uso y consumo de agua contaminada o no potable, y la salud de las personas que habitan en las inmediaciones de tres sitios identificados como de alto peligro contaminante dentro de la zona de estudio. En este capítulo se presenta la encuesta aplicada a una muestra de pobladores en dichos sitios, así como los resultados del análisis estadístico multivariado realizado con la información obtenida.

En el **Capítulo 3** se incluye el artículo científico con los resultados obtenidos en este trabajo de investigación, el cual fue publicado en la Revista Internacional de Contaminación Ambiental.

Finalmente se presenta una DISCUSIÓN y CONCLUSIONES GENERALES de la investigación.

INTRODUCCIÓN GENERAL

El agua subterránea es vital para la subsistencia de la humanidad y un componente esencial de todos los ecosistemas. A nivel mundial, es por lo general, la primera opción como fuente de agua potable, debido a su accesibilidad permanente y a que, normalmente, tiene una calidad óptima para su consumo (Hatch-Kuri 2017). Sin embargo, su explotación o uso excesivo y su contaminación afectan negativamente, tanto a la salud humana, como a la del ambiente (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, pero, sobre todo, han aumentado los casos de pozos de abasto con sustancias que la convierten en agua no potable, como el arsénico, lo cual representa un riesgo a la salud pública (Bundschuh et al. 2012, UNESCO 2022). La contaminación del agua subterránea es un fenómeno multifactorial en el que se debe considerar la interacción entre la vulnerabilidad de un acuífero y la carga contaminante antropogénica aplicada al ambiente tanto en el pasado, como en el presente e incluso, prever su protección hacia el futuro (Wehncke y Mariano 2021). El agua subterránea contaminada es una amenaza a la salud poblacional sobre todo cuando esta agua se destina al consumo humano (Downs et al. 1999). Además, considerando que el agua subterránea se encuentra en constante movimiento, es necesario no sólo hacer una evaluación local, de su calidad y cantidad ante la

posible cercanía a algún foco contaminante, sino que además debemos considerar la dirección y sentido del sistema de flujos de agua subterránea (SFAS), así como la movilidad y características de los diversos contaminantes si los hubiere (GBM 2002). En la región norponiente del estado de Morelos, México, la interacción entre el agua subterránea y la salud humana es de particular interés debido a la presencia de zonas que pudieran tener alta vulnerabilidad a contaminación. Adicionalmente, se han identificado en la región, diferentes actividades y sitios que representan un peligro elevado de contaminación para el agua subterránea (Pohle-Morales 2020, Ochoa-Chi 2014). Considerando la dirección predominante que tienen los flujos de agua subterránea en la zona, se pudo evidenciar el peligro de contaminación en el que se encuentran los pozos de abastecimiento de agua potable de zonas con alta densidad poblacional (CONAGUA 2023, INEGI 2023).

El estudio de la vulnerabilidad de la contaminación del agua subterránea y el subsecuente riesgo de afectación a la salud de los pobladores que la consumen requiere conjuntar información de salud poblacional y ambiental, ubicar sitios con alto peligro contaminante, 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).

La vulnerabilidad en la salud (de las personas que consumen esta agua) no es un fenómeno aislado, sino el resultado de los Determinantes Sociales de la Salud (DSS), definidos por la OMS como las condiciones en que las personas nacen, crecen, se alimentan, viven, se educan, trabajan, se divierten, envejecen y mueren

y del tipo de sistemas que se utilizan para combatir la enfermedad. Estas condiciones están jerarquizadas por determinantes estructurales (fuerzas políticas y económicas) que condicionan los determinantes intermedios (exposición a riesgos, como la contaminación del agua). La mitigación de las inequidades en salud requiere por lo tanto, de una actuación intersectorial que trascienda la atención médica y aborde la distribución desigual de recursos y condiciones de vida (Urbina-Fuentes et al. 2017).

Contaminación del agua subterránea

La contaminación del agua es la introducción en ella de cualquier sustancia, cuerpo o energía hasta alcanzar concentraciones superiores a los límites máximos recomendados para determinado uso (UNESCO 1992). De acuerdo con esta definición, al referirnos a agua contaminada es necesario también, especificar el uso o actividad para la cual se destina. Debido a que uno de los objetivos del presente trabajo es la evaluación del riesgo de afectación a la salud de los pobladores que usan y consumen agua subterránea, se consideran los parámetros de agua potable indicados en la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021 (Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua) como las características que debe cumplir el agua destinada al uso y consumo de la población (agua potable) tal y como se presenta en el **Anexo 1** del capítulo 1. El agua destinada al uso y consumo de los pobladores de la región de estudio debe ser potable, definiendo esto como, aquella destinada para uso y consumo humano la cual, no ocasiona ningún riesgo significativo para la salud (aun siendo consumida

durante toda la vida) y no presenta contaminantes en concentraciones superiores de los límites indicados en la NOM-127-SSA1-2021, es incolora, inodora, de sabor agradable y no proviene de aguas residuales tratadas (SSA 2022).

El análisis del peligro de contaminación del agua subterránea debe considerar la interacción entre la vulnerabilidad de un acuífero con el tipo y cantidad de contaminantes presentes, pudiendo ser estos de origen antropógeno o geológico (Huizar-Álvarez y Carrillo-Rivera 2021). Entre los contaminantes de origen geológico encontramos aniones y cationes provenientes de la disolución del mismo entorno rocoso por el que atraviesa el agua. De manera natural, los iones más comúnmente encontrados en el agua subterránea son: calcio (Ca^{2+}), sodio (Na^+), magnesio (Mg^{2+}) sulfatos (SO_4^{2-}), potasio (K^+), cloruros (Cl^-) y bicarbonato (HCO_3^-). Estos iones representan normalmente el 99% del total de sales o solutos disueltos (TDS) en el agua subterránea (Jordana y Batista 2004, GBM 2003). Las concentraciones en las que estas sales se encuentran disueltas en una muestra de agua, junto a las del silicio (Si) y otros elementos traza, ayudan en la identificación y clasificación de dicha muestra. Es decir, el agua analizada de cada pozo o manantial tiene características fisicoquímicas particulares que además perduran con el paso del tiempo ya que estas dependen, principalmente, del recorrido que realiza por el subsuelo, el cual no es azaroso sino que, una vez que el agua alcanza el nivel freático, viaja a través de sistemas de flujo definidos. Los contaminantes de origen geológico usualmente tienen un origen natural, sin embargo, es posible que, diferentes actividades humanas eleven el riesgo de que se presenten concentraciones elevadas de ciertos contaminantes (Li et al. 2021). Por ejemplo, se

ha observado aumento de concentraciones de arsénico y fluoruros en zonas donde se han perforados pozos profundos para la extracción de altos volúmenes de agua, así como en zonas en donde se han removido grandes cantidades del subsuelo por actividades mineras (Andrade et al. 2018, Knappett et al. 2022, Shams et al. 2022).

Además de clasificarse por su origen en antropógenos o de origen natural, los contaminantes del agua subterránea pueden clasificarse por su tipo en: químicos, microbiológicos o radioactivos. Entre los principales contaminantes químicos encontramos metales y metaloides como arsénico (As), zinc (Zn), cromo (Cr), mercurio (Hg), cadmio (Cd), plomo (Pb) y selenio (Se). Otros contaminantes frecuentes son cloruros, fluoruros y moléculas con nitrógeno como nitritos, nitratos y amonio (Li et al. 2021, Xie et al. 2023). Como resultados de las actividades productivas y del estilo de vida de poblaciones humanas se han detectado también, principalmente en muestras de agua de áreas urbanizadas, gran cantidad de diferentes contaminantes orgánicos como hidrocarburos, compuestos halogenados, microplásticos, plaguicidas, fármacos y productos de higiene personal (Foster et al. 2013, Li et al. 2021).

La contaminación microbiológica del agua ocurre por la presencia de bacterias, virus y/o protozoarios. Las algas se encuentran raramente en el agua subterránea debido a que estas requieren de la luz solar para realizar la fotosíntesis (OMS 1998, Jordana y Batista 2004). Debido a la presencia de una zona vadosa, (que es la capa de material rocoso ubicada entre la superficie del suelo y el nivel freático), la cual funciona como filtro y que además demora el viaje del agua que infiltra hacia el nivel freático, es poco probable la presencia de bacterias y protozoarios en el agua recién

obtenida de pozos y manantiales (Appelo y Postma 2004). El riesgo de contaminación microbiológica se eleva durante el viaje del agua desde los pozos de extracción hasta los hogares abastecidos o bien en la entrada del mismo pozo si existen fuentes contaminantes cercanas y además si este no cuenta con protecciones para evitar infiltraciones (Andrade et al. 2018, Parvin y Tareq 2021). Finalmente, la contaminación radioactiva del agua subterránea se puede originar por elementos radioactivos en el mismo medio geológico o bien, ser antropógena por materiales radioactivos (médicos, militares o industriales) desechados o confinados incorrectamente. Este tipo de contaminación se presenta raramente en niveles que afecten la salud poblacional (Li et al. 2021).

Respecto al servicio de abastecimiento público, en la zona de estudio, el agua se extrae de los pozos autorizados por la Comisión Nacional del Agua, CONAGUA (Hatch-Kuri 2017). Una vez extraída, el agua es potabilizada mediante la adición de soluciones cloradas con la finalidad de disminuir el peligro de contaminación microbiológica. Este proceso ha demostrado su efectividad al reducir la tasa de enfermedades gastrointestinales en la población mexicana (Haro et al. 2012). Sin embargo, este peligro no puede descartarse debido a que, el agua que llega a cada hogar puede contaminarse en el trayecto, o incluso durante el almacenamiento dentro del hogar. Además, se mantiene el riesgo de contaminación por sustancias químicas (de origen natural o antropógeno) como plaguicidas, compuestos orgánicos o metales pesados que pueden afectar la salud de las personas (GBM 2002). Para estos contaminantes, no existe actualmente, en la zona de estudio, algún proceso (paliativo o correctivo) que disminuya el peligro contaminante al agua

de consumo doméstico. Por esta razón, la evaluación del riesgo de contaminación al agua debe considerar, además de los peligros microbiológicos, a los diferentes contaminantes químicos (Alarcón-Herrera 2020, Downs et al. 1999, Li et al. 2021, OMS 1998)

En el **Anexo 2** del capítulo 1 se presenta una selección de contaminantes del agua subterránea. Se menciona también su origen más frecuente, así como las posibles afectaciones a la salud humana ante una exposición aguda o crónica.

Teoría de los Sistemas de Flujo de agua subterránea

El agua subterránea no se encuentra estática o confinada en el subsuelo, sino que permanece en movimiento tanto de manera vertical como horizontal lo cual tiene implicaciones importantes en lo que respecta al transporte y diseminación de contaminantes (Tóth 1962). La teoría de los Sistemas de Flujo del Agua Subterránea (SFAS) fue desarrollada por Józef Tóth y A. Freeze en la década de 1960. La parte hidrogeológica de la presente investigación se fundamenta conceptualmente en esta teoría (Tóth 1962, Freeze y Whitherspoon 1966, Tóth 1972).

La teoría de los SFAS establece que el agua subterránea se encuentra en movimiento entre los sitios en los que infiltra (zonas de recarga) y los sitios en los que aflora nuevamente (zonas de descarga) después de su recorrido en el subsuelo (zona de tránsito). El agua viaja a través del medio geológico por “camino” o flujos definidos los cuales pueden diferir en la profundidad y la longitud total que logran

alcanzar de manera horizontal dando origen a los flujos locales, intermedios y regionales (Tóth 1962). La dirección y sentido que toman los flujos de agua subterránea ocurren en función, principalmente, de los potenciales gravitacional y de presión, fluyendo siempre desde sitios con mayor hacia sitios con menor energía potencial (Weyer 1978). La distancia recorrida en el plano horizontal por los flujos subterráneos puede ser desde unos cientos metros hasta cientos de kilómetros. En el plano vertical, se estima que los flujos regionales pueden alcanzar una profundidad de hasta 20 kilómetros, siendo limitada por el basamento geológico que constituye una barrera impermeable (Tóth 2009). La profundidad alcanzada por los SFAS está influenciada principalmente por la estructura y composición geológica y el relieve del terreno. Es importante mencionar que la ubicación, dimensiones y distribución de los diferentes tipos de flujos, así como las zonas de recarga, tránsito y descarga son específicos para cada uno de los sitios estudiados. La clasificación y designación de los componentes del SFAS sólo es posible después de comparar las características fisicoquímicas de diferentes muestras de agua junto al análisis de la ubicación de todos los componentes de la cuenca hidrogeológica a la cual pertenecen, así como de los acuíferos por los cuales fluye (Kachadourian 2023). A continuación, se describen los principales componentes de los SFAS:

Zonas de recarga: son las regiones en las cuales el nivel freático se encuentra a mayor profundidad y no es común encontrar cuerpos de agua perennes en superficie, es decir, el agua infiltra fácilmente en el suelo. A nivel de cuenca, las encontramos, generalmente, en las regiones de mayor altitud.

Zonas de descarga: son las regiones en las que emerge o aflora el agua subterránea en forma de manantiales o humedales. Considerando la cuenca hidrogeológica, se encuentran en los sitios de menor altitud como son los valles y los fondos de las cañadas. En estas zonas encontramos un nivel freático más somero lo cual origina o crea las condiciones necesarias para que existan humedales, manantiales, zonas que se inundan con facilidad y cuerpos de agua perennes en superficie.

Zonas de tránsito: se ubican entre los sitios de recarga y los de descarga. El nivel freático se encuentra a una profundidad intermedia respecto a las zonas de recarga y de descarga.

Sistema de flujos regionales: son aquellos flujos que, dentro de la cuenca hidrológica, penetran a mayor profundidad y recorren la mayor distancia en el plano horizontal. Su longitud es desde decenas hasta cientos de kilómetros por lo que, el agua que viaja por ellos tiene un tiempo de residencia de hasta miles de años. De manera general y comparando con los otros tipos de flujos, el agua de los flujos regionales presenta la mayor cantidad de sales disueltas, mayor contenido de litio, menor contenido de oxígeno disuelto, pH más alcalino y mayor temperatura.

Sistema de flujos locales: son los más próximos a la superficie y aquellos con los recorridos más cortos entre sus zonas de recarga y descarga. Sus trayectos están altamente condicionados por la topografía local de la superficie. La temperatura del agua que contienen (en su descarga) es igual o menor a la del agua en superficie, presentan concentraciones bajas de sales y minerales, alto contenido de oxígeno disuelto y un pH más ácido; son muy semejantes fisicoquímicamente al agua de lluvia. El tiempo de residencia en el subsuelo es el menor de los tres tipos de flujos,

el cual va desde unos días hasta algunos años. El agua de los flujos locales es la más vulnerable a contaminarse por las sustancias vertidas en la superficie del suelo ya que el nivel freático se encuentra a menor profundidad.

Debido a la escala geográfica a la cual se realiza esta investigación, y con base en los datos consultados de las características de las muestras de agua de los pozos de abastecimiento así como la ubicación de la zona de estudio con respecto a la cuenca hidrológica, consideramos que, el agua con que se abastece a los pobladores de los sitios estudiados pertenece a flujos locales.

Sistema de flujos intermedios: el agua de estos flujos presenta características fisicoquímicas intermedias con respecto a los flujos locales y regionales.

En la **Figura 1** se presentan, de manera esquematizada, las zonas y tipos de flujos considerados en la teoría de los SFAS.

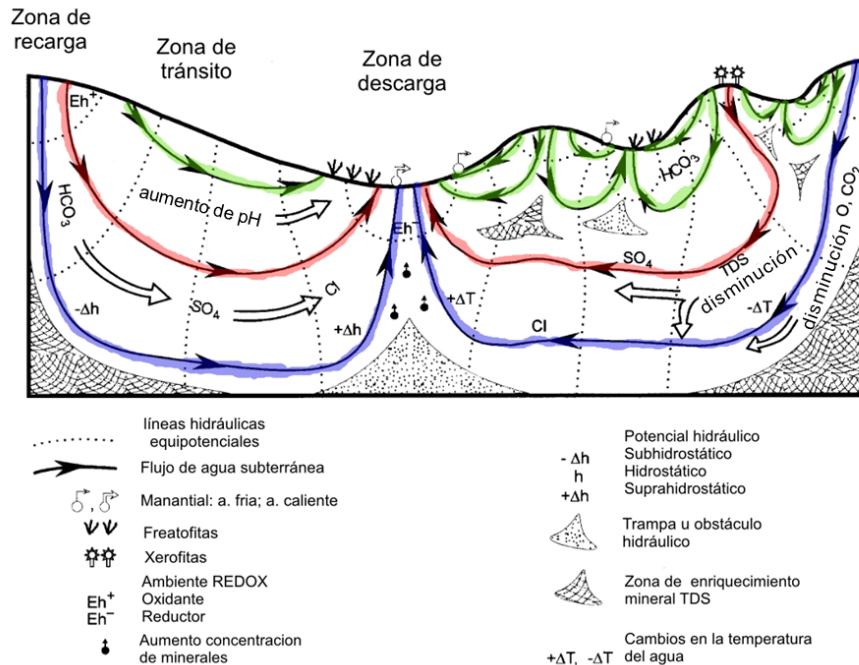


Figura 1. Efectos y manifestaciones del Sistema de Flujos de Agua Subterránea en la cuenca hídrica. Se presentan los sistemas de flujo locales (verde) intermedios (rojo) y regionales (morado). Modificado de Tóth 1999.

Vulnerabilidad de contaminación del agua subterránea

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 (Thomas et al. 2018). 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 al acuífero. Debido a las combinaciones de estas dos variables, es posible tener, por ejemplo, un sitio con alta vulnerabilidad de contaminación del agua subterránea, pero sin riesgo de contaminación debido a la ausencia de una carga contaminante o, el caso opuesto (Foster et al. 2013). Debido a su ubicación, el agua subterránea presenta siempre, cierto grado o nivel de 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 pueden clasificarse por su origen o por sus características fisicoquímicas (GBM 2003, Foster et al. 2013).

La vulnerabilidad sólo puede entenderse y dimensionarse cuando se especifica el peligro o efecto negativo, así como el riesgo o probabilidad de que se presente dicho peligro. También es fundamental definir cuál es el grupo, sistema o individuo vulnerable, ya que, por ejemplo, la vulnerabilidad de una comunidad ante un fenómeno natural no siempre representa un desastre. Consideremos, a manera de ejemplo, la vulnerabilidad de contaminación del agua que abastece a los pobladores de una comunidad cercana a campos de cultivo donde se emplean frecuentemente fertilizantes y plaguicidas. La probabilidad o riesgo, de que los fertilizantes y los plaguicidas, usados en las prácticas agrícolas, alcancen el nivel

freático depende de varios factores. Entre los factores más importantes se encuentran las características del suelo como son su grado de compactación, su composición y el espesor del subsuelo entre la superficie (donde se aplican los fertilizantes y plaguicidas) y el nivel freático (Appelo y Postma 2004). Otras variables a considerar son las características fisicoquímicas de las sustancias usadas, la cantidad aplicada de estas y el tipo de aplicación realizada (puntual o difusa) así como la frecuencia de aplicación. Debemos considerar también factores ambientales como la cantidad de agua de lluvia o frecuencia de riego, así como la orografía del lugar. Adicionalmente debe evaluarse la ubicación de los pozos o manantiales que abastecen de agua a los pobladores y finalmente, saber si esta agua es empleada para higiene personal, así como para cocinar y/o beber. Debemos considerar que, a la par de los riesgos, contamos con características o actividades protectoras que los disminuyen o evitan. En este mismo ejemplo podrían ser: el uso de fertilizantes y/o plaguicidas de fácil y rápida degradación y que, además, no incluyan en sus formulaciones sustancias o elementos químicos que puedan afectar la salud de los pobladores. Es posible también, ubicar los pozos de extracción de agua en sitios con bajo riesgo con respecto a su posición a los focos contaminantes y a los SFAS de la zona. Mientras que, por el lado sociocultural se puede dar capacitación a los pobladores sobre buenas prácticas de aplicación, almacenamiento y manejo de agroquímicos. La conjunción de las características positivas (que disminuyen la vulnerabilidad) con las negativas (que aumentan la vulnerabilidad) da como resultado el nivel o grado de vulnerabilidad final de la comunidad. La vulnerabilidad dependerá, por lo tanto, de diversos factores entre los que destacan los ambientales, características fisicoquímicas de los

contaminantes, así como de las características y recursos con que cuente el ente vulnerable (Appelo y Postma 2004).

Debido a la variedad de sitios y actividades en la superficie del suelo que generan miles de sustancias potencialmente contaminantes para el agua subterránea, resulta extremadamente complejo el realizar estudios de vulnerabilidad de contaminación específicos para cada contaminante o grupo de estos. El abordaje que realizamos en este trabajo, respecto a la vulnerabilidad de contaminación es inespecífico ya que no se enfoca en algún contaminante ni grupo de estos, sino que se realiza un inventario de fuentes contaminantes en el sitio de trabajo y se ubican y seleccionan aquellos sitios y/o actividades que, por la cantidad de contaminantes que actualmente tienen o pueden llegar a generar o almacenar, representan los mayores peligros de afectación a la calidad del agua subterránea en la zona de estudio.

Modelo de contaminación del agua subterránea

El modelo general de vulnerabilidad de contaminación del agua subterránea empleado en este trabajo supone que, ante la liberación, aplicación o vertido de alguna sustancia en la superficie del suelo, los contaminantes infiltran al subsuelo con un movimiento vertical, atravesando la capa más superficial y la zona vadosa (o insaturada) del subsuelo hasta alcanzar finalmente el acuífero o zona saturada. En el recorrido entre la superficie del suelo y el nivel freático se pueden presentar varios procesos de atenuación, que disminuyen la concentración o peligro de los contaminantes. Dichos procesos pueden ser: dilución, dispersión, filtración mecánica, volatilización, metabolización y descomposición biológica, precipitación,

sorción, intercambio iónico, procesos químicos de oxidación, reducción y neutralización (Pye y Kelley 1984, Kachadourian 2023). El grado de atenuación de un contaminante está en función de tres factores: i) el tiempo en que este permanece en el subsuelo (a través del cual viaja); ii) el tamaño del grano y las características fisicoquímicas del medio geológico y iii) la distancia que recorre el contaminante entre la superficie del suelo y el nivel freático. De manera general, hay un alto grado de atenuación de contaminantes cuando estos recorren distancias mayores y demoran mayor tiempo en este recorrido. Así mismo, una carga contaminante grande o que se encuentra diseminada en una superficie grande, tendrá un mayor riesgo de contaminar el agua subterránea en comparación a una carga contaminante pequeña que se aplica en una superficie limitada (Appelo y Postma 2004, Foster et al. 2013, GBM 2002).

Debido a que el agua subterránea se encuentra en movimiento, los contaminantes que alcancen el nivel freático serán diseminados en la dirección y sentido que presenten los flujos de la zona. Por esta razón, el agua que sea extraída de pozos que se encuentren en las inmediaciones de sitios contaminantes, tendrá alto riesgo de presentar agua con los elementos o sustancias diseminados por los flujos subterráneos. Dado que, el proceso total desde la infiltración de los contaminantes hasta la presencia de estos en el agua extraída de los pozos puede demorar un periodo grande, en especial si se tiene una zona insaturada de gran espesor y si, la conductividad hidráulica o velocidad del movimiento del agua es baja (Morales-Casique et al. 2016, Tóth 2009), se decidió que nuestra investigación se limitaría a un radio no mayor de 4 kilómetros de los sitios con alto riesgo contaminante.

Pozos de abastecimiento de agua en la zona de estudio

De acuerdo con el modelo de contaminación del agua subterránea expuesto, la ubicación de los pozos de abastecimiento de agua para la población es muy importante ya que el riesgo de que su agua se contamine está relacionado a su posición con respecto a los focos contaminantes y a la dirección y sentido de los flujos de agua subterránea. Las ubicaciones de los pozos que se encuentran dentro de la zona de estudio se obtuvieron del sitio de internet: localizador REPDA de agua nacionales, zonas federales y descargas de agua residuales de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA 2024) en una consulta realizada en junio del año 2024. Se localizan 64 pozos al interior de la zona de estudio los cuales pueden tener función de: abastecimiento público, agricultura, acuacultura, pecuario o pozo de servicios (**Figura 2**).

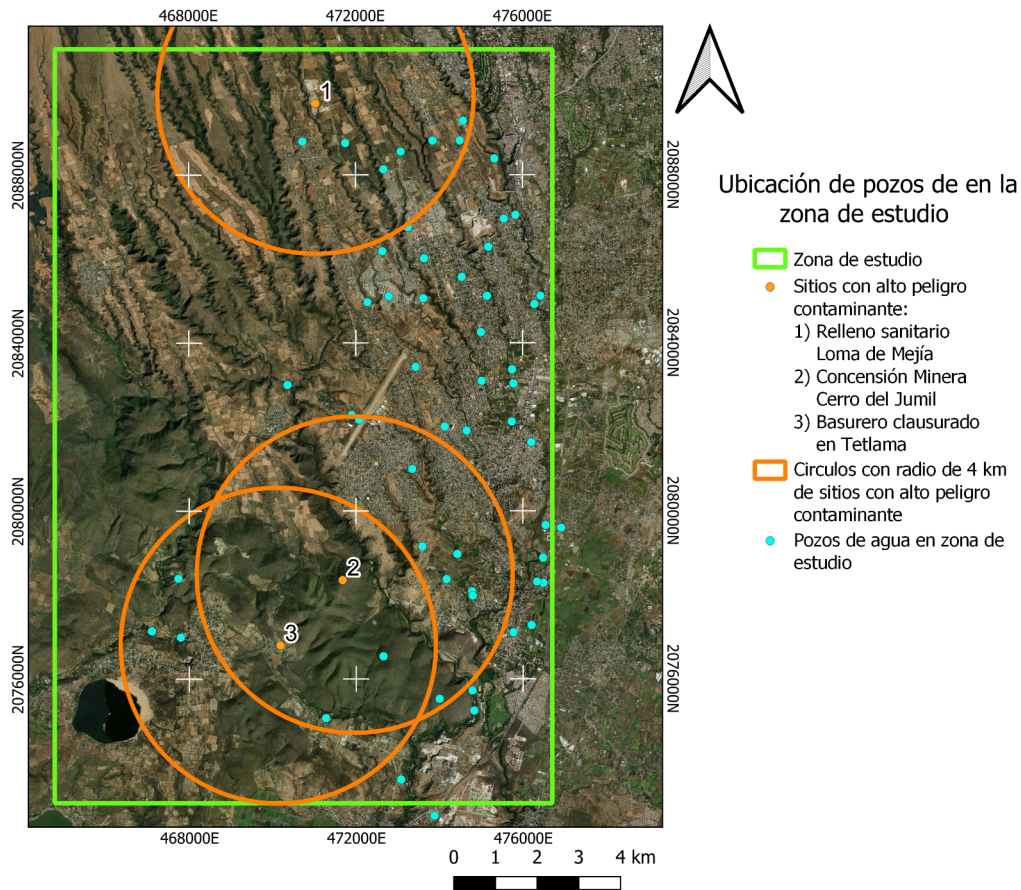


Figura 2. Ubicaciones de pozos de agua dentro de la zona de estudio. Imagen de autoría propia con información de CONAGUA (2024).

Con base en el marco conceptual expuesto, y los antecedentes consultados para la zona de estudio, el presente trabajo de investigación tiene como objetivo general hacer una evaluación integral de la vulnerabilidad de contaminación del agua subterránea y el riesgo de afectación a la salud de los pobladores que la usan y consumen en el polígono delimitado dentro de la región norponiente del estado de Morelos.

Justificación de la investigación

El agua es un elemento indispensable para la salud, el desarrollo social, económico y cultural de todas las personas (OMS 2006). Para la mayor parte de la población que habita en la región norponiente del estado de Morelos, la principal forma de abastecimiento de agua es a través de la red del sistema municipal de agua potable, el cual extrae la misma directamente del acuífero a través de los pozos distribuidos en la zona (INEGI 2023). Como resultado de la conjunción de las características hidrogeológicas de la zona con las actividades realizadas en su superficie, existe la vulnerabilidad de contaminación del agua subterránea (GBM 2002). Lo anterior puede elevar el riesgo de afectación a la salud de los pobladores que usan y beben esta agua (Massone 2013). Este trabajo busca evaluar la vulnerabilidad a contaminación del agua subterránea y el subsecuente riesgo de afectación a la salud de las personas que la usan y consumen. El estudio pretende 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 contaminante (Wehncke y Mariano 2021). En las dimensiones social y de salud se realiza un estudio multidimensional con alcance exploratorio.

HIPÓTESIS

El mapa de vulnerabilidad de contaminación del agua subterránea en la zona de estudio generado (DRASTFU), será efectivo para identificar los diferentes niveles de vulnerabilidad. Las áreas con la mayor vulnerabilidad de contaminación del agua subterránea serán las más próximas a los sitios con alto peligro contaminante, en especial, aquellas regiones que coincidan con la dirección y sentido que tienen los flujos de agua subterránea.

Las poblaciones cercanas a los sitios identificados con alto peligro contaminante, en especial aquellas en las que sus pozos de abastecimiento se encuentren en la dirección y sentido del movimiento de los flujos de agua subterránea presentarán valores mayores de prevalencias de enfermedades y afectaciones de salud por el uso y consumo de agua contaminada o no potable.

Ante esta problemática expuesta, se buscó desarrollar y aplicar un método que nos permitiera evaluar la vulnerabilidad de contaminación del agua subterránea en la zona de estudio. Para lograr este objetivo, nos basamos en el método DRASTIC el cual ha sido ampliamente utilizado con este fin. Se realizaron los ajustes necesarios para tomar en cuenta dos factores que consideramos relevantes en este fenómeno: i) la dirección y sentido predominante de los SFAS en la zona de estudio y ii) la ubicación y peligro de los sitios con mayor peligro contaminante para el agua subterránea

Las preguntas de investigación que nos planteamos fueron:

1. ¿Cuál es el grado de vulnerabilidad de contaminación del agua subterránea en la región norponiente del estado de Morelos, considerando los principales sitios y/o actividades contaminantes de la zona?
2. Considerando los flujos del agua subterránea, así como los sitios con alto peligro contaminante, ¿cuáles son las zonas y poblaciones humanas con mayor riesgo de afectación a la contaminación del agua subterránea en la región de estudio?
3. ¿Existen diferencias en las prevalencias de afectaciones a la salud y enfermedades relacionadas con el uso y consumo de agua contaminada o no potable en las personas que habitan en las cercanías de los sitios con alto peligro contaminante?

REFERENCIAS

Alarcón-Herrera M. T., Martin-Alarcon 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, 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>

Appelo C. A. J. y Postma D. (2004). *Geochemistry, groundwater and pollution*. Segunda ed. CRC press. 634 pp.

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>

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

CONAGUA (2024). Localizador REPDA de aguas nacionales. Aprovechamiento de aguas subterráneas. Comisión Nacional del Agua (en línea). <https://sigagis.conagua.gob.mx/locrepda20/>

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>

Foster S., Hirata R. y Andreo B. (2013). The aquifer pollution vulnerability concept: aid or impediment in promoting groundwater protection?. *Hydrogeology Journal* 21(7), 1389.

Freeze R., y Witherspoon P. (1966). Theoretical analysis of regional groundwater flow: 1. Analytical and numerical solutions to the mathematical model. *Water Resources Research*, 641-656.

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.

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.

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(SPE3), 257-288.

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. 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*, M. M. Alconada-Magliano (ed), Springer Nature Switzerland. 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/espacioydatos/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.

Jordana S. y Batista, E. (2004). Natural groundwater quality and health. *Geologica Acta: an international earth science journal*, 2(2), 175-188.

Kachadourian M. (2023). Contexto hidrogeológico regional preliminar de la Zona Metropolitana de Guadalajara, Jalisco, México. Defensa de Tesis (Doctoral dissertation, UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO).

Knappett P. S. K., Farias P., Miller G. R., Hoogesteger J., Li Y., Mendoza-Sanchez, I., Woodward R. T., Hernández H., Loza-Aguirre I., Datta S. Huang Y., Carrillo G., Toh T. y Terrell, D. (2022). A systems approach to remediating human exposure to arsenic and fluoride from overexploited aquifers. *GeoHealth*, 6 (7), e2022GH000592.

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.

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.

Ochoa-Chi J. (2014). Los tiraderos de basura y sus impactos socioambientales en la población circunvecina. El caso del tiradero de Milpillás, Tetlám, 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. Ginebra, Suiza

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>

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.

Pye V. I. y Kelley J. (1984). The extent of groundwater contamination in the United States. *Groundwater contamination*, 179(1), 23-33.

Shams M., Tavakkoli Nezhad N., Dehghan A., Alidadi H., Paydar M., Mohammadi, A. A. y Zarei A. (2022). Heavy metals exposure, carcinogenic and non-carcinogenic human health risks assessment of groundwater around mines in Joghatai, Iran. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 102(8), 1884-1899.

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.

Thomas K., Hardy R. D., Lazrus H., Mendez M., Orlove B., Rivera-Collazo I., ... y Winthrop R. (2019). Explaining differential vulnerability to climate change: A social science review. *Wiley interdisciplinary reviews: Climate change*, 10(2), e565.

Tóth J. (1962). A Theory of Groundwater Motion in Small Drainage Basins. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 4375- 4383.

Tóth J. (1972). Properties and manifestations of regional groundwater movement . *Proc 24th International Geological Congress*, (págs. 153-163). Montreal.

Tóth J. (1999). Groundwater as a geologic agent: An overview of the causes, processes, and manifestations. *Hydrogeology journal*, 7(1), 1-14.

Tóth J. (2009). GRAVITATIONAL SYSTEMS OF GROUNDWATER FLOW Theory, Evaluation, Utilization. University of Alberta, Canada; Eotvos Loránd University, Hungary: Cambridge University Press.

UNESCO (1992). International Glossary of Hydrology (Second revised ed.). UNESCO, Paris, France, 413 pp.

UNESCO (2022). Groundwater. Making the invisible visible. The United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. París, Francia, 246 pp.

Urbina-Fuentes, M., Jasso-Gutiérrez, L., Schiavon-Ermani, R., Lozano, R., & Finkelman, J. (2017). La transición de los Objetivos de Desarrollo del Milenio a los Objetivos de Desarrollo Sostenible desde la perspectiva de los determinantes sociales de la salud y la equidad en salud. Gac Med Mex, 153(6), 697-730.

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

Weyer K. U. (1978). Hydraulic forces in permeable media. Orleans, France: Mémoires du B.R.G.M.

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>

Capítulo 1

DRASTFU, un método efectivo para la evaluación de la vulnerabilidad de contaminación del agua subterránea

RESUMEN

El capítulo presenta el modelo DRASTFU como una propuesta metodológica efectiva para la evaluación de la vulnerabilidad de contaminación del agua subterránea en la región de estudio. Basado en el modelo DRASTIC, DRASTFU agrega dos factores clave: la dirección y sentido de los flujos de agua subterránea y la ubicación de los principales sitios con alto peligro contaminante en la zona (relleno sanitario de Loma de Mejía, proyecto minero en el cerro del Jumil y basurero clausurado de Tetlama). Esta integración permite construir mapas de vulnerabilidad más realistas, ya que reflejan no solo las características hidrogeológicas, sino también la dinámica de transporte de contaminantes y su relación espacial con fuentes potenciales de riesgo.

El mapa DRASTFU identifica zonas de vulnerabilidad baja, media, alta y extrema, con especial atención en áreas donde coinciden pozos de abastecimiento y focos contaminantes. Su construcción con el programa QGIS, utilizando información hidrogeológica disponible, ofrece ventajas como bajo costo, reproducibilidad y aplicabilidad en escalas locales y regionales. Entre sus aportes se destacan la

posibilidad de orientar el ordenamiento urbano, priorizar áreas críticas de protección para mantener la calidad y cantidad del agua subterránea así como definir sitios estratégicos para el monitoreo y remediación.

Este modelo supone un aporte interesante comparado con métodos tradicionales al ofrecer una herramienta práctica y preventiva para la gestión del agua subterránea. Su importancia radica en que permite anticipar escenarios de riesgo, focalizar recursos y proteger tanto la calidad del agua como la salud de las poblaciones que dependen de ella, en el presente y a futuro.

INTRODUCCIÓN

Para definir cuáles son las acciones necesarias en la protección de calidad del agua subterránea se debe antes evaluar la vulnerabilidad de contaminación de esta. Los mapas de vulnerabilidad de contaminación han sido ampliamente usados ya que nos permiten integrar en una misma imagen los diferentes niveles de vulnerabilidad de una región o zona. El método DRASTIC, desarrollado por Aller y colaboradores para la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos es uno de los métodos más empleados para evaluación de esta vulnerabilidad (USEPA 1987). El acrónimo DRASTIC hace referencia a cada uno de los factores evaluados, los cuales son: D (Depth) profundidad del nivel freático; R (Recharge) recarga neta de agua; A (Aquifer) tipo de acuífero; S (Soil) tipo y características de suelo; T (Topography) topografía, desnivel o pendiente; I (Impact) impacto de la zona vadosa o insaturada y C (Conductivity) conductividad hidráulica en el acuífero. Los

resultados de DRASTIC se presentan en un mapa, lo cual facilita la identificación de zonas con alta vulnerabilidad a contaminación. Este método hace una evaluación que es específica para cada sitio evaluado y no puede extrapolarse a otras zonas.

Se le asigna un valor relativo (r) a cada factor del modelo DRASTIC de entre 1 y 5, en donde los factores más significativos tienen un valor de 5 y los menos significativos de 1. También se le asigna un peso o valor específico (w) que puede ser de entre 1 y 10 de acuerdo con el valor que presenta dicho factor de DRASTIC en la zona evaluada. De igual forma que para “r”, los valores mayores de “w” aportan un mayor grado de vulnerabilidad (NSW 2001).

Para evaluar la vulnerabilidad de una región, se emplea un modelo aditivo ponderado en el cual la vulnerabilidad de contaminación es el resultado de la sumatoria de los valores de cada uno de los 7 factores considerados. La ecuación para determinar el índice DRASTIC es:

$$\text{Valor de vulnerabilidad DRASTIC} = D(r)*D(w) + R(r)*R(w) + A(r)*A(w) + \\ S(r)*S(w) + T(r)*T(w) + I(r)*I(w) + C(r)*C(w)$$

Donde el valor de vulnerabilidad DRASTIC es la sumatoria total de los productos obtenidos de la multiplicación del valor “r” por el valor “w” para cada uno de los 7 factores del modelo. Una vez que se han integrado todos los factores del método DRASTIC, se puede identificar las áreas con mayor susceptibilidad a contaminación del agua subterránea, las cuales corresponden a los sitios del mapa con los mayores puntajes.

Nuevo modelo de evaluación de vulnerabilidad de contaminación del agua subterránea, DRASTFU

Para evaluar el impacto de la dimensión hidrogeológica se construyó un mapa de vulnerabilidad de contaminación del agua subterránea (DRASTFU). Para lograr una evaluación integral, se emplearon cinco de los siete indicadores del modelo DRASTIC más 2 nuevos factores: i) la dirección y sentido predominantes de los flujos de agua subterránea en la zona y ii) la ubicación y valor relativo de los sitios con mayor peligro contaminante en la zona de estudio.

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 (zona del subsuelo en la que la roca se encuentra saturada de agua que puede extraerse a través de pozos). Se presenta mayor vulnerabilidad cuando el nivel freático se encuentra a menor profundidad
- Recarga neta de agua (R). Cantidad de agua que infiltra el suelo y puede alcanzar el nivel freático, misma que puede disolver o acarrear los diversos contaminantes. Por lo tanto, una mayor recarga neta representa mayor vulnerabilidad.
- Características del acuífero (A). Se toma en cuenta el tipo de roca y grado de compactación que presenta la formación geológica predominante del área de estudio. Materiales con granos grandes y poco compactados como arenas y gravas, tienen alta permeabilidad y por lo tanto alta vulnerabilidad. Zonas con

arcillas o limo, 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 a contaminación.
- Pendiente del terreno (T). Con este parámetro se consideran las variaciones de la pendiente en el terreno. Pendientes pronunciadas generan alto nivel de escurrimientos, disminuyendo la infiltración. Se considera mayor vulnerabilidad de contaminación en sitios planos o con poca pendiente que al mismo tiempo presenten alta precipitación y posean un suelo poroso.
- Dirección y sentido de los flujos predominantes de agua subterránea (F). Con fundamento en la teoría de los Sistemas de Flujo de Agua Subterránea, SFAS (Tóth 1999), se considera que el agua, una vez que infiltra en el subsuelo, viaja de manera vertical hasta alcanzar el nivel freático. Al alcanzar dicho nivel, el agua que 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.
- Efecto de sitios con alto peligro contaminante al agua subterránea (U). Se identifican 3 sitios con alto peligro contaminante: i) relleno sanitario ubicado en Loma de Mejía (LM), ii) zona minera que incluye al cerro del Jumil (CJ) y iii) basurero clausurado cercano a comunidad de Milpillas Tetlama (BT). De acuerdo con las características actuales observadas en los tres sitios

respecto a su peligro contaminante, se les da el siguiente valor relativo: 1 para CJ, 1.5 para LM y 3 para BT.

El mapa DRASTFU obtenido es el resultado de la sumatoria de los puntajes en cada ubicación. Los sitios en los cuales el agua subterránea tiene mayor vulnerabilidad a contaminación son los que obtienen un puntaje más alto. La fórmula general para la obtención de la puntuación de vulnerabilidad en DRASTFU es la siguiente:

$$\text{Índice DRASTFU} = D(r)*D(w) + R(r)*R(w) + A(r)*A(w) + S(r)*S(w) + T(r)*T(w) + F* + Ur (Uw)$$

(*) La dirección y sentido predominante del SFAS (F) no se ponderó 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 en la zona evaluada.

Ventajas del modelo de evaluación de vulnerabilidad DRASTFU

El objetivo del modelo DRASTFU es tener un método para evaluar la vulnerabilidad de contaminación del agua subterránea que tome en cuenta la dirección y sentido predominante de los flujos de agua subterránea, así como los sitios con mayor peligro contaminante en la zona de estudio. Se buscó que el mapa DRASTFU fuese de fácil construcción usando la información hidrogeológica comúnmente disponible. Decidimos basarnos en el modelo DRASTIC por ser este un modelo ampliamente

usado y que ha demostrado su eficacia para el objetivo buscado. Para reducir los datos requeridos en la elaboración de DRASTFU se optó por no usar en su construcción los factores “impacto de la zona vadosa” (I) ni la conductividad hidráulica (C) dado que la información del factor I ya se contempla en los factores D y A de DRASTFU. Consideramos que el factor C no mostrará cambios en el área de 4 kilómetros delimitada como de mayor peligro ante un evento contaminante.

En la **Figura 1** se presenta el diagrama de los procesos realizados para generar el mapa de vulnerabilidad DRASTFU

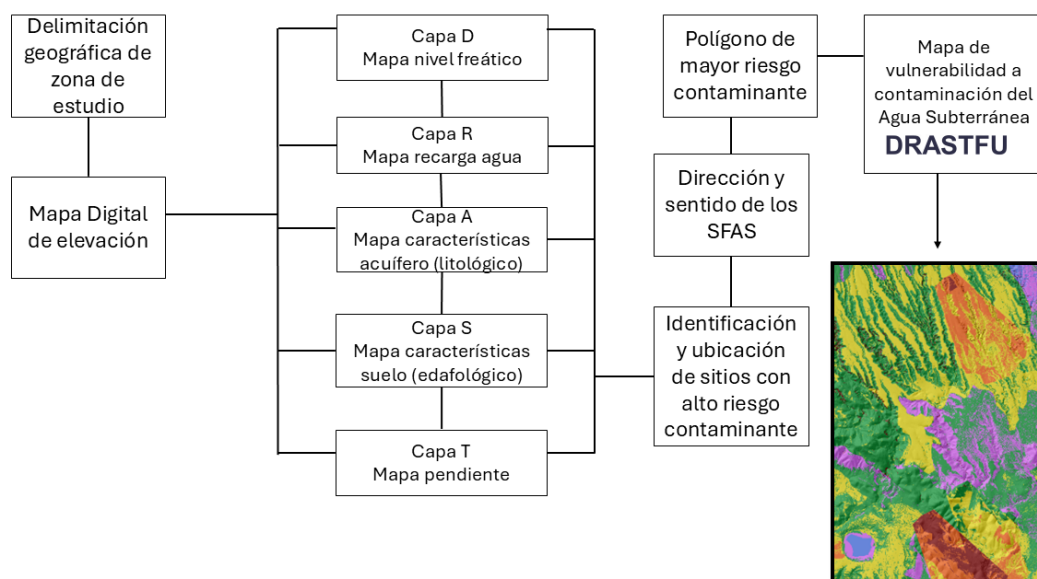


Figura 1. Diagrama de procesos realizados para generar el mapa de vulnerabilidad DRASTFU

Selección y ubicación de principales peligros contaminantes

Para poder proteger la calidad del agua subterránea, es fundamental el saber cuáles son los peligros contaminantes y su ubicación con respecto a los SFAS y a las fuentes de abasto de agua para los pobladores que la usan y beben. Si bien un análisis de vulnerabilidad específico para cada contaminante o grupo de estos es más útil en la evaluación del riesgo y de las posibles afectaciones a los pobladores, su aplicación es muy limitada ya que normalmente, la contaminación del agua subterránea se presenta por múltiples sustancias en un mismo evento (Appelo y Postma 2004, Barbulesco 2020, GBM 2002, Jordana y Batista 2004, Massone 2013). Además, se requiere de gran cantidad de recursos para poder estudiar los efectos de los múltiples contaminantes. Por estas razones, se opta por un análisis de vulnerabilidad de contaminación enfocado en los sitios o fuentes con mayor peligro contaminante en lugar de centrarnos en un contaminante o grupo de estos. En el **Anexo 3** de este capítulo se presentan los principales sitios o actividades potencialmente generadoras de una carga contaminante al agua subterránea.

La variedad de actividades y sitios posiblemente contaminantes es enorme y no debe limitarse a lo aquí descrito, ya que prácticamente cualquier actividad humana genera contaminantes, los cuales, en ocasiones, por su cantidad y/o frecuencia de generación o aplicación, no son degradados o su efecto no es amortiguado, por los ecosistemas (GBM 2002, Li et al 2021). El elevado número y diversidad de las

posibles fuentes contaminantes hace muy complejo y arduo el proceso de inventariarlas todas para ubicarlas en un mapa de vulnerabilidad. Además, en caso de realizarlo, se corre el riesgo de obtener un efecto de “saturación” o poca resolución entre las áreas con diferente vulnerabilidad. (Foster et al. 2013). Por otro lado, un trabajo muy detallado implica también una inversión elevada de recursos en la elaboración de los mapas de vulnerabilidad y riesgo. Por estas razones, se recomienda centrar el trabajo de investigación en los sitios o actividades con mayor riesgo de contaminación así como en los contaminantes identificados con mayor daño potencial (GBM 2002).

Respecto a la presencia de arsénico de posible origen geológico, este se reporta por Alarcón-Herrera et al. (2020) en muestras de agua en la región norponiente del estado de Morelos (sin especificar ubicación) en concentraciones 4 veces superiores a las indicadas en la NOM-127-SSA1-2021, (Agua para uso y consumo humano, límites permisibles de la calidad del agua) (SSA 2022). En un estudio de análisis de suelo para un sitio ubicado en el cerro del Jumil, se obtuvo una concentración de arsénico de 271.69 mg/kg, cantidad que es casi 13 veces superior a lo permitido en suelos de uso agrícola (SEMARNAT 2023).

MÉTODOS

Descripción de la zona de estudio

La zona de estudio de la presente investigación se encuentra en el estado de Morelos, México, entre los municipios de Temixco, Miacatlán y Xochitepec dentro

de la cuenca del Río Amacuzac, en los límites de los acuíferos “Cuernavaca” y “Zacatepec”. Las evidencias geológicas, geofísicas e hidrológicas indican que estos acuíferos son de “tipo libre”, heterogéneos y anisótropos (tanto en el sentido vertical como horizontal). La porción superior del acuífero Cuernavaca, está constituida principalmente por sedimentos aluviales y fluviales de granulometría variada, así como areniscas y conglomerados intercalados con basaltos y andesitas (CONAGUA 2020a y b). La dirección y sentido predominante de los flujos de agua subterránea es de norte a sureste. Los valores de conductividad hidráulica para la zona oscilan entre 4.4×10^{-5} m/s y 2.8×10^{-4} m/s (3.8 a 24.2 m/día) (Morales-Casique et al. 2016).

Una ventaja que tenemos en la zona de trabajo seleccionada (**Figura 2**), es que se cuenta con estudios previos que confirman la dirección (principal) y sentido de los SFAS que, en conjunto, con la información existente sobre hidrogeoquímica y profundidad a que se encuentra el nivel freático, permitirá desarrollar el perfil hidrogeológico necesario (Morales-Casique 2016, Pohle-Morales 2010, CONAGUA 2020a y b).

Ubicación de principales sitios y actividades con alto riesgo de contaminación al
agua subterránea en la zona de estudio

Relleno Sanitario Loma de Mejía, LM (UTM: -99.2751, 18.8998)

Ubicado en el Municipio de Temixco. Es el relleno sanitario en el que se depositan los residuos sólidos urbanos de los municipios Cuernavaca y Temixco. Localizado

en la zona geológica Glacis Buenavista inició operaciones en diciembre de 2008. Se encuentra entre las barrancas “La Tilapeña” y “La Colorada”. La población que habita en las inmediaciones se encuentra en las colonias: Santa Úrsula, Residenciales la Cúspide y Campo Verde, Solidaridad, La eterna primavera, 3 de Mayo y Fraccionamiento Colinas de Altar.

Basurero de Tetlama, BT (clausurado) (UTM -99.2812,18.7839)

El antiguo basurero de Milpillas Tetlama fue clausurado en el año 2006, luego de 35 años de actividad y posterior a las protestas y conflicto que se presentó con habitantes de Alpuyeca, quienes argumentaron contaminación del aire, agua y suelos a causa del basurero y de los camiones con basura que transitaban diariamente por su comunidad. Una vez clausurado el basurero, se cubrieron los desechos con tierra (Ochoa-Chi 2014, Morales-Cruz 2023). No se reporta si es que la basura se encuentra contenida entre membranas impermeables o si existe algún programa para recolección y tratamiento de lixiviados. Las poblaciones más cercanas son: Milpillas, Xochicalco, Huertos de Alpuyeca y viviendas ubicadas a orillas de carretera Grutas de Cacahuamilpa-Alpuyeca entre la entrada a la zona arqueológica de Xochicalco y la comunidad de Alpuyeca.

Proyecto minero “La Esperanza” Cerros Colotepec y del Jumil, CJ. (UTM -99.2737,18.7944)

Localizado a 17 kilómetros de la ciudad de Cuernavaca en dirección surponiente. Se ubica entre los municipios de Temixco, Xochitepec y Miacatlán. Estos cerros se encuentran limitados del lado noreste por el río Cuentepec (o Tetlama) y hacia el

norponiente por el río Tembembe. Actualmente este proyecto está detenido después de que la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) no autorizará el inicio de operaciones. Las colonias o poblaciones más cercanas son: San Agustín Tetlama, Unidad Habitacional José María Morelos, Col. Loma Bonita y ampliación Loma Bonita, Fraccionamiento Colinas de Xochitepec.

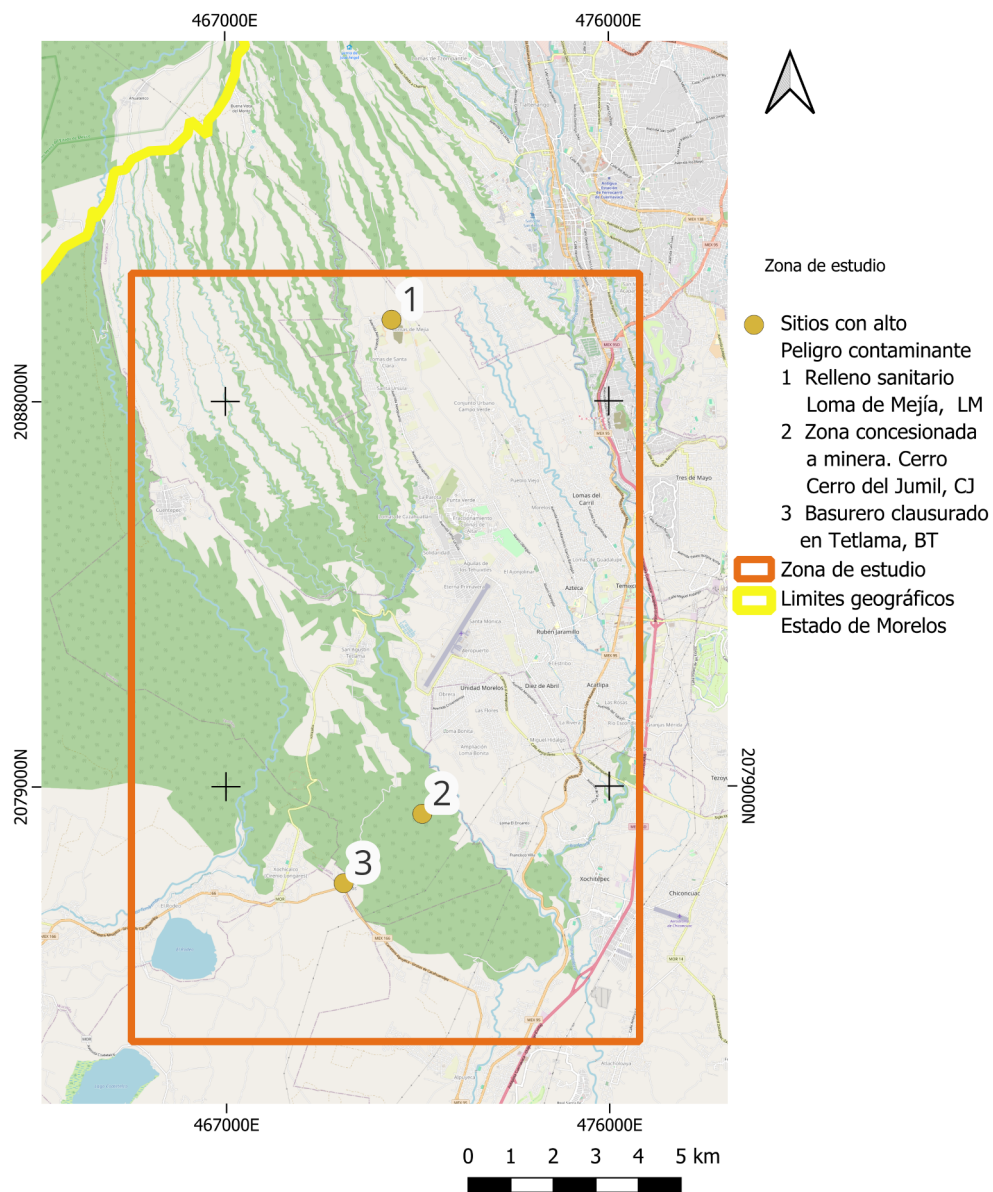


Figura 2. Ubicación de la zona de estudio y de los sitios identificados con alto peligro contaminante

Construcción del mapa de vulnerabilidad de contaminación del agua subterránea

DRASTFU

A continuación, se describe el proceso de la elaboración de las capas con las cuales se construyó el mapa DRASTFU utilizando el programa de acceso libre QGis (QGis 2022).

Capa D. Evaluación de la profundidad del nivel freático

La profundidad a la que se encuentra el nivel freático es una característica muy importante de este modelo, ya que determina la magnitud del recorrido que debe hacer un contaminante para alcanzar el acuífero. Esta capa del modelo DRASTFU se construyó con los datos de la red piezométrica de la CONAGUA obtenidos de la Subgerencia de Información Geográfica del Agua, SIGA (CONAGUA 2024). Se utilizó un Modelo Digital de Elevación (DEM) de la zona de estudio sobre el que se proyectaron los resultados del análisis de interpolación IDW realizado con las mediciones piezométricas. Se consideró la medición de profundidad del nivel freático (en metros) más reciente para cada uno de los pozos ubicados en el estado de Morelos. Con la intención de aumentar la resolución entre los diferentes niveles de profundidad a la cual se encuentra el nivel freático en los diversos puntos de la zona de estudio, y ante la poca cantidad de mediciones de piezometría en la misma, se empleó una sección del mapa generado por Reyes-Amaya (2025) quien, además de considerar los valores de la red piezométrica de CONAGUA, utiliza en la construcción de la interpolación IDW la ubicación de diferentes manantiales en la

zona a los que se asigna un valor de profundidad de cero metros (por ser los sitios en los cuales emerge el agua subterránea). En nuestro modelo DRASTFU, tomamos en cuenta la profundidad máxima reportada del nivel freático en la zona de estudio (75 metros aproximadamente) a la cual asignamos el menor valor w, a diferencia de DRASTIC en el cual se asigna este valor a zonas con nivel freático igual o mayor a 35 metros (NSW 2001). Se realiza una clasificación en 10 niveles dividiendo el rango total de profundidad del nivel freático observado de la zona. La vulnerabilidad de contaminación del agua subterránea será mayor cuando el nivel freático se encuentre a menor profundidad (**Tabla 1 y Figura 3**).

Tabla 1. Valores "w" para capa de profundidad del nivel freático (Capa D)

Profundidad del Nivel Freático (metros)	Valor "w" asignado en DRASTFU
> 67.5	1
60 – 67.5	2
52.5 – 60	3
45 – 52.5	4
37.5 – 45	5
30 – 37.5	6
22.5 – 30	7
15 – 22.5	8
7.5 – 22.5	9
≤ 7.5	10

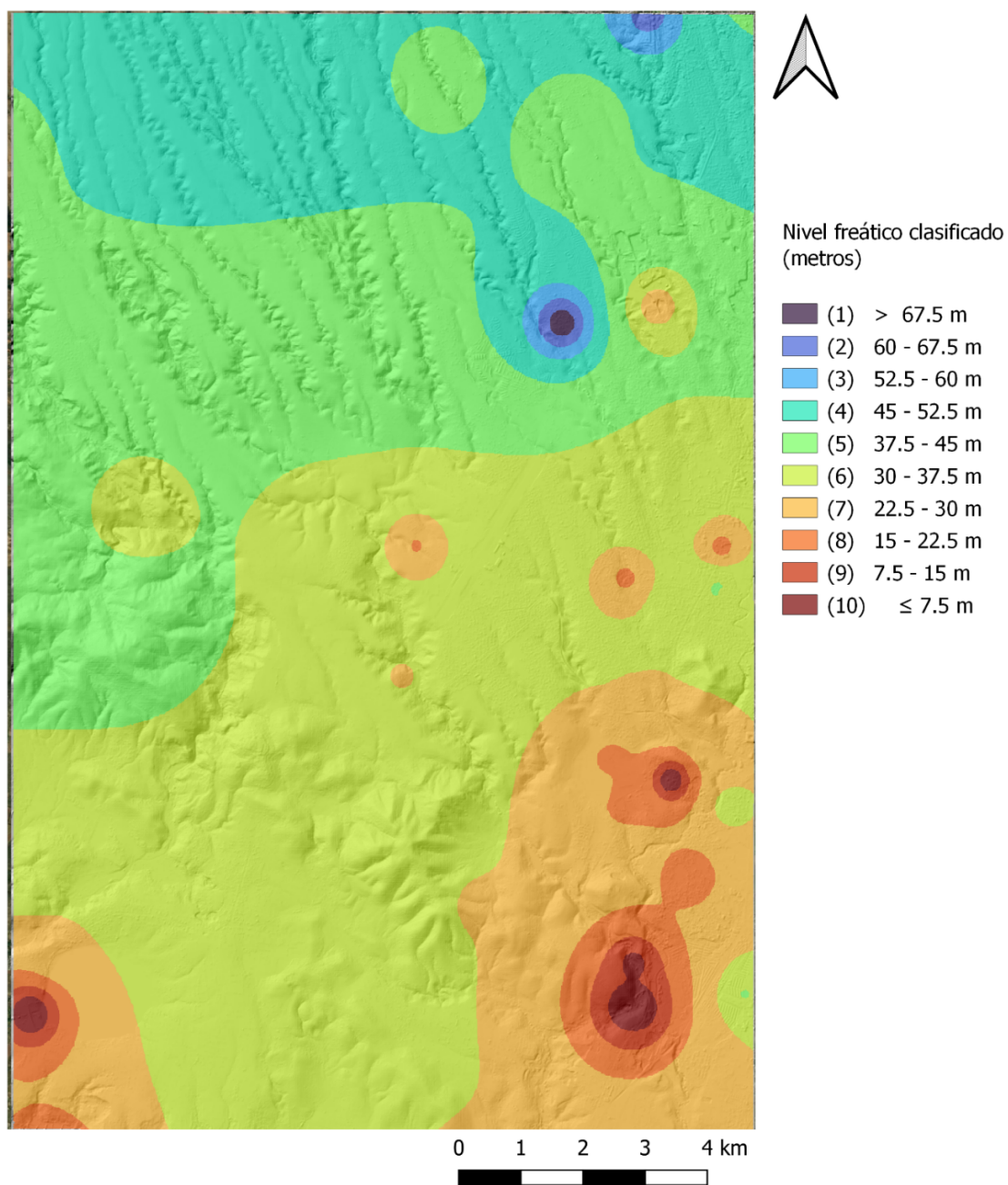


Figura 3: Capa D. Profundidad del nivel freático en zona de estudio clasificada en valores w de DRASTFU

Capa R. Evaluación de la recarga de agua neta

La recarga neta representa la cantidad de agua que penetra la superficie del suelo y se mueve hasta llegar al nivel freático. Los contaminantes presentes en superficie pueden ser disueltos o acarreados por esta agua de recarga. De manera general, a una mayor recarga se tendrá un mayor potencial de contaminación del agua subterránea.

El cálculo de la recarga para DRASTFU considera 3 factores: la pendiente del terreno, la cantidad de precipitaciones en la zona evaluada y el grado de permeabilidad del suelo (NSW 2001). La fórmula general para calcular la recarga neta es la siguiente:

Valor de recarga = Pendiente del terreno + Precipitaciones + Permeabilidad suelo

El valor final de la capa R se obtiene sumando los puntajes de las 3 capas, de donde se obtiene un valor entre 4 y 14. Los valores obtenidos se reclasifican en una escala de 1 a 10 con lo cual se obtiene el valor final de la capa R que se empleara en la construcción de DRASTFU. Para evaluar el porcentaje de pendiente, se emplea la Capa T y para evaluar la permeabilidad del suelo se emplea la Capa S del mismo análisis DRASTFU. Para evaluar el impacto de las precipitaciones se utilizó el mapa vector de isoyetas de precipitaciones medias anuales de la República Mexicana el cual se obtuvo del Geoportal CONABIO (CONABIO 2024) (ver **Tabla 2, Figura 4 y Figura 5**).

Tabla 2. Valores empleados y puntos asignados para la construcción de la capa R.

Porcentaje de pendiente (%)	Valor asignado en construcción de Capa R
33 - 100	1
20 - 33	2
10 - 10	3
2 - 10	4
0 - 2	5

Precipitaciones anuales en zona de estudio (mm /año)	Valor asignado para construir capa R
1200 - 1500	4
1000-1200	3
800 - 1000	2

Permeabilidad relativa del suelo	Valor asignado en construcción de Capa R
Mínima	2
Baja	3
Media	4
Alta	5
Muy alta	6

Rangos de sumatoria de puntos multicapa	Valor asignado (w) en construcción de Capa R
7	2
8 – 9	4
10 - 11	6
12	8
14	10

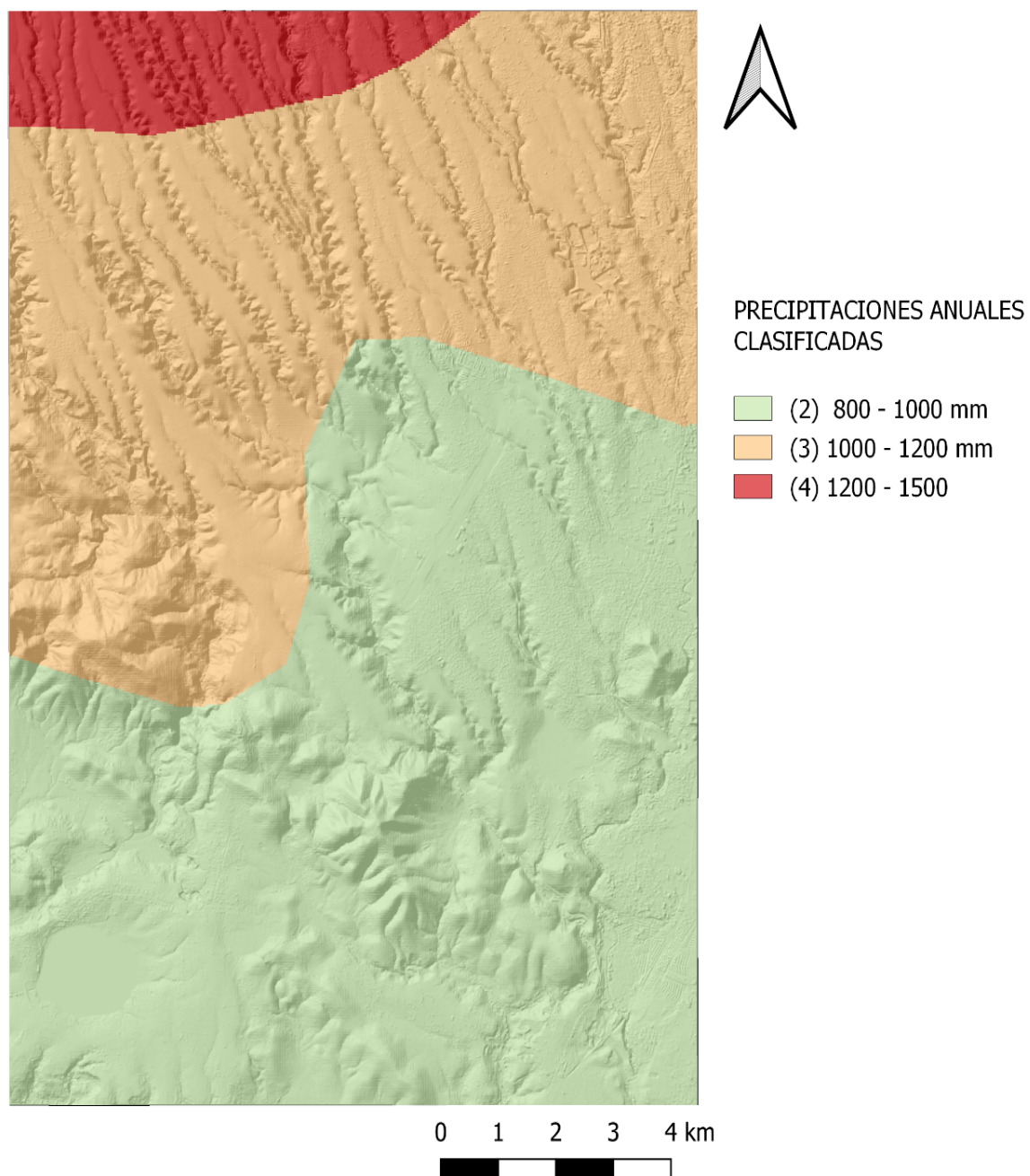


Figura 4. Precipitaciones anuales para zona de estudio.

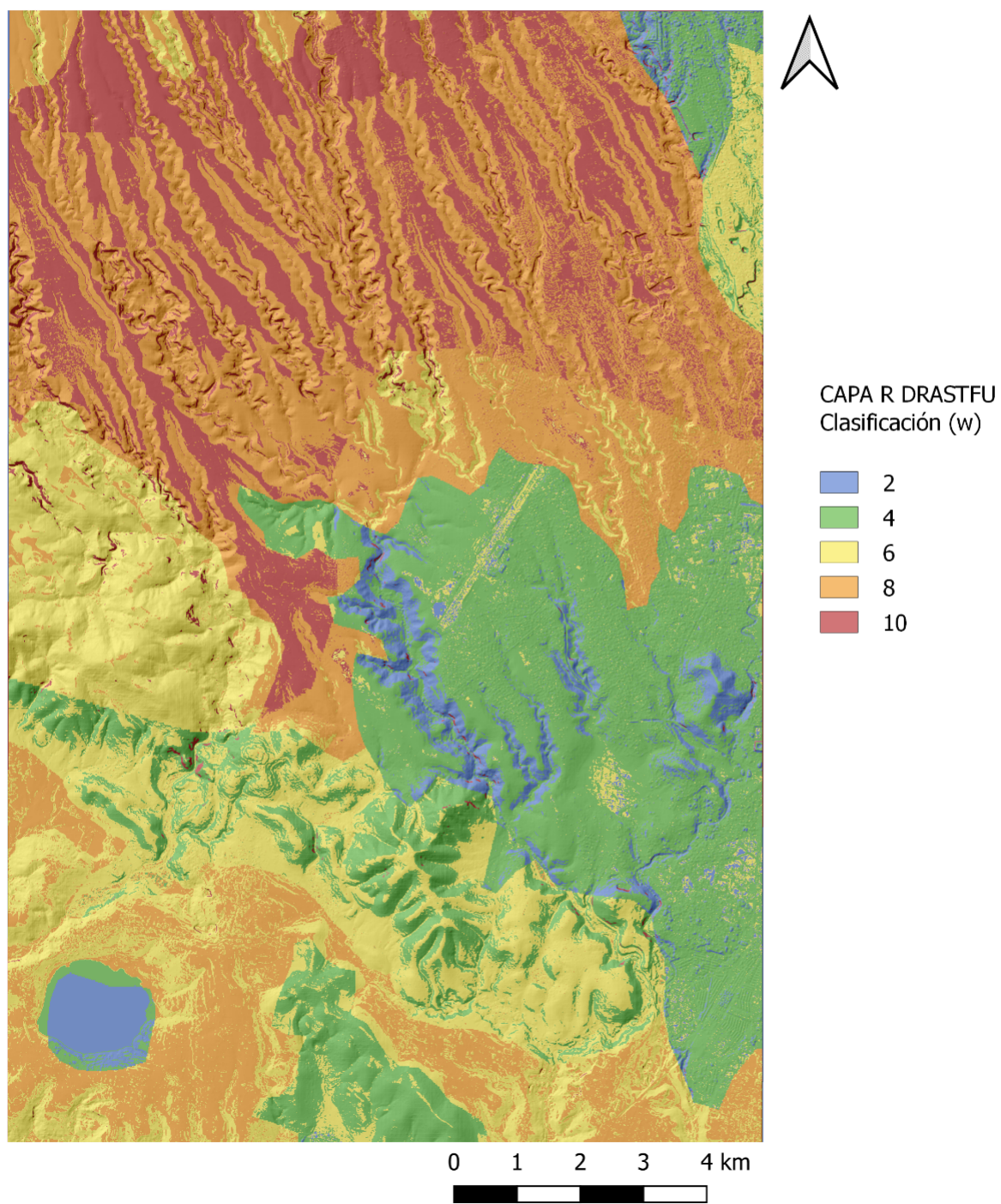


Figura 5. Nivel de recarga pluvial neta (CAPA R) en la zona de estudio.

Capa A. Evaluación de las características del acuífero

Las características del acuífero influyen de manera importante en la ruta, profundidad y longitud del recorrido del agua subterránea. Al igual que en la construcción de la Capa S, es importante considerar el grado de compactación, fracturas y porosidad en el material geológico de la zona. La estructura litológica de la zona de estudio se obtuvo de la carta E14-5 “Cuernavaca” (SGM 2024), del portal del Servicio Geológico Mexicano (SGM). Las litologías presentes en la zona de estudio y sus claves del SGM son: aluvial sedimentaria, Qho(al); basalto-andesita extrusiva, QpthoB-A; caliza sedimentaria, KapKce(cz); conglomerado poligénico limolita, TpaTpe(cgp-lm); lahar extrusiva, Tpl(Lh) y Riolita extrusiva, To(R), (ver **Tabla 3** y **Figura 6**).

Tabla 3. Valores empleados y puntos asignados para la construcción de la capa A.

Tipos de acuíferos (litología)	Valor “w” asignado en DRASTFU
TpaTpe(cgp-lm)	3
To(R)	3
Tpl(Lh)	4
Qho(al)	5
KapKce(cz)	6
QpthoB-A	9

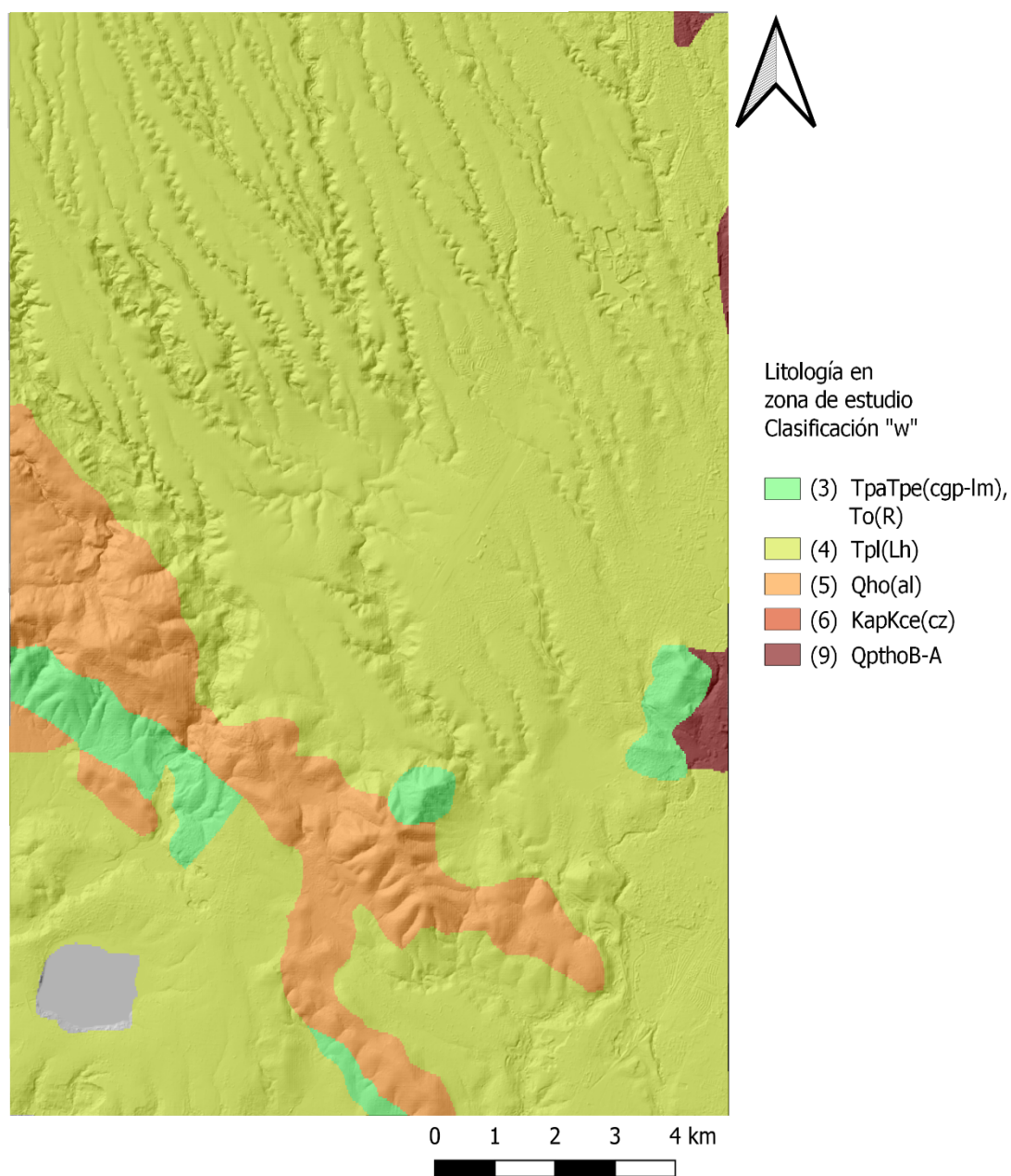


Figura 6. CAPA A; Clasificación del área de estudio con base en características litológicas del acuífero.

Capa S. Evaluación del tipo de suelo.

La capa S del modelo DRASTFU evalúa a la capa superficial del suelo cuyo grosor es normalmente de 1 m. El tipo de suelo tiene gran impacto en la cantidad de agua y contaminantes disueltos o acarreados que puede infiltrar hacia el nivel freático. La presencia de suelos con textura fina, como arcillas y limo tienen una menor permeabilidad en comparación con suelos de arenas o gravas. Los diferentes suelos presentes en la zona de estudio se obtienen del mapa edafológico de la República Mexicana descargado del geoportal CONABIO (CONABIO 2024). Los suelos presentes en la zona de estudio son: acrisol húmico, feozem calcárico, feozem háplico, feozem lúvico, feozem pélico, rendzina, y vertisol pélico. Para asignar un valor “w” a cada uno de estos suelos se consideraron sus características de textura (fina o media) y el grado de compactación (**Tabla 4 y figura 7**).

Tabla 4. Valores “w” para capa tipo de suelo. Capa S

Profundidad del Nivel Freático Textura: Valor “w” asignado en DRASTFU	
Media (M); Fina (F)	
Feozem pélico (M)	2
Vertisol pélico (F)	2
Feozem lúvico (M)	3
Rendzina (F)	3
Rendzina (M)	4
Acrisol húmico (M)	4
Feozem calcárico (M)	5
Feozem háplico (M)	6

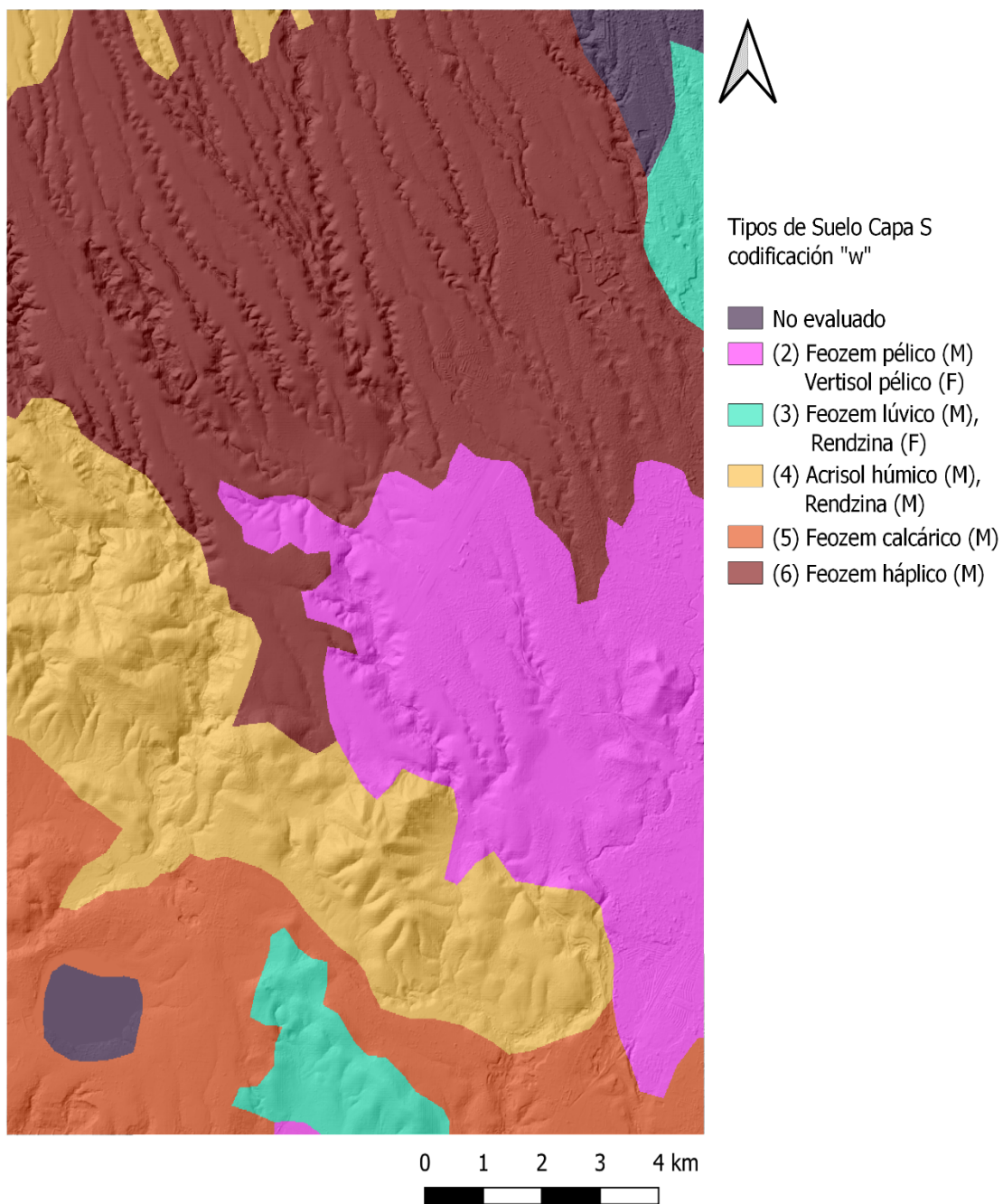


Figura 7. CAPA S; clasificación del área de estudio con base en los diferentes tipos de suelo presentes.

Capa T. Evaluación de la influencia de la pendiente topográfica.

La aportación de la topografía del terreno se evalúa con su pendiente, la cual se relaciona con la vulnerabilidad de contaminación del agua subterránea debido a que, zonas con pendiente pronunciada (mayor a 33°) presentan alta escorrentía, mientras que en zonas con pendiente ligera o lugares planos el agua no fluye, lo que aumenta el grado de infiltración. Un alto nivel de infiltración se relaciona con un riesgo elevado de contaminación. Por otro lado, el nivel de pendiente influye en el desarrollo de los diferentes tipos de suelos lo que puede tener un papel atenuante a la contaminación (USEPA 1987).

El porcentaje de pendiente se calculó a partir de un mapa de elevación topográfica (DEM) de la zona de estudio. El nivel de pendiente se clasificó de acuerdo a los niveles descritos en el modelo DRASTIC (**Tabla 5** y **Figura 8**).

Tabla 5. Valores "w" para capa de la pendiente del suelo. Capa T

Porcentaje de pendiente	Valor "w" asignado en DRASTFU
0 - 2	10
2 - 10	8
10 - 20	5
20 - 33	2
> 33	1

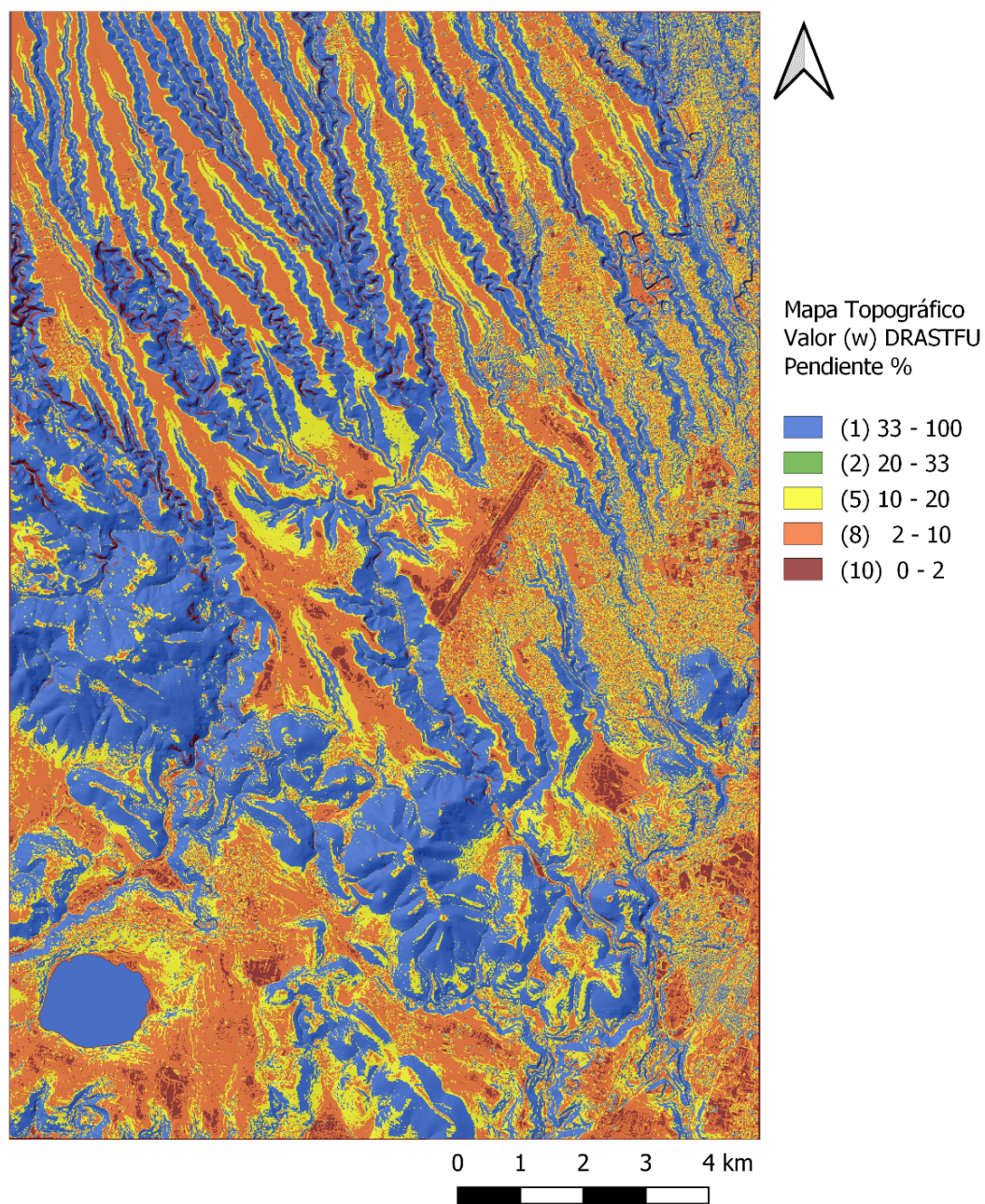


Figura 8. CAPA T; Clasificación topográfica de la zona de estudio de acuerdo al porcentaje de pendiente presente.

Capa F. Dirección y sentido predominante de los sistemas de flujo de agua subterránea

Este parámetro se agrega a la evaluación tradicional de la vulnerabilidad de contaminación del agua subterránea. Su adición se fundamenta en la teoría de los Sistemas de Flujos del Agua Subterránea (SFAS). El agua subterránea se encuentra en movimiento constante entre los sitios donde infiltra (recarga), y los sitios donde emerge nuevamente a la superficie. Se ha demostrado que este movimiento no es errático, sino que sigue rutas discretas que se diferencian tanto en su recorrido vertical (profundidad) como horizontal (Tóth 1999).

Se construyó un polígono con diferentes compartimentos internos para evaluar el posible impacto ante eventos contaminantes de los sitios con mayor riesgo en la zona de estudio (**Figura 9**). En este polígono se consideró el proceso de distribución y dilución de los posibles contaminantes acarreados o disueltos en el agua subterránea. El polígono de forma similar a un cono debe ubicarse con el vértice (foco) en el centro del sitio identificado con alto riesgo contaminante. Se debe ajustar el eje de simetría del polígono con la dirección predominante de los SFAS para la zona de estudio (**Figura 10**).

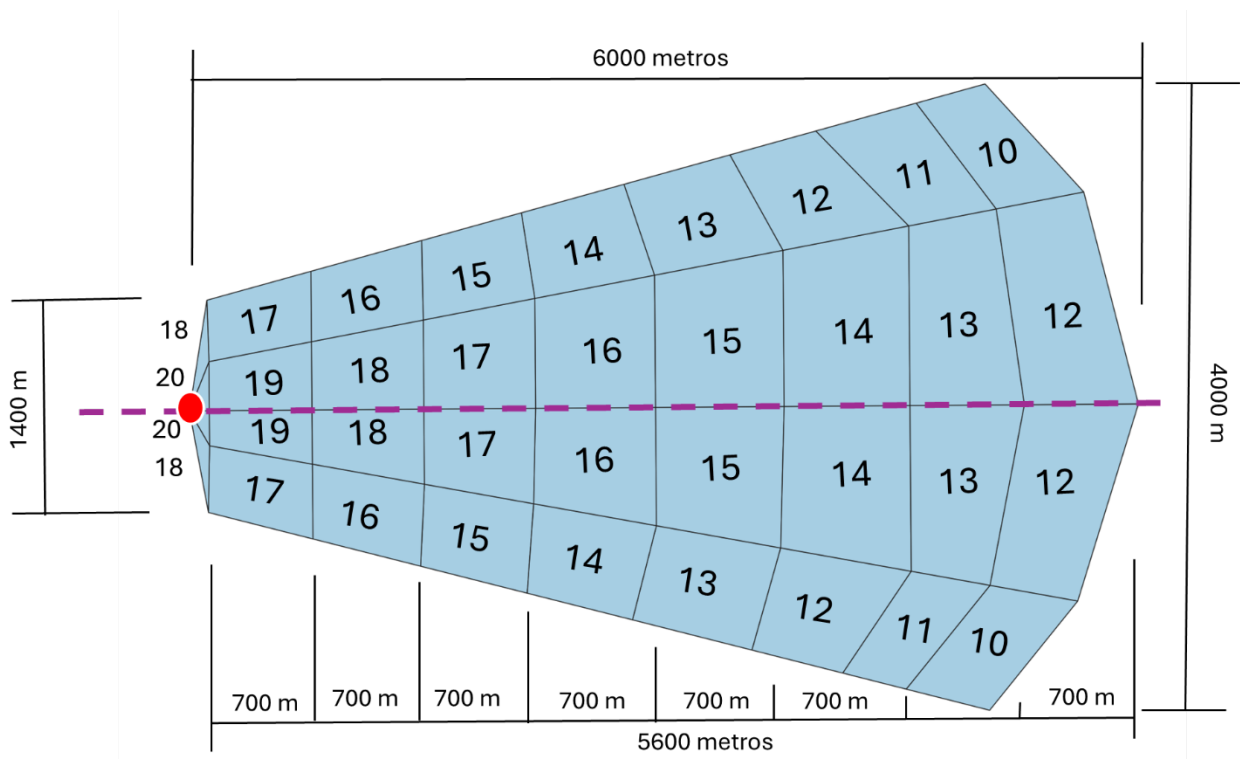


Figura 9. Polígono de influencia de sitios con alto peligro contaminante. El polígono debe ajustarse a la dirección de los SFAS predominantes usando su eje (línea punteada). El punto rojo debe ubicarse en el centro del sitio contaminante. Ángulo de apertura de 100°.

Estos polígonos de influencia se construyen con el programa QGis inicialmente como imágenes lineales vectorizadas y posteriormente, como capas de píxeles (ráster) que se ubicaran en cada uno de los sitios identificados con alto peligro contaminante.

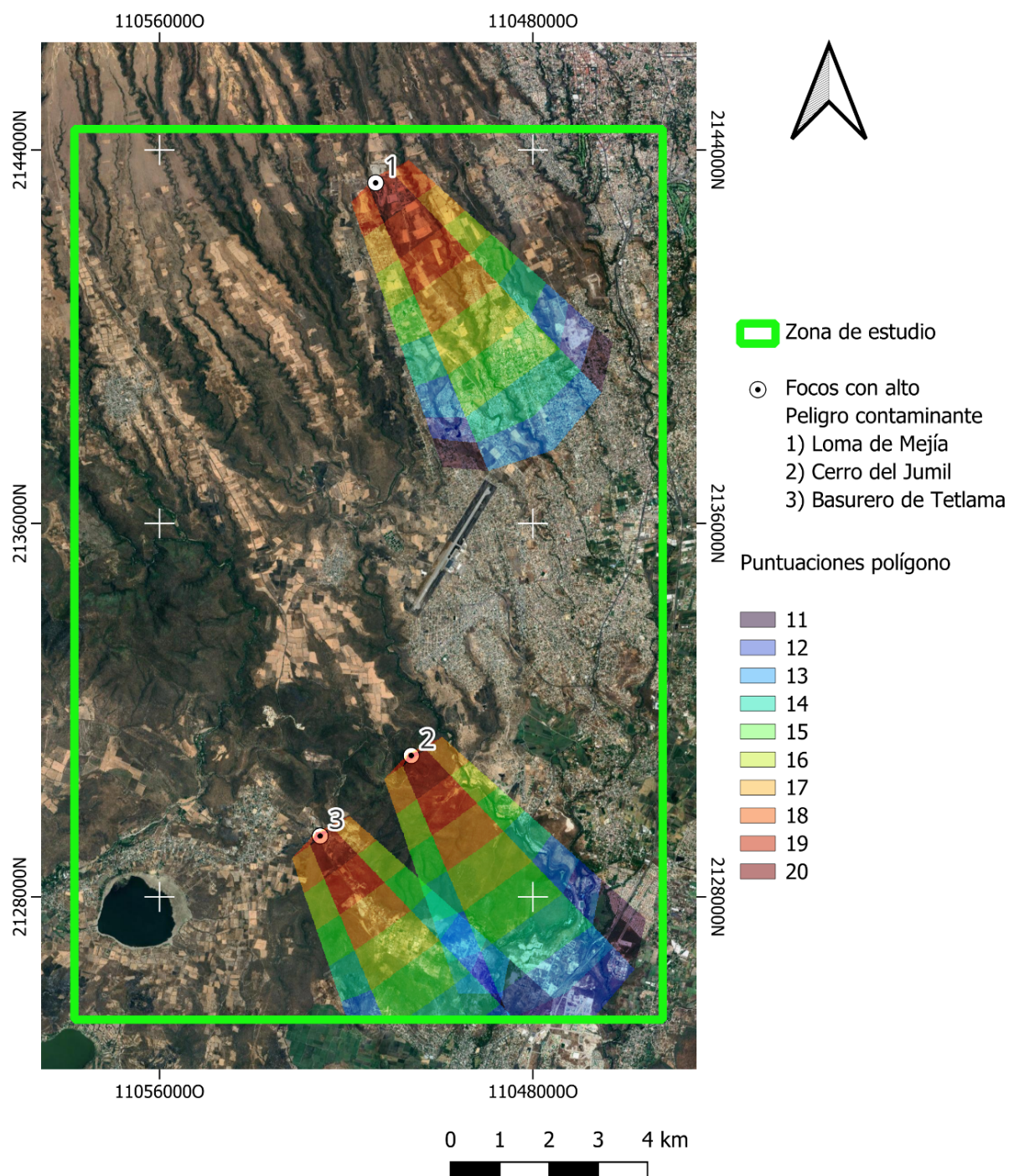


Figura 10 Ubicaciones de los polígonos de influencia para los sitios con mayor peligro contaminante en la zona de estudio.

Capa U. Ubicación de los principales peligros contaminantes

En esta evaluación se incluyeron únicamente los 3 sitios que representan mayor peligro contaminante al agua subterránea en la región de estudio: relleno sanitario Loma de Mejía (LM), zona concesionada a empresa minera cercana al cerro El Jumil (CJ) y el antiguo basurero de Tetlama, actualmente clausurado (BT). Las ubicaciones y características generales de estos 3 sitios se describieron en la sección “zona de estudio”.

RESULTADOS

Mapa DRASTFU

Una vez que se tienen las 6 capas y la ubicación de los sitios con alto peligro contaminante seleccionados se puede construir el mapa DRASTFU. El mapa final se obtiene haciendo la suma algebraica de las diferentes capas digitalizadas usando el programa QGis. La fórmula, sustituyendo los valores “r” asignados es la siguiente:

$$\text{Índice DRASTFU} = (5 * \text{“w” Capa D}) + (4 * \text{“w” Capa R}) + (3 * \text{“w” Capa A}) + (2 * \text{“w” Capa S}) + (1 * \text{“w” Capa T}) + (3 * \text{valores del polígono de influencia BT}) + (1.5 * \text{valores del polígono de influencia LM}) + (1 * \text{valores del polígono de influencia CJ})$$

De acuerdo con los valores “w” presentes en las capas del mapa DRASTFU, junto con los valores de los polígonos de influencia incluidos en su elaboración, los puntajes obtenidos con el índice calculado se encuentran entre 37 y 199. Los

puntajes mayores indican regiones con la vulnerabilidad de contaminación del agua subterránea más elevada dentro de la zona de estudio.

Para una interpretación práctica de los resultados, se empleó una clasificación discreta de los puntajes obtenidos, los cuales se clasificaron en cinco categorías de vulnerabilidad: baja, moderada, media, alta y extrema como se presenta en la

Figura 11.

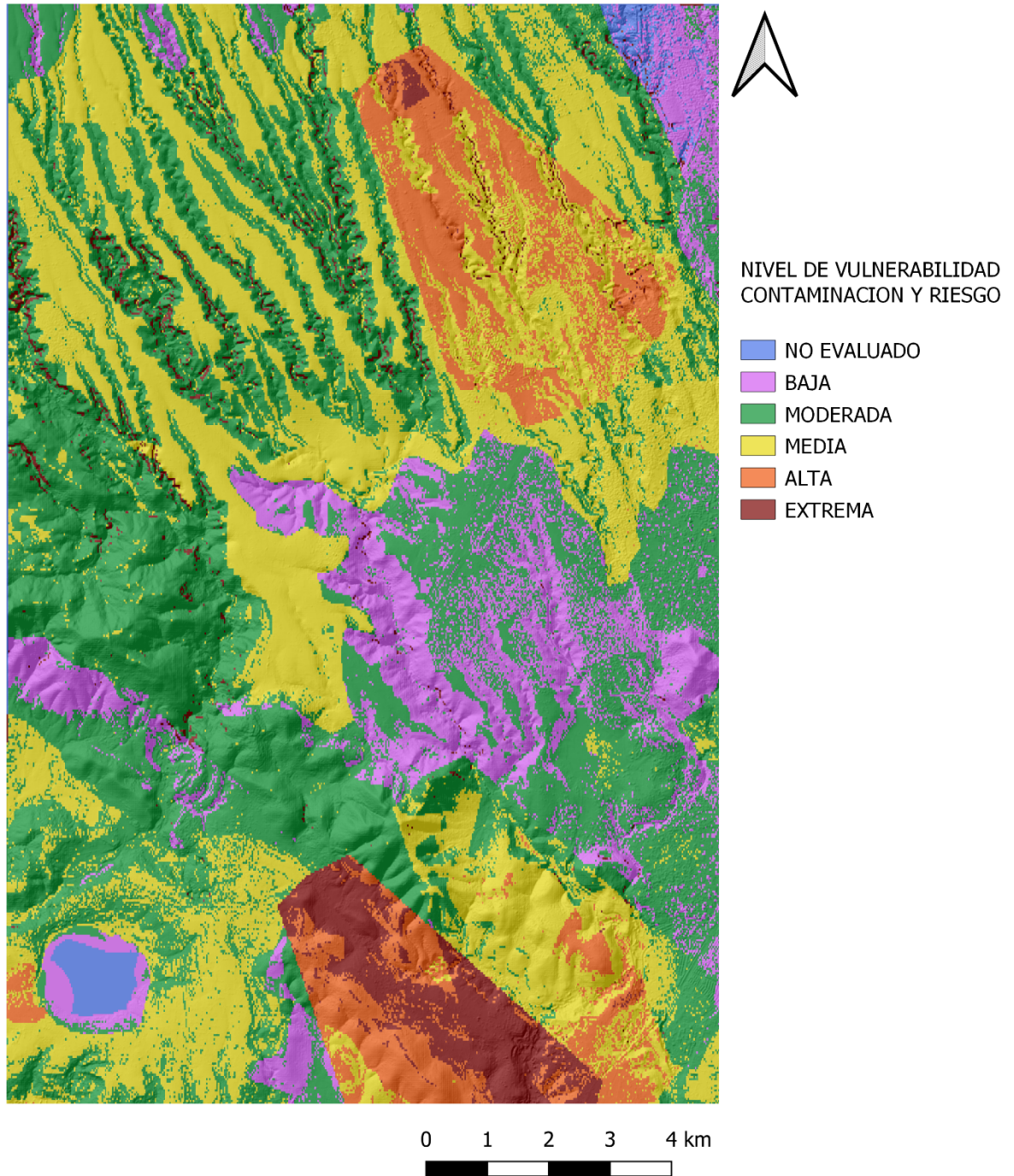


Figura 11. DRASTFU. Mapa de vulnerabilidad de contaminación del agua subterránea y riesgo de afectación a pozos de agua potable.

DISCUSIÓN

La evaluación de la vulnerabilidad de contaminación del agua subterránea se ha llevado a cabo por distintos métodos resaltando el modelo DRASTIC (USEPA 1987), cuya eficacia ha sido demostrada en diversos contextos hidrogeológicos. Sin embargo, múltiples autores han señalado que su aplicabilidad presenta limitaciones, principalmente el no considerar la dinámica de los sistemas de flujo subterráneo y la influencia directa de sitios y actividades contaminantes en la superficie del suelo (Appelo y Postma, 2004, Foster et al. 2013).

El modelo DRASTFU, desarrollado en este trabajo, representa una innovación metodológica al integrar dos factores adicionales: la dirección y sentido de los flujos subterráneos (F) y la ubicación de los principales sitios con alto riesgo contaminante (U). Esta incorporación se fundamenta en la teoría de los Sistemas de Flujo de Agua Subterránea (Tóth 1999), la cual reconoce que los contaminantes no permanecen confinados en un área específica, sino que son transportados a lo largo de trayectorias definidas tanto en su recorrido vertical como longitudinal. Esta perspectiva permite diferenciar con mayor precisión las zonas de riesgo, en comparación con modelos tradicionales centrados en la vulnerabilidad intrínseca del acuífero. Estas adiciones complementan los trabajos realizados en la zona con estos focos con alto peligro contaminante (Ochoa-Chi 2014, Pohle-Morales 2020, SEMARNAT 2023).

En comparación con estudios que enfocan el análisis en contaminantes específicos o en inventarios exhaustivos de actividades humanas (Massone 2013, Li et al., 2021), el modelo DRASTFU aporta una ventaja metodológica al evitar la sobrecarga

de información y al simplificar el proceso de evaluación mediante la priorización de los sitios de mayor peligro contaminante. Este enfoque mantiene la reproducibilidad del modelo y reduce significativamente los costos asociados, en concordancia con lo planteado por GBM (2002) y Jordana y Batista (2004), quienes resaltan la importancia de métodos prácticos y de bajo costo en contextos regionales.

Los resultados obtenidos en la zona de estudio evidencian la utilidad de DRASTFU para identificar áreas críticas. Se observó vulnerabilidad extrema en la región sureste del basurero clausurado de Tetlama (BT), donde se localizan pozos de abastecimiento con riesgo de afectación directa. De manera similar, en el polígono asociado al relleno sanitario de Loma de Mejía (LM), se identificaron doce pozos en zonas de vulnerabilidad media a alta. Se debe resaltar que esta es la región con mayor peligro dado que la dirección de los flujos de agua subterránea es hacia zonas con alta densidad poblacional. Finalmente, el área minera del Cerro del Jumil (CJ) es la que actualmente presenta los menores niveles de vulnerabilidad a contaminación, sin embargo, debemos recalcar que estos resultados son únicamente válidos mientras no comience la actividad extractiva o productiva de la mina.

En síntesis, el modelo DRASTFU presenta ventajas sustantivas sobre DRASTIC y otros métodos para evaluar la vulnerabilidad de contaminación del agua subterránea: i) mayor realismo hidrogeológico al integrar los SFAS; ii) incorporación de sitios contaminantes de alto riesgo; iii) reducción en los costos y tiempos de implementación al basarse en información secundaria hidrogeológica disponible; y

iv) utilidad directa para la planificación territorial, la gestión del recurso hídrico y la prevención de conflictos socioambientales.

CONCLUSIONES

1. El modelo DRASTFU representa una innovación metodológica en la evaluación de la vulnerabilidad de contaminación del agua subterránea, al integrar parámetros hidrogeológicos y antrópicos que fortalecen la capacidad predictiva respecto al transporte potencial de contaminantes.
2. La metodología desarrollada permite identificar no solo áreas de vulnerabilidad intrínseca, sino también aquellas que, por su ubicación en trayectorias de flujo subterráneo, presentan un mayor riesgo de afectación, lo cual incrementa el valor preventivo del análisis.
3. El modelo se distingue por su replicabilidad y bajo costo, al sustentarse en bases de datos hidrogeológicas nacionales y en el uso de software libre (QGIS), lo cual facilita su implementación en diferentes contextos regionales.
4. La aplicación de DRASTFU en la zona de estudio permitió identificar pozos de abastecimiento en riesgo directo, evidenciando la necesidad de implementar medidas inmediatas de control y monitoreo especialmente en los sitios identificados con vulnerabilidad alta y extrema.
5. El enfoque adoptado contribuye a fortalecer la gestión integral del agua, en especial de su fase subterránea, aportando una herramienta eficaz para la planeación territorial, la protección de acuíferos y la toma de decisiones en materia de política ambiental.

Recomendaciones para futuros trabajos

- Implementar un programa sistemático de monitoreo de calidad del agua subterránea en los pozos identificados como de mayor riesgo, con énfasis en contaminantes prioritarios como metales pesados, arsénico, nitratos y compuestos orgánicos persistentes. Se debe poner especial atención en los contaminantes emergentes que han mostrado ser persistentes ante degradación fisicoquímica o biológica como son moléculas orgánicas polifluoradas, medicamentos y microplásticos
- Validar el modelo mediante la correlación entre los niveles de vulnerabilidad estimados y las concentraciones reales de contaminantes, fortaleciendo así la confiabilidad de la herramienta.
- Incorporar escenarios de cambio climático y crecimiento urbano, a fin de evaluar la evolución de la vulnerabilidad en función de la variabilidad climática y de la presión antropogénica.
- Ampliar el inventario de sitios contaminantes, priorizando aquellos de mayor riesgo emergente, pero evitando la saturación cartográfica que disminuye la capacidad resolutive de los mapas.
- Promover la integración del modelo en planes de gestión municipal y estatal, incentivando su uso como herramienta de planeación preventiva en proyectos de ordenamiento territorial y en la protección de zonas de recarga de acuíferos.

REFERENCIAS

Alarcón-Herrera M. T., Martin-Alarcon 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, 134168.

Appelo C. A. J. y Postma D. (2004). *Geochemistry, groundwater and pollution*. Segunda ed. CRC press. 634 pp.

Barbulescu, A. (2020). Assessing groundwater vulnerability: DRASTIC and DRASTIC-like methods: a review. *Water*, 12(5), 1356.

CONABIO (2024). Mapas y bases de datos. Geoportal de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad [en línea]. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>

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 (2024). Pozos piezometricos. SINA. Sistema Nacional de Información del Agua. Comisión Nacional del Agua. Periodo 2023 [en línea]. <https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/SINA/?opcion=pozos>

Foster S., Hirata R. y Andreo B. (2013). The aquifer pollution vulnerability concept: aid or impediment in promoting groundwater protection?. *Hydrogeology Journal* 21(7), 1389.

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.

Jordana S. y Batista E. (2004). Natural groundwater quality and health. *Geologica Acta: an international earth science journal*, 2(2), 175-188.

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>

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

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.

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

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.

Ochoa-Chi J. (2014). Los tiraderos de basura y sus impactos socioambientales en la población circunvecina. El caso del tiradero de Milpillas, 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.

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

Reyes-Amaya J. (2025). Groundwater and its role in maintaining the ecological functions of ecosystems; advances in holistic approaches in studies on the interaction vegetation-groundwater flows. Tesis Doctoral. Doctorado en Ciencias Naturales, Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Morelos, México

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.

SGM (2024) Portal de internet GEOINFOMEX del Sistema Geológico Nacional. [en línea]. <https://www.sgm.gob.mx/GeoInfoMexGobMx/#>

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.

Tóth J. (1999). Groundwater as a geologic agent: An overview of the causes, processes, and manifestations. Hydrogeology journal, 7(1), 1-14.

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.

ANEXO 1. Especificaciones sanitarias y límites permisibles del agua para uso y consumo humano. Concentraciones máximas permitidas para sustancias o elementos potencialmente peligrosas o no deseables en el agua para beber. Adaptado de la NOM-127-SSA1-2021 (SSA 2022).

LÍMITE PERMISIBLE		UNIDADES
ESPECIFICACIONES FÍSICAS		
pH	6.5 A 8.5	Unidades de pH
Turbiedad	3.0	UNT (unidades de turbiedad)
ESPECIFICACIONES QUÍMICAS		
Cianuros totales	0.07	mg/L
Dureza total como CaCO ₃	500.00	mg/L
Fluoruros	1.00	mg/L
Nitrógeno amoniacal (N-NH ₃)	0.50	mg/L
Nitrógeno de nitratos (N-NO ₃)	11.0	mg/L
Nitrógeno de nitritos (N-NO ₂)	0.90	mg/L
Sólidos disueltos totales	1000.00	mg/L
Sulfatos (SO ₄)	400.00	mg/L
METALES Y METALOIDES		
Aluminio	0.20	mg/L
Arsénico	0.01	mg/L
Bario	1.3	mg/L
Cadmio	0.003	mg/L
Cobre	2.0	mg/L
Cromo total	0.05	mg/L
Hierro	0.30	mg/L
Manganeso	0.15	mg/L
Mercurio	0.006	mg/L
Níquel	0.07	mg/L
Plomo	0.01	mg/L

Selenio	0.04	mg/L
ESPECIFICACIONES MICROBIOLÓGICAS		
E. coli o coliformes termotolerantes	< 1	UFC/mL (Unidades Formadoras de Colonias por mililitro)
Giardia lamblia	Ausencia	Quistes/20 L
RESIDUALES DE DESINFECCIÓN		
Cloro residual libre	0.2 a 1.5	mg/L
Yodo residual libre	0.2 a 1.5	mg/L
Plata total	0.05 a 0.1	mg/L
COMPUESTOS ORGÁNICOS SINTÉTICOS		
Compuestos halogenados absorbibles	0.01	mg/L
Compuestos no halogenados	0.025	mg/L
Benceno	10	mg/L
Estireno	20	µg/L
Etilbenceno	300	µg/L
Xilenos	500	µg/L

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.

ANEXO 2. Principales contaminantes reportados para el agua subterránea. Se menciona también su origen más frecuente, así como las posibles afectaciones a la salud humana ante una exposición aguda y/o crónica.

Aluminio (Al) Origen: Empaques, envolturas y latas, minería, agua de abastecida a hogares. El aluminio se encuentra normalmente en formas inocuas para el humano, sin embargo, en condiciones ácidas puede incrementar su concentración como Al^{3+} y tener efectos negativos (ATSDR 2008). Posibles afectaciones a la salud humana: Trastornos neurodegenerativos, como Alzheimer, y afectaciones renales. Se ha relacionado al consumo excesivo de antiácidos de Al con la osteomalacia (ATSDR 2008).
Arsénico (As) Origen: Actividad industrial diversa, minería, plaguicidas. La exposición ambiental se asocia principalmente a consumo de agua con altos niveles de As (Berg et al. 2001). Posibles afectaciones a la salud humana: Intoxicación aguda: Bandas blancas en las uñas (líneas de Mees). Fiebre, anorexia, hepatomegalia, melanosis, arritmia cardíaca, infarto. Irritación gastrointestinal, pérdida de sensibilidad en nervios periféricos. Anemia y leucopenia. Intoxicación crónica: Hiperpigmentación, hiperqueratosis palmar y plantar, cáncer de piel, hepatomegalia, cirrosis, hepatocarcinoma. Neuropatía periférica, diabetes, nefrotoxicidad. Se ha asociado con enfermedades cardiovasculares, acrocianosis, síndrome de Raynaud, y gangrena en pies. Se clasifica al As como carcinogénico en humanos, asociado con tumores en piel, pulmones, vejiga urinaria y posiblemente riñones, hígado y próstata (Alarcón-Herrera et al. 2020, Hostynek et al. 1993, Hopenhayn 2006, WHO 2011)
Bacterias coliformes fecales Origen: desagües, fosas sépticas, aguas residuales, actividades agrícolas y ganaderas (WHO, 2011) Posibles afectaciones a la salud humana: diarrea, cólera, disentería, infecciones intestinales. (Guzmán-Hernández et al. 2020).
Benceno Origen: industria petroquímica, emisiones vehiculares, combustión incompleta (WHO 2011). Posibles afectaciones a la salud humana: Cáncer, leucemia, problemas en el sistema nervioso y sistema inmune (WHO 2011).
Bisfenol A Origen: plásticos, resinas epóxicas, empaques de alimentos y bebidas (Vandenberg et al. 2007)

Posibles afectaciones a la salud humana: disruptores endocrinos, problemas reproductivos y aumento en el riesgo de cáncer (Rochester 2013).
Cadmio (Cd) Origen: se encuentra principalmente en baterías, pigmentos y plásticos. También puede provenir del uso de fertilizantes. La acidez del medio aumenta su solubilidad en agua. Los alimentos son la principal fuente de Cd para la población en general ya que muchas plantas lo acumulan. Fumar es la principal fuente de exposición no ocupacional. (ATSDR 2012) Posibles afectaciones a la salud humana: Intoxicación aguda: Nauseas, vómito y dolor abdominal. Edema pulmonar y neumonitis en caso de inhalación en forma de gases o vapores con Cd. Intoxicación crónica: Daño renal, enfermedad obstructiva pulmonar, osteoporosis y enfermedades cardiovasculares. Se clasifica a compuestos con Cd como cancerígenos para humanos (cáncer de pulmón ocupacional) (WHO 2011)
Cobre (Cu) Origen: corrosión de tuberías, minería, residuos industriales (Mason 2009) Posibles afectaciones a la salud humana: daño hepático, problemas gastrointestinales, y daño renal. Disruptor endócrino (WHO 2011)
Cromo (Cr) Origen: la especie tóxica es la hexavalente (Cr^{+6}). Es derivado de varios procesos industriales como fabricación de esmaltes, acero inoxidable, tratamiento de pieles. El cromo expedido por algunas industrias se deposita en la tierra y agua. Posibles afectaciones a la salud humana: el Cr^{6+} es corrosivo y puede causar ulceraciones en piel y ojos y daño renal. Se relaciona a compuestos de cromo inhalados con cáncer de pulmón, así como al ingerido en el agua con cáncer de estómago (ATSDR 2012a; WHO 2011).
Dioxinas Origen: productos de la quema de basura, incineración de plásticos (WHO 2011) Posibles afectaciones a la salud humana: cáncer, daño hepático, problemas reproductivos, efectos inmunológicos (WHO 2011).
Fluoruros (F^-) Origen: uso industrial, minería y agua potable fluorada. Este anión es ampliamente usado en tratamientos dentales, se considera profiláctico para evitar caries. Las principales fuentes de fluoruro son agua, comida, dentífrico y tratamientos dentales (Li et al. 2021)

Posibles afectaciones a la salud humana: daño en huesos y dientes (fluorosis), alteraciones gastrointestinales. Intoxicación crónica: fluorosis dental, fluorosis ósea, dolor en articulaciones, debilidad muscular y fatiga crónica, osteoporosis en huesos largos. Se han reportado efectos a nivel reproductivo, renal, neurológico, gastrointestinal y endócrino (funcionamiento de tiroides y tolerancia a glucosa). Se asocia con bajos puntajes obtenidos en pruebas de coeficiente intelectual (ATSDR 2003; WHO 2011).
Ftalatos Origen o fuente común: plásticos, cosméticos, productos de cuidado personal (Jung et al. 2016). Posibles afectaciones a la salud humana: Trastornos endocrinos, daño en el sistema reproductivo (Li et al. 2021).
Hidrocarburos Aromáticos Origen o fuente común: combustión incompleta de materiales orgánicos, industria petroquímica, emisiones vehiculares (Levin et al. 2005) Posibles afectaciones a la salud humana: cáncer de pulmón, piel y vejiga, efectos en el sistema inmunológico y hepático (ATSDR 1995).
Hidrocarburos Halogenados Origen o fuente común: industria química, refrigerantes, aceites, pesticidas (Brown y Cohen 1996). Posibles afectaciones a la salud humana: cáncer, efectos endócrinos, trastornos inmunológicos y neurológicos (WHO 2011).
Hierro (Fe) Origen o fuente común: contaminación de minas, plantas industriales, y agua potable. Posibles afectaciones a la salud humana: la intoxicación por Fe puede ocurrir por ingerir sobredosis de algún suplemento alimenticio con Fe, por inhalar aire con alto Fe, por ejemplo el proveniente de minas (ATSDR 2004). La intoxicación por grandes cantidades de Fe genera dolor abdominal, diarrea, vómito. Palidez o cianosis, acidosis metabólica y colapso cardíaco. Daño hepático y daño neurológico (WHO 2011)
Litio (Li) Origen o fuente común: puede encontrarse en agua subterránea por origen geológico o como contaminante antropógeno debido principalmente a baterías desechadas. Posibles afectaciones a la salud humana: las intoxicaciones por litio se deben generalmente a sobredosis medicamentos ocasionando afectaciones neuromusculares, desórdenes del sistema nervioso central, afectaciones cardiovasculares y gastrointestinales. Intoxicación crónica: nefrotoxicidad y desórdenes en glándula tiroides (Li et al. 2021)

Manganeso (Mn) Origen o fuente común: puede presentarse en altas concentraciones por actividad minera y por baterías eléctricas desechadas. El agua subterránea puede tener concentraciones altas de Mn de origen geológico (ATSDR 2008a). Posibles afectaciones a la salud humana: Intoxicación crónica: neurotoxicidad inducida por Mn (manganeso) debido a respirarlo o por ingerirlo en agua. Dolor de cabeza, insomnio, pérdida de memoria, calambres musculares, inestabilidad emocional, hipoquinesia, rigidez, temblor de manos y problemas del habla (ATSDR 2000a, WHO 2011).
Mercurio (Hg) Origen o fuente común: de manera natural se relaciona con actividad volcánica. Las fuentes antropogénicas son la actividad minera, la quema de carbón mineral e incineradores municipales. Se bioacumula en peces en forma de metilmercurio. El consumo de peces puede ser un medio de alta exposición para Hg. El Hg en la atmósfera y en el agua por lo regular se encuentra en niveles bajos que no constituyen un riesgo para la población en general (Mahaffey et al. 2009) Posibles afectaciones a la salud humana: neurotoxicidad, ataxia, dificultad para deglutir y para articular palabras. Problemas reproductivos, debilidad, pérdida de la visión y del oído, coma y muerte. Se puede presentar acrodinia en niños expuestos crónicamente a Hg inorgánico o a metilmercurio (ATSDR 1999, WHO 2011).
Nitratos (NO_3^-) Origen o fuente común: uso excesivo de fertilizantes nitrogenados. Basura y desechos orgánicos (Ward 2018) Posibles afectaciones a la salud humana: Metahemoglobinemia (cianosis), alteraciones en el sistema nervioso y el sistema circulatorio (WHO 2011).
Plomo (Pb) Origen o fuente común: usado en pigmentos, pinturas y lacas, como aditivo de gasolinas y en baterías. El Pb encontrado en el ambiente proviene principalmente de la actividad humana. La principal fuente de exposición de Pb para niños son las pinturas, mientras que en población en general es la comida y el agua (Ray y Maiti 2020). Se ha reportado el uso frecuente de ollas y utensilios de cocina con plomo en la población de Alpuyeca, Morelos (cercana a una de las zonas encuestadas) (Farias et al. 2014) Posibles afectaciones a la salud humana: los niños son más sensibles a los efectos tóxicos del Pb generando afectaciones en el sistema nervioso central (letargo, vomito, irritabilidad, pérdida de apetito,

mareos, ataxia, reducción en nivel de alerta, coma y muerte). En adultos genera principalmente neuropatías periféricas. Anemia, nefrotoxicidad, hipertensión, osteoporosis (ATSDR 2007).

Plaguicidas

Origen o fuente común: uso agrícola y/o ganadero. Residuos industriales y desecho inadecuado de recipientes de plaguicidas (Hernández et al. 2011)

Posibles afectaciones a la salud humana: sus efectos varían de acuerdo con el tipo de plaguicida. De manera general pueden causar: parálisis muscular, cáncer, efectos endocrinos y trastornos neurológicos (WHO 2011).

Radioactividad

Origen o fuente común: decaimiento natural de elementos radioactivos en la corteza terrestre como son: Uranio, Torio y Radón. Desechado incorrecto de material radioactivo de origen industrial, médico o militar (WHO 2011)

Posibles afectaciones a la salud humana: cáncer, daño renal, y trastornos óseos (Din-Chau et al. 2011).

Tolueno

Origen o fuente común: uso en pinturas, disolventes industriales, productos de limpieza (WHO 2011)

Posibles afectaciones a la salud humana: daño en el sistema nervioso, daño hepático, mareos y confusión (WHO 2011).

Tricloroetileno

Origen o fuente común: solventes industriales, desengrasantes, limpieza de metales (WHO 2011)

Posibles afectaciones a la salud humana: daño hepático y renal, cáncer de hígado y riñón, alteraciones en el sistema nervioso (WHO 2011).

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>

Brown S. E., y Cohen, S. J. (1996). Polychlorinated biphenyls and their effects on the environment. Environmental Health Perspectives, 104(6), 855-860.

ATSDR (1999) Toxicological profile for Mercury. Agency for toxic substances and disease registry, Atlanta Georgia, USA, pp. 485

ATSDR (2003). Toxicological profile for fluorides, hydrogen fluoride, and fluorine. Public Health Service. Agency for Toxic and Disease Registry. Atlanta, Georgia, USA. pp.

ATSDR (1995). Toxicological profile for polycyclic aromatic hydrocarbons. Public Health Service. Agency for Toxic and Disease Registry. Atlanta, Georgia, USA. 430 pp.

ATSDR (2007) Toxicological profile for Lead. Public Health Service. Agency for Toxic and Disease Registry. Atlanta, Georgia, USA. 508 pp.

ATSDR 2008. Toxicological profile for Aluminum. Public Health Service. Agency for Toxic and Disease Registry. Atlanta, Georgia, USA. 310 pp.

ATSDR 2008a. Toxicological profile for Manganese. Public Health Service. Agency for Toxic and Disease Registry. Atlanta, Georgia, USA. 506 pp.

ATSDR 2012. Toxicological profile for Cadmium. Public Health Service. Agency for Toxic and Disease Registry. Atlanta, Georgia, USA. 430 pp.

ATSDR 2012a. Toxicological profile for Chromium. Public Health Service. Agency for Toxic and Disease Registry. Atlanta, Georgia, USA. 502 pp.

ATSDR 2015. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) ToxFAQs. Public Health Service. Agency for Toxic and Disease Registry. Atlanta, Georgia, USA. 2 pp.

Berg M., Stengel, C., & Van Geen, A. (2001). Arsenic contamination of groundwater in Bangladesh: A review of the situation and its health impacts. *Journal of Health Science*, 47(5), 1024-1034.

Dinh-Chau N., Dulinski, M., Jodlowski, P., Nowak, J., Rozanski, K., Sleziak, M., & Wachniew, P. (2011). Natural radioactivity in groundwater—a review. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 47(4), 415-437.

Farías P., Álamo-Hernández U., Mancilla-Sánchez L., Texcalac-Sangrador J. L., Carrizales-Yáñez L. y Riojas-Rodríguez, H. (2014). Lead in school children from Morelos, Mexico: levels, sources and feasible interventions. *International journal of environmental research and public health*, 11(12), 12668-12682.

Guzmán-Hernández, M., González-Rocha, G., & Vázquez-Hernández, M. (2020). Bacterias coliformes fecales y su impacto en la salud pública. *Revista Mexicana de Salud Pública*, 62(3), 342-347.

Hernández F., de la Torre M. y Gómez, J. (2011). Contaminación por pesticidas en aguas subterráneas. *Ecología Aplicada*, 10(2), 221-231

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>

Jung M., Jung J. S., Schiller J. y Schroeder, I. S. (2016). Disease-Specific Stem Cell Models for Toxicological Screenings and Drug Development. *Stem Cells in Toxicology and Medicine*, 122-144.

Levin L. E., et al. (2005). Health effects of polycyclic aromatic hydrocarbons in environmental exposure. *Journal of Environmental Toxicology*, 24(2), 99-110.

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>

Mahaffey K. R., Clickner R. P. y Bodurow, C. C. (2009). A review of the literature on the effects of mercury on human health. *Environmental Health Perspectives*, 117(6), 149-155.

Mason C. (2009). Copper toxicity and health risks. *Journal of Environmental Science and Technology*, 35(6), 36-41.

Raj D. y Maiti S. K. (2020). Sources, bioaccumulation, health risks and remediation of potentially toxic metal (loid)s (As, Cd, Cr, Pb and Hg): an epitomised review. *Environmental monitoring and assessment*, 192(2), 108.

Rochester J. R. (2013). Bisphenol A and human health: A review of the literature. *Environmental Health Perspectives*, 121(3), 323-330.

Vandenberg L. N., et al. (2007). Human health effects of endocrine-disrupting chemicals: A critical review of the literature. *Endocrine Reviews*, 28(3), 280-316.

Ward M. H., Jones R. R., Brender J. D., De Kok T. M., Weyer P. J., Nolan B. T., ... y Van Breda S. G. (2018). Drinking water nitrate and human health: an updated review. *International journal of environmental research and public health*, 15(7), 1557.

WHO (2011). Guidelines for drinking-water Quality. World Health Organization. Fourth edition. Geneva, Switzerland. 564 pp

ANEXO 3. Principales tipos de contaminantes clasificados de acuerdo al tipo de fuente o actividad que los genera en la zona de estudio (Li et al. 2021, WHO 2011)

Desarrollos y actividades urbanas		
Tipo de actividad	Principales contaminantes	Tipo de aplicación o distribución de la carga contaminante
-Saneamiento de aguas grises y negras sin red cloacal. -Drenajes de aguas grises o negras con fugas. -Lagunas de oxidación de aguas residuales. -Descarga de aguas residuales en el suelo. -Aguas residuales Descargadas directamente a ríos o cañadas. -Lixiviaciones de basureros y de rellenos sanitarios. -Tanques de almacenamiento de combustibles. -Drenajes y sumideros de las carreteras.	Las aguas grises y negras de origen doméstico representan la principal carga contaminante. No se excluye a los posibles vertidos de negocios, talleres y fabricas hacia el drenaje público. Los basureros y rellenos sanitarios son de particular interés por la alta cantidad de residuos que pueden almacenar y la gran cantidad de lixiviados generados. Entre los contaminantes identificados se encuentran sustancias nitrogenadas, patógenos fecales y	Estos tipos de actividades se pueden presentar en localidades urbanas o rurales. En los ambientes urbanos es mayor la carga contaminante por la cantidad de estos generada. En la mayoría de los casos la distribución de contaminantes es puntual o difusa, pero es lineal en los sistemas de drenajes o si los lixiviados alcanzan un río o cañada.

	otros microorganismos, carga orgánica en general con alta demanda química y bioquímica de oxígeno, metales pesados y diversas sales minerales.	
--	--	--

Agricultura y ganadería

Tipo de actividad	Principales contaminantes	Tipo de aplicación o distribución de la carga contaminante
-Uso de agroquímicos, principalmente plaguicidas y fertilizantes. -Irrigación. -Uso de agua residuales para riego. -Uso de lodos y abonos provenientes de aguas residuales. -Actividades pecuarias. -Descarga de efluentes directamente al suelo. -Descarga de efluentes a ríos o cañadas.	Contaminación por compuestos nitrogenados y una alta carga de compuestos orgánicos que tienen alta demanda química y bioquímica de oxígeno. Metales pesados y diversas moléculas. La irrigación puede generar salinidad además de aumentar las concentraciones de arsénico y fluoruros.	Estas actividades se presentan principalmente en ambientes rurales. La distribución de la carga contaminante es difusa para los agroquímicos y para las actividades pecuarias, por lo que, para las actividades pecuarias, la distribución es puntual. Si los contaminantes alcanzan ríos o cañadas tendremos una distribución lineal. La carga contaminante es mayor en campos de cultivo intensivo y en granjas pecuarias.

Minería

Tipo de actividad	Principales contaminantes	Tipo de aplicación o distribución de la carga contaminante
-Alteración del régimen Hidráulico. -Descargas de agua de	El riesgo de contaminación es alto por metales pesados y	Se ha presentado tanto en zonas rurales como en urbanas. Se considera una contaminación

drenaje -Aguas de procesos y lagunas de lodos -Lixiviados generados en voladeros de residuos	diferentes sales minerales.	puntual o difusa, aunque no se debe descartar el riesgo de que los fluidos lleguen a cañadas y ríos
--	-----------------------------	---

Referencias

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>

WHO (2011). Guidelines for drinking-water Quality. World Health Organization. Fourth edition. Geneva, Switzerland. 564 pp

Capítulo 2

Evaluación de la vulnerabilidad y riesgo de afectación a la salud de los pobladores por el uso y consumo de agua no potable mediante la aplicación del cuestionario: Salud y Agua Subterránea

RESUMEN

El capítulo aborda la relación entre la calidad del agua subterránea y la salud poblacional en las inmediaciones a tres sitios dentro de la zona de estudio: el relleno sanitario Loma de Mejía (LM), el cerro del Jumil (CJ) y el basurero clausurado de Tetlama (BT). Desde un enfoque preventivo, se plantea que la vulnerabilidad del agua a contaminarse constituye un riesgo significativo para las comunidades que la utilizan como fuente de consumo. Para ello se aplicó el cuestionario “Uso y consumo de agua subterránea y salud poblacional” en 134 hogares, recopilando información sociodemográfica, hábitos de consumo, percepción de la calidad del agua y prevalencia de enfermedades asociadas al uso y consumo de agua contaminada o no potable.

Los resultados muestran diferencias entre los sitios estudiados. En CJ predominan enfermedades crónicas como diabetes e hipertensión, mientras que en LM y BT son más frecuentes problemas gastrointestinales y dermatológicos vinculados con el acceso limitado y la calidad deficiente del agua. Asimismo, la prevalencia de cáncer y enfermedades renales son mayores en BT. Los análisis estadísticos (Chi

cuadrada, correlaciones de Pearson y funciones discriminantes) evidencian algunas asociaciones significativas entre la ubicación de los hogares, las condiciones de vulnerabilidad hidrogeológica y la frecuencia de problemas de salud, además de correlaciones con variables socioeconómicas como ingreso y gasto en agua.

El estudio confirma que la salud de las personas está determinada por factores ambientales y sociales interrelacionados, siendo el agua un elemento central (WHO 2011). La investigación subraya la importancia de atender los riesgos de contaminación del acuífero desde una perspectiva preventiva, considerando tanto las condiciones hidrogeológicas como las dimensiones socioeconómicas de las poblaciones afectadas. Estos hallazgos aportan evidencia científica para orientar políticas públicas de gestión del agua y salud, priorizando la prevención y la protección de comunidades vulnerables.

INTRODUCCIÓN

En 1946 la Organización Mundial de la Salud (OMS) definió “salud” como: el completo estado de bienestar físico, mental y social y no solamente la ausencia de afecciones o enfermedades. Con esta definición nace un nuevo enfoque pasando de una concepción físico-biologicista a una dinámica que incluye factores psicológicos, socioeconómicos y culturales (OMS 1998). Este nuevo abordaje concuerda con el concepto de UNA SALUD propuesto por la misma OMS el cual nos indica que la salud humana está altamente relacionada a un ambiente natural equilibrado y a la salud de los animales, especialmente a los de tipo pecuario (Andrade et al. 2018, Li et al. 2022). El abordaje multicausal del fenómeno salud-enfermedad contempla una interrelación compleja de por lo menos cuatro factores: biología humana, medio ambiente, estilos de vida y sistemas de atención sanitaria. Se considera por lo tanto, que el estado de salud de una población está condicionado por una serie de elementos conocidos como los “determinantes socioeconómicos de la salud” que actúan de manera interdependiente, algunos de estos determinantes son: aspectos sociodemográficos, acceso a servicios públicos como electricidad, agua y drenaje, factores ambientales como la calidad de suelo, el agua y el aire, relaciones familiares y sociales, acceso y características del sistema educativo, ingreso monetario familiar así como características y acceso a un sistema de atención sanitaria (Moral et al. 2014, Urbina y González 2012).

El contar con agua potable en la cantidad y calidad requerida para el uso y consumo humano diario debe ser prioritario para cualquier población. La provisión de agua es un servicio básico para el desarrollo de toda comunidad e incluso, podemos decir, sin temor a exagerar, que es algo vital. La relación que tiene el agua que usamos y

bebemos con nuestra salud se ha estudiado, de manera tradicional, centrándose en las enfermedades agudas causadas directamente por su consumo como son: colera, fiebre tifoidea, hepatitis y diarreas (WHO 2011). Los procesos de potabilización se han enfocado en atender estos peligros microbiológicos, sin embargo, la presencia en muestras de agua de contaminantes como metales pesados, fluoruros, fármacos, plásticos y una gran variedad de nuevos compuestos químicos orgánicos que pueden presentarse, aun en bajas concentraciones, pero que son consumidos de manera prolongada, abren un nuevo nicho de investigación que debe evaluarse con el objetivo de disminuir el riesgo de afectación a la salud pública (Alarcón-Herrera et al. 2018, Vedagiri et al. 2018).

Tradicionalmente, una evaluación de riesgos ambientales se realiza posterior al registro de casos de intoxicación o afectaciones a la salud a pobladores por los contaminantes del ambiente o bien, cuando existe la evidencia de la presencia de contaminantes, en niveles o concentraciones, que podrían afectar la salud humana (Massone 2013). Estos modelos de evaluación ambiental han demostrado su efectividad al generar información científica que relaciona la presencia y exposición a sustancias contaminantes tóxicas para los seres humanos con los efectos negativos en su salud. Para el manejo correcto de los peligros contaminantes es importante, además de demostrar la relación del contaminante o sustancia tóxica con la afectación a la salud de los pobladores, informar a los habitantes de las poblaciones afectadas, así como a las instancias y tomadores de decisiones implicados para su correcta gestión o eliminación (Watanabe 2015). Además, siempre es recomendable atender los problemas de salud pública en sus fases

iniciales o, mejor aún, trabajar con una perspectiva preventiva. El presente trabajo es una evaluación de riesgo no convencional con un abordaje preventivo. La evaluación de la vulnerabilidad de contaminación del agua subterránea nos permite detectar esta problemática en una fase inicial o incluso antes de que se presente. También permite enfocar los recursos económicos y de operación en aquellos sitios o poblaciones con mayor riesgo de afectación. Por estos motivos, consideramos que el riesgo de afectación a la salud de pobladores, por el consumo de agua contaminada debe enfocarse, siempre que sea posible, en la prevención, trabajando directamente en los sitios con mayor peligro contaminante. Este abordaje nos permitirá, además, la intervención en la dimensión social al mismo tiempo que se proponen cambios o mejoras en el medio físico.

En esta investigación nos enfocamos en la posible relación entre la salud de los pobladores que habitan en las inmediaciones de sitios con alto peligro contaminante y el agua que consumen. Considerando lo anterior, se diseñó el presente trabajo el cual, es un análisis de riesgo no convencional en el que conjuntamos información de la dimensión hidrogeológica con la información sociodemográfica y del estado de salud de los pobladores de 3 zonas identificadas con alto riesgo de afectación al agua que usan y beben diariamente planteándonos las siguientes preguntas de investigación:

1. ¿Existen diferencias en las prevalencias de las afectaciones a la salud y enfermedades relacionadas con el uso y consumo de agua contaminada o no potable en los habitantes de tres sitios al interior de la zona de estudio?

2. ¿Existe relación entre los factores socioeconómicos, el agua que usan y beben con las prevalencias de afectaciones y problemas de salud referidas por las personas encuestadas en los tres sitios de estudio?

Los objetivos que nos planteamos con esta investigación son:

1. Conocer, mediante la aplicación de una encuesta, las condiciones socioeconómicas y demográficas, así como los hábitos del uso y consumo de agua, de los pobladores que habitan en inmediaciones de tres sitios con alto peligro contaminante al agua subterránea al interior de la zona de estudio.
2. Evaluar las posibles relaciones entre la vulnerabilidad de contaminación del agua subterránea y el estado de salud, así como con las condiciones socioeconómicas y demográficas de los pobladores en la zona de estudio.

JUSTIFICACIÓN

El agua potable es indispensable para la salud, el desarrollo social, económico y cultural de todas las personas. En la región de estudio, la principal forma de abastecimiento de agua potable es a través de la red del sistema municipal de agua potable, el cual extrae la misma directamente del acuífero a través de los pozos distribuidos en la región. Como resultado de la conjunción de las características

hidrogeológicas de la zona con las actividades realizadas en su superficie, existe la vulnerabilidad de contaminación del agua subterránea (GBM, 2002). Lo anterior puede elevar el riesgo de afectación a la salud de los pobladores que usan y beben esta agua (Massone, 2013). Este trabajo tiene un enfoque preventivo para evitar al máximo la afectación a la salud de las personas y del ambiente.

HIPÓTESIS

La salud de las personas depende de múltiples factores entre los cuales, la calidad del agua que usan y beben diariamente tiene gran importancia. Se encontrarán diferencias en las prevalencias de las enfermedades relacionados al uso y consumo de agua contaminada entre las personas que habitan en las inmediaciones de tres sitios con alto peligro contaminante. Las prevalencias de afectaciones y enfermedades serán mayores para los habitantes en la inmediación del basurero BT debido a un mayor tiempo de exposición de los pobladores y a que dicho sitio no cuenta con medidas para evitar la contaminación del agua subterránea.

MÉTODOS

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 Centro de

Investigación Transdisciplinar en Psicología (CITPsi) de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos (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 entrevistar a la madre de familia o tutora del hogar). Los criterios de inclusión fueron: ubicación del domicilio al interior de las áreas circulares delimitadas, tener al menos 5 años de residencia en la localidad, ser mayor de 18 años, aceptar participar y firmar el consentimiento informado del proyecto. Mediante la aplicación del instrumento se recopiló información sociodemográfica, hábitos de uso y consumo de agua, origen de la misma y el estado general de salud de pobladores, así como el conocimiento que se tiene sobre el agua subterránea y la percepción que tienen de su vulnerabilidad de contaminación.

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 a basureros y zonas con actividad minera como se describe en el **ANEXO 2** del capítulo del presente capítulo (Hopenhayn 2006, Xie et al. 2023). Se consideran afectaciones a la salud por contaminación microbiológica y química (metales pesados y otros elementos químicos). La selección de este tipo de contaminantes fue debido a que pueden generar problemas de salud de tipo agudo (diarreas, vómitos, infecciones en piel y salpullidos) y aumentar el riesgo en el desarrollo de enfermedades de tipo crónico como: enfermedad renal, diferentes tipos de cáncer, diabetes, hipertensión,

diferentes tipos de demencia, osteoporosis y enfermedad de Parkinson (Jaishankar et al., Xie et al. 2023). La información obtenida se analizó considerando la ubicación de los pobladores respecto a los 3 sitios con alto peligro contaminante, así como la dirección y sentido predominante de los SFAS en la región.

Se consultó la base de datos “Cubos Dinámicos” de la Dirección General de Información en Salud (DGIS) de la Secretaría de Salud de México, para obtener la información más actualizada sobre las principales causas de mortalidad y de morbilidad de las poblaciones cercanas a los sitios con alto peligro contaminante al interior de la zona de estudio.

Estructura del cuestionario “Uso y consumo de agua subterránea y salud poblacional”

El cuestionario aplicado consta de 22 secciones con la que se obtuvo la información detallada en el **ANEXO 4**.

La información obtenida con las encuestas aplicadas fue analizada, codificada y organizada en una base de datos creada con el software Microsoft Excel. La base de datos obtenida se guardó en un archivo de tipo CVS (del inglés, Comma Separated Values) para tener compatibilidad y analizar los datos con los programas RStudio y QGIS.

El cálculo de la prevalencia de las 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 cien. Para facilitar el análisis de las afectaciones de salud, se realizó la siguiente clasificación de las enfermedades consideradas: 1) problemas gastrointestinales: i. vómito y ii. diarrea; 2) problemas de la piel: i. piel reseca, ii. salpullido, iii. infecciones por hongos y iv. manchas negras en palmas de manos o plantas de los pies; 3) problemas renales: i. dificultad para orinar, ii. cálculos renales y iii. necesidad de diálisis; 4) problemas en el sistema nervioso: i. temblores, ii. insomnio, iii. ansiedad, iv. Demencia y v. enfermedad de Parkinson; 5) enfermedades metabólicas: i. anemia, ii. diabetes y iii. hipertensión; 6) cáncer; 7) problemas en huesos y dientes: i. osteoporosis, ii. dientes manchados por fluorosis dental y iii. dientes fracturados y 8) problemas de atención y comportamiento en estudiantes: i. hiperactividad, ii. dificultad en el aprendizaje, iii. falta de atención y iv. 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 3 sitios en donde se encuestó.

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 3 zonas estudiadas. El análisis de la base de datos se realizó con el programa de acceso libre R-studio (2020).

Descripción de la zona de estudio

Este trabajo se desarrolla con las personas que habitan al interior de tres zonas circulares con radio de 4 kilómetros las cuales tienen por centro los siguientes puntos:

- Relleno sanitario Loma de Mejía (LM; UTM -99.2751, 18.8998). Relleno sanitario que inició funcionamiento en el año 2008 y a donde actualmente se destinan los residuos sólidos urbanos del municipio de Cuernavaca, Morelos 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 no considerarlo adecuado logísticamente para el transporte y confinamiento de la basura (Morales 2023), además de considerar un riesgo alto de contaminación ambiental (SEMARNAT 2003, Pohle-Morales 2020). Este relleno sanitario se encuentra en operaciones al momento de realizar esta investigación. La población con mayor riesgo de afectación dentro del área circular con radio de 4 km con centro en LM es de 1323 personas en 385 viviendas habitadas como se describe en la **Tabla 1** y **Figura 1** (INEGI 2023).

Tabla 1. Localidades dentro del sitio encuestado LM. Datos obtenidos del sitio web: <https://www.inegi.org.mx/app/mapa/espacioydatos/default.aspx> con información del Censo Nacional INEGI 2020.

SITIO L. MEJIA			
Localidad	Número de	Número de	Municipio

	habitantes	viviendas habitadas	
Lomas de Sata Clara	63	17	Temixco
Santa Úrsula	1069	303	Temixco
La Parota	191	53	Temixco
TOTAL	1323	385	

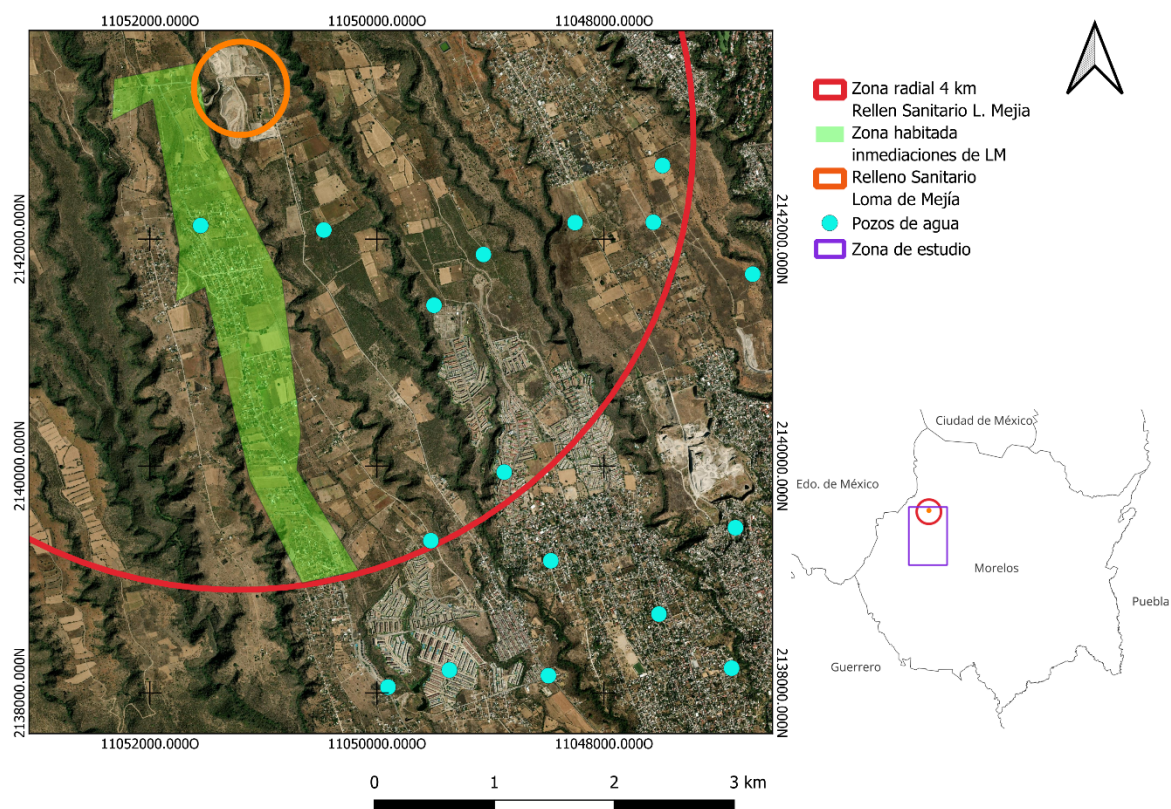


Figura 1. Ampliación de la zona del relleno sanitario Loma de Mejía (LM)

- Cerro del Jumil (CJ; UTM -99.2737, 18.7944). Se localiza a 17 km de la ciudad de Cuernavaca, Morelos. Esta zona se encuentra actualmente concesionada a una empresa minera que pretende iniciar la explotación de oro y plata. El inicio de actividades de esta mina se ha detenido debido a la no autorización de su manifiesto de impacto ambiental por el volumen de agua requerido para su funcionamiento y a disconformidades y protestas de pobladores de comunidades cercanas, que refieren carestía de agua y alto riesgo de contaminación ambiental. La población aproximada al interior del área circular de 4 km de radio de CJ es de 24,500 personas en 6,350 viviendas distribuidas en las localidades indicadas en la **Tabla 2** y **Figura 2** (AGEB-INEGI 2023).

Tabla 2. Localidades dentro del sitio encuestado CJ. Datos obtenidos del sitio web: <https://www.inegi.org.mx/app/mapa/espacioydatos/default.aspx> con información del Censo Nacional INEGI 2020.

SITIO C. Jumil			
Localidad	Número de habitantes	Número de viviendas habitadas	Municipio
Benito Juárez	771	195	Temixco
Unidad habitacional J. M. Morelos y Pavón	11,805	3097	Xochitepec
Aeropuerto	232	47	Temixco
La Esperanza	912	241	Xochitepec
Francisco Villa	1639	461	Xochitepec

Loma el Encanto	226	56	Xochitepec
Las Flores	906	227	Xochitepec
Unidad Jardines de Xochitepec	233	80	Xochitepec
Otras localidades dentro del círculo con radio de 4 km	7776	1946	Temixco y Xochitepec
TOTAL	24,500	6350	

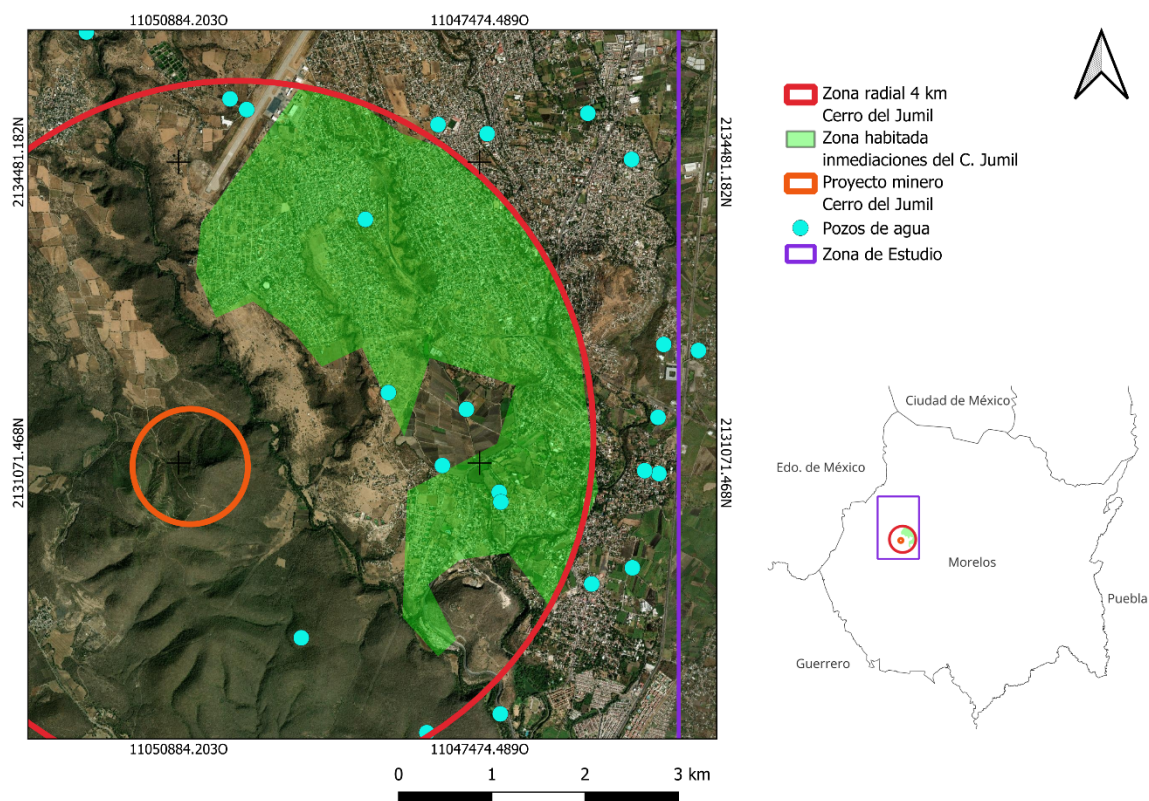


Figura 2. Ampliación de la región del Cerro del Jumil (CJ).

- Basurero clausurado de Tetlama (BT; UTM -99.2812, 18.7839). Este basurero dejó de recibir residuos sólidos urbanos en 2006 después de 35 años de actividad y posterior a las protestas de pobladores de las comunidades aledañas al mismo. Después de su clausura, se confinó ahí mismo la basura, conteniéndola y cubriéndola con tierra (Ochoa-Chi, 2014). La población aproximada al interior del área circular con radio de 4 km con centro en BT es de 2902 personas en 849 viviendas habitadas como se indica en la tablan 5 (INEGI 2023) (**Tabla 3 y Figura 3**).

Tabla 3. Localidades dentro del sitio encuestado BT. Datos obtenidos del sitio web: <https://www.inegi.org.mx/app/mapa/espacioydatos/default.aspx> con información del Censo Nacional INEGI 2020.

SITIO B. TETLAMA			
Localidad	Número de habitantes	Número de viviendas habitadas	Municipio
Humberto Gutiérrez	685	205	Xochitepec
Sta. Cruz Milpillas	343	92	Temixco
Cirenio Longares	1010	307	Miacatlán
Xochicalco	578	147	Coatetelco
Rodeo (hogares dentro del círculo con radio de 4 Km)	286	98	Miacatlán

TOTAL	2902	849	
-------	------	-----	--

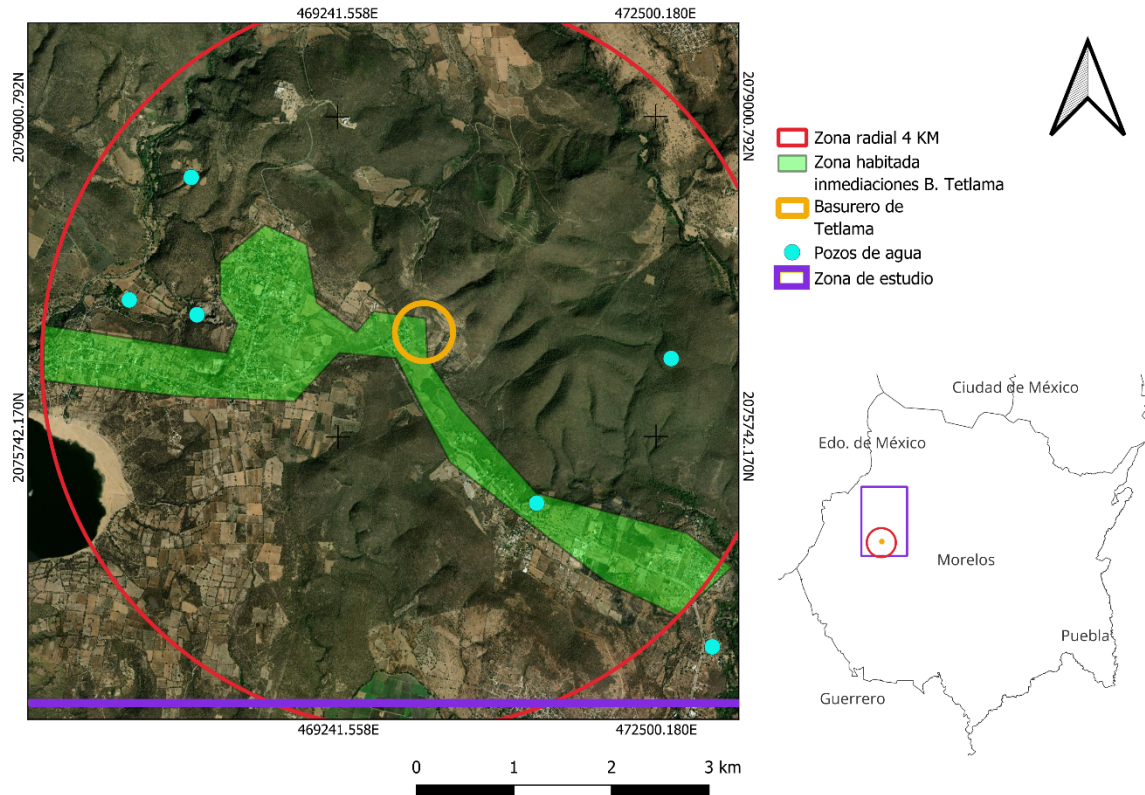


Figura 3. Ampliación de la región del basurero en Milpillas Tetlame (BT).

Se seleccionaron estos sitios debido a que, por la actividad, cantidad y tipo de contaminantes que tienen actualmente (y que se estima pueden acumular y/o generar), son un peligro de contaminación al agua subterránea (Parvin et al. 2021). Además, debido a que, por la dirección y sentido predominante de los flujos de agua subterránea (Morales-Casique et al. 2016), existe también, el riesgo de afectación a otras zonas urbanas con alta población.

Principales causas de morbilidad y mortalidad en poblaciones dentro de la zona de estudio obtenidas de la base de datos Cubos Dinámicos

El identificar las principales enfermedades y causas de muerte que presentan los habitantes dentro de la zona de estudio nos permite hacer un primer acercamiento al estado de salud general o poblacional. Si bien, como ya se expuso, la mayoría de las enfermedades crónicas son causadas por múltiples factores, con esta información podemos saber cuál es el tipo de enfermedad más frecuente en cada población estudiada la cual, puede relacionarse a alguna sustancia contaminante o grupo de estas (Xie et al. 2023) o bien, a alguna actividad o sitio con alto riesgo contaminante al cual se encuentran expuestos los habitantes (Alarcón-Herrera et al. 2020, Parvin et al. 2021).

Se obtuvieron las principales causas de morbilidad y mortalidad para los tres municipios en donde encontramos a las poblaciones más cercanas a cada uno de los 3 sitios con alto peligro contaminante considerados en este estudio: i) municipio de Temixco; donde se ubica la población con mayor riesgo de afectación por el relleno sanitario Loma de Mejía, ii) municipio de Xochitepec; donde se ubica la población con mayor riesgo de afectación por el proyecto minero en Cerro del Jumil y iii) municipio de Miacatlán; donde se ubica la población con mayor riesgo de afectación por el basurero clausurado de Tetlama.

Las principales causas de morbilidad se obtuvieron de la sección “Egresos Hospitalarios” de los cubos dinámico. En esta sección se reporta la principal causa

de consulta en las unidades médicas de la Secretaría de Salud. Se analizaron los datos del año 2024 en el caso de las morbilidades y del 2023 en el caso de las mortalidades para el cuales ya se tienen cifras definitivas. La agrupación geográfica menor se logró hasta nivel municipal. Para el cálculo de las tasas de prevalencias se emplearon los valores calculados en la misma base de cubos dinámicos. Se presentan las principales morbilidades de acuerdo con la Clasificación Internacional de Enfermedades (CIE-3) para Miacatlán, Temixco y Xochitepec. Las morbilidades y mortalidades obtenidas de la base de datos Cubos Dinámicos se presentan en el **Anexo 4** del presente capítulo.

RESULTADOS

Entre los meses de enero y octubre de 2023 se aplicaron 134 encuestas en hogares de las 3 poblaciones de estudio: i) inmediaciones del cerro del Jumil, CJ; ii) inmediación del relleno sanitario Loma de Mejía, LM; y iii) inmediaciones del basurero clausurado en Tetlama, BT (**Tabla 4**). La muestra total encuestada tiene un promedio de edad de 48.3 años entrevistándose a 113 mujeres y 21 varones. El promedio de años de residencia es de 26 años en CJ, 13 años en LM y 20 años en BT. El 95% de los hogares encuestados de CJ cuenta con el servicio de agua potable entubada, mientras que en LM y en BT, tienen este servicio sólo el 59% de hogares, teniendo que suplirlo o complementarlo con la compra de agua transportada a sus hogares en pipas.

Tabla 4. Datos generales de las 3 poblaciones encuestadas al interior de la zona de estudio.

	C. Jumil	L. Mejía	B. Tetlama
Hogares encuestados	59	38	37
Población considerada en el estudio	225	180	174
- Adolescentes y adultos	199	142	143
- 9 años o menos	26	38	31
Conocimiento de relación entre consumo de agua y su salud	93%	94%	94%

Los principales medios de almacenamiento de agua en los hogares son en tinacos de plástico y en cisternas de cemento. El empleo de tinacos de asbesto sólo se reportó en CJ. (**Tabla 5**)

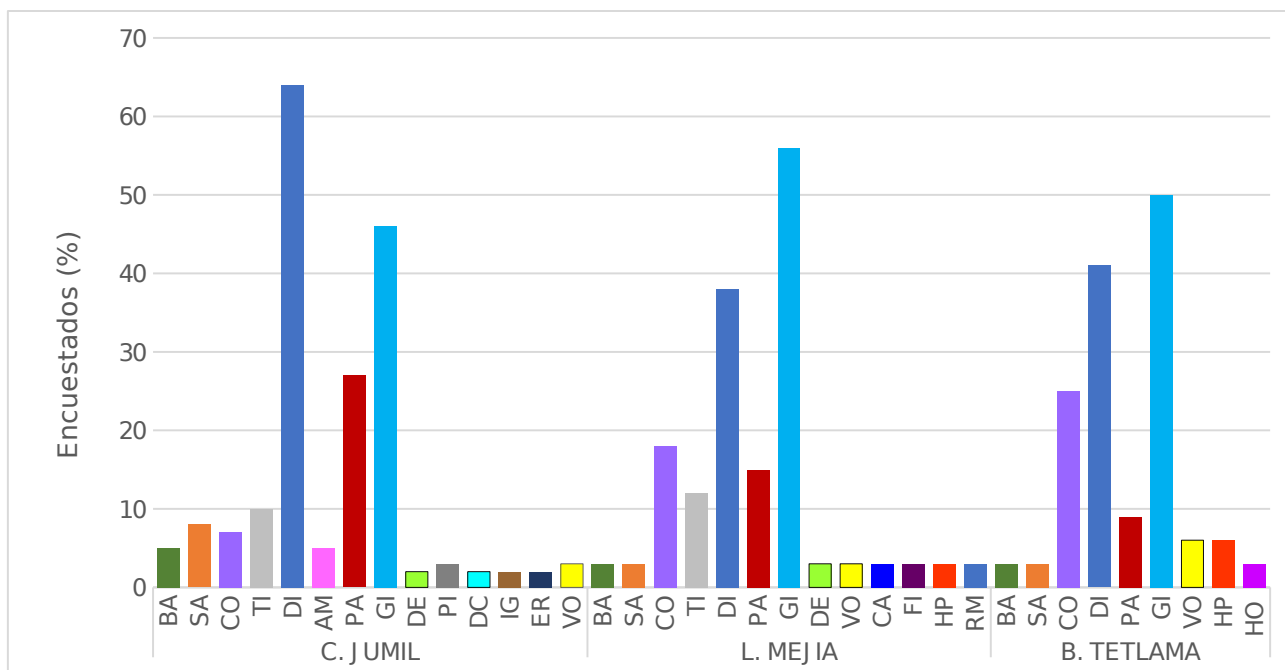
Tabla 5. Medios de almacenamiento para el agua empleados en los hogares encuestados (porcentaje de hogares que presentan ese medio de almacenamiento)

	CJ (%)	LM (%)	BT (%)
Tinaco de plástico	75	74	41
Tinaco de asbesto	10	0	0
Cisterna de cemento	54	63	46

Cisterna de plástico	0	6	0
Pileta de cemento	25	22	14
Tambo de lámina	3	8	3
Tambo de plástico	5	32	14
Cubetas de plástico	25	22	14

El agua que beben en el 95% de los hogares encuestados de CJ y BT es de garrafones (principalmente de negocios de purificadoras locales) mientras que en LM es el 56%, teniendo como principal opción, beber agua de la red pública (principalmente hervida). Respecto a la calidad del agua que reciben los hogares, en 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 en donde refieren que el agua es de “mala calidad” ya que esta proviene de un canal y frecuentemente llega turbia y/o con aroma a pescado.

El 94% de la población total encuestada responde 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 especifiquen las afectaciones a la salud que conocen o han escuchado por el consumo de agua contaminada o no potable, la principal respuesta fue “dolor” y/o “infecciones de estómago”, seguido de “diarreas”, “cólera”, “infecciones” y “parásitos”. Soló 3 personas refieren “cáncer”, mientras que, “problemas renales”, “presencia de plomo” y “retraso mental” fueron referidos en una sola ocasión como se muestra en la **Figura 4**.



BA: Bacterias	AM: Amebas	DO: Dolor de cabeza	FI: Fiebre
SA: Salmonelosis	PA: Parásitos	IG: Infección generalizada	HP: Hepatitis
CO: Cólera	GI: Gastrointestinales	ER: Enfermedad o daño renal	RM: Retraso mental
TI: Tifoidea	DE: Dengue	VO: Vómito	HO: Hongos
DI: Diarreas	PI: I. Piel	CA: Cáncer	

Figura 4. Enfermedades y problemas de salud relacionados al consumo de agua contaminada o no potable (conocimientos de las personas encuestadas).

En la **Figura 5** se presenta la prevalencia (número de casos referidos entre el número de encuestados en cada grupo, multiplicado por 100). Se consideran 25 enfermedades o afectaciones a la salud de las cuales, se pidió a los encuestados respondieran, si ellos o algún miembro de su familia han presentado dicho padecimiento. Para los hogares encuestados, ubicados en CJ, las principales

afectaciones a la salud referidas son: diabetes (11.6 %), piel reseca (9.8 %), hipertensión (8 %), ansiedad (7.6 %), insomnio (6.7 %), dientes fracturados (6.7 %) y dificultad para orinar (4 %). Para los hogares encuestados ubicados en LM, las principales afectaciones a la salud referidas son: diarreas (13.9 %), piel reseca (12.8 %), diabetes (8.3 %), salpullido (7.2 %), hipertensión (6.7 %), insomnio (5 %), vómito (4.4 %) y dificultad o problemas de aprendizaje en estudiantes (4.4 %). Para los hogares encuestados en BT, las principales afectaciones a la salud referidas son: diarreas (8 %), dificultad para orinar (7.5 %), hipertensión (7.5 %), diabetes (7 %), salpullido (7 %), dientes fracturados (6.3 %), insomnio (5.8 %) y piel reseca (5.8 %). Considerando a la población total (579 habitantes) de los tres sitios estudiados, las afectaciones a la salud referidas con mayor frecuencia son: 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 son: 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 de cáncer, se refieren, para la población total 9 casos (1.6 %), de los cuales, 5 casos (2.9 %), se ubican en BT; 2 casos, (1.1 %), en L. Mejía y 2 casos (0.9 %), en CJ.

PREVALENCIA DE AFECTACIONES A LA SALUD REFERIDAS POR ENCUESTADOS

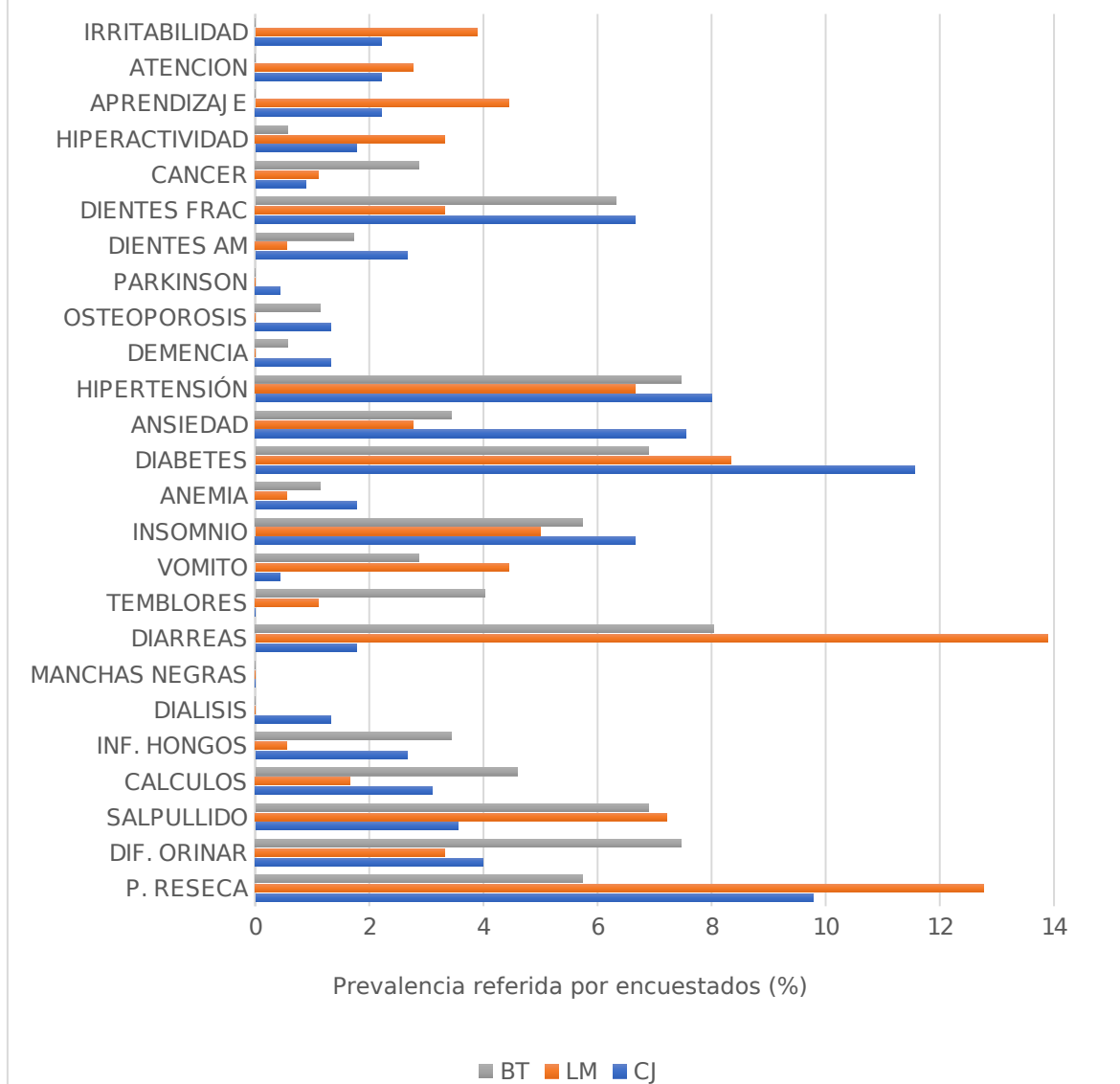


Figura 5. Prevalencia de afectaciones a la salud referidas por encuestados. Los resultados graficados corresponden a la frecuencia referida dividida entre el tamaño de muestra (pobladores considerados en la encuesta para cada sitio) y multiplicado por 100

En la **Figura 6** se presentan las prevalencias de las afectaciones de salud agrupadas en los tres sitios encuestados.

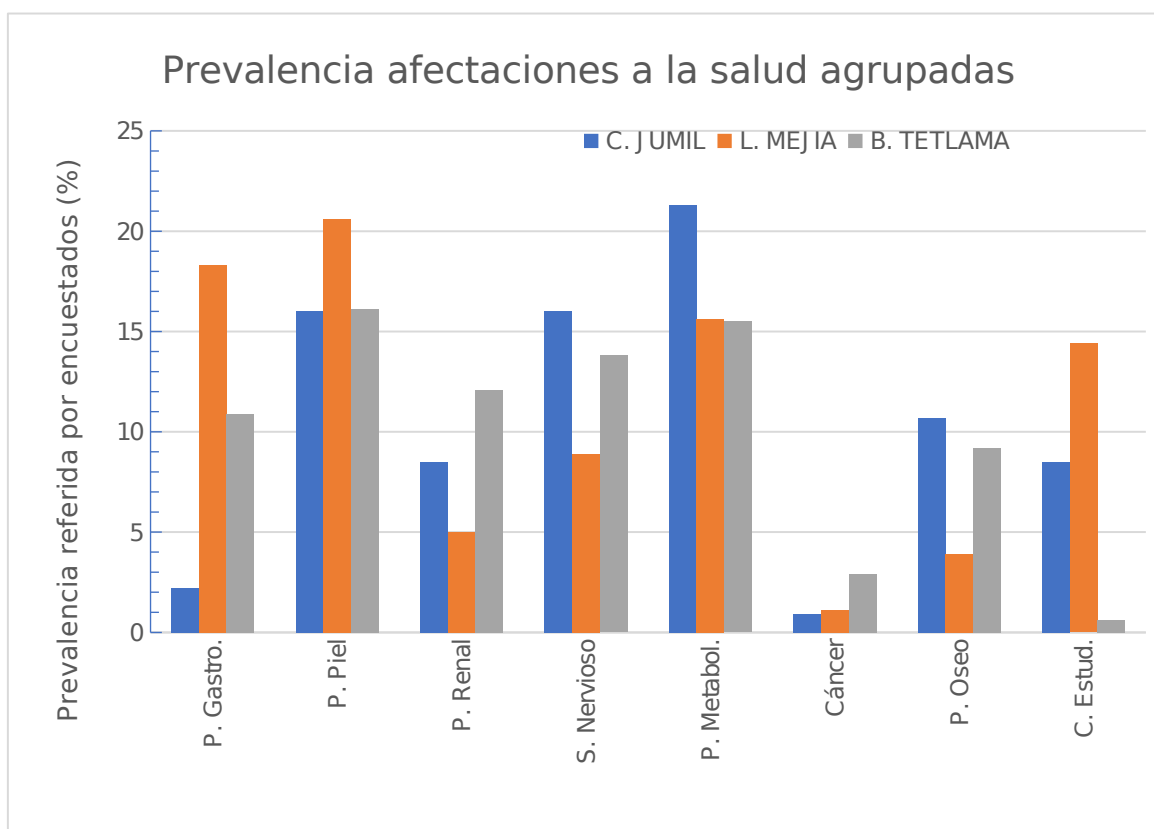


Figura 6. Prevalencia de afectaciones a la salud (agrupados por tipo afección) referidas por encuestados. Frecuencia referida dividida entre el tamaño de muestra (pobladores considerados en la encuesta para cada sitio) y multiplicado por 100

Los resultados de las prevalencias de afecciones y enfermedades encuestadas en los tres sitios de estudio se ponen a prueba para saber si existen diferencias con el estadístico chi cuadrado. Los resultados en donde se encuentran diferencias significativas estadísticamente se presentan en la **Tabla 6**.

Tabla 6. Resultados de comparación de grupos con el estadístico Chi Cuadrada

	Chi	Valor p
	Cuadrado	
Comparación LM - CJ		
Problemas Gastrointestinales	28.66	≤ 0.005
Problemas en Sistema Nervioso	3.91	≤ 0.05
Problemas en Huesos y/o Dientes	5.58	≤ 0.05
Comparación BT - CJ		
Problemas gastrointestinales	11.64	≤ 0.005
Problemas de comportamiento en estudiantes	11.16	≤ 0.005
Comparación LM - BT		
Problemas renales	4.83	≤ 0.05
Problemas de comportamiento estudiantes	22.23	≤ 0.005

Análisis correlacional entre variables

Se realizó un análisis correlacional de Pearson entre todas las variables consideradas en el estudio. El análisis de correlaciones se realizó empleando tanto las prevalencias de salud de forma independiente como agrupadas. En la **Figura 7** se presenta los resultados de las correlaciones de Pearson entre todas las

variables contempladas en el estudio. En la **Figura 8** se presenta los resultados de las correlaciones de Pearson entre las variables del estudio con las variables de salud agrupadas de acuerdo a su tipo. En ambos cuadros de correlaciones se muestran únicamente los resultados con significancia estadística ($p \leq 0.05$).

Las principales correlaciones positivas con significancia estadística ($p \leq 0.05$), son los problemas de comportamiento en estudiantes PCDA-PCIRR (0.75), PCDA-PHIP (0.69) y PCDA-PCFA (0.62). En enfermedades gastrointestinales se encuentra la correlación PVO-PDIAR (0.48). Otras correlaciones observadas entre problemas de salud son: PDAM-PIH (0.44), PPARK-POST (0.44), PDAM-PDEM (0.41), PDAM-PANE (0.40), PVO-PPR (0.36), PANE-PDEM (0.35), PHIPER-PCAL (0.32), PIH-PPS (0.3) y PCDA-PH (0.28). Se encuentra una correlación de 0.65 en VUL-ZONA, y en lo que respecta a correlaciones con la cuestión monetaria, la correlación PPS-CAPT es de 0.38 y PCAL-CATP de 0.3. Se observa también la correlación AE-IM (0.42). Las principales correlaciones negativas con significancia estadística ($p \leq 0.05$) son SA-VUL (-0.5), AR-VUL (-0.39), SA-ZONA (-0.38), AE-PANE (-0.23). Tres de los problemas de conducta en estudiantes se correlacionan de forma negativa con los años de residencia: PCFA-AR (-0.25), PCIRR-AR (-0.23) y PCDA-AR (-0.21).

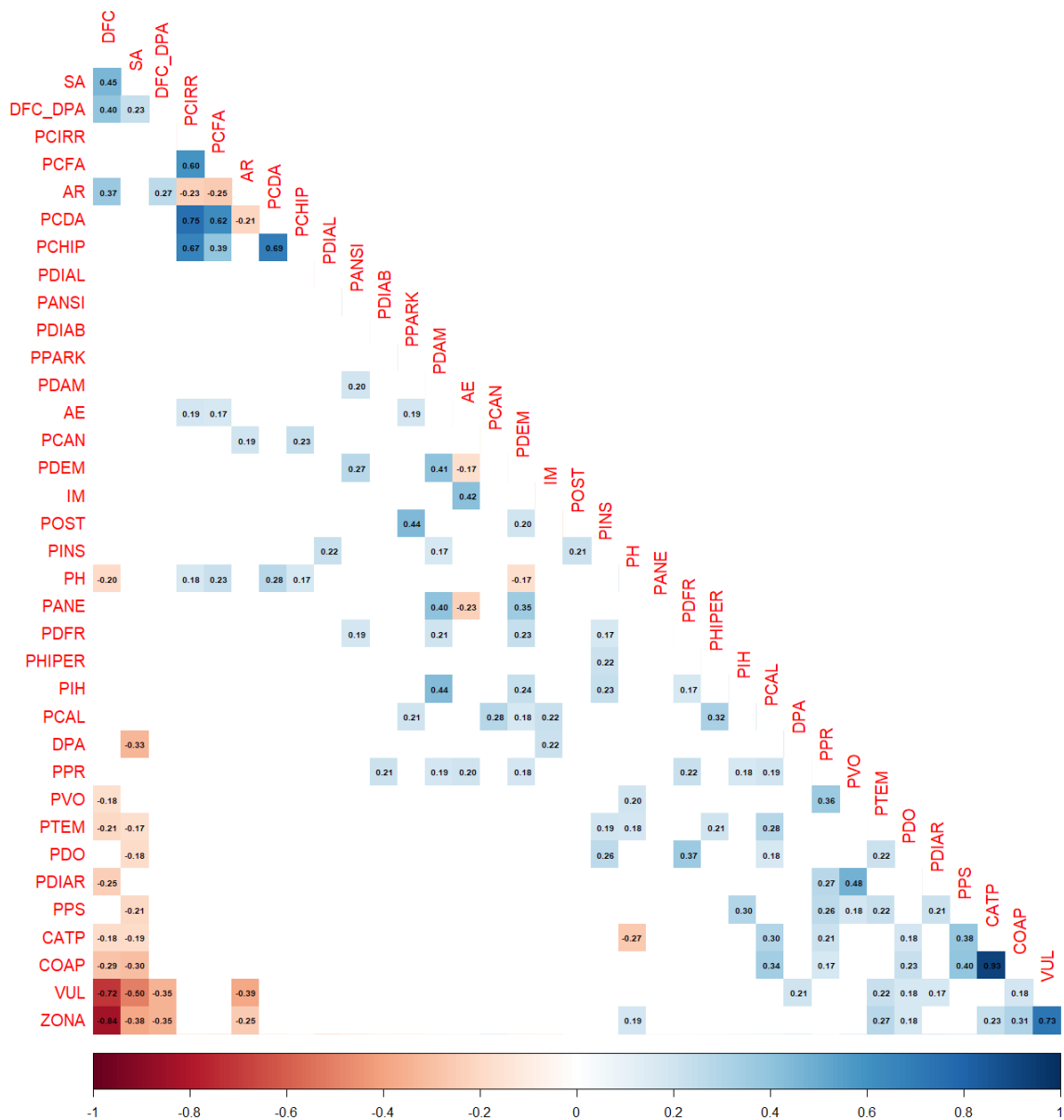
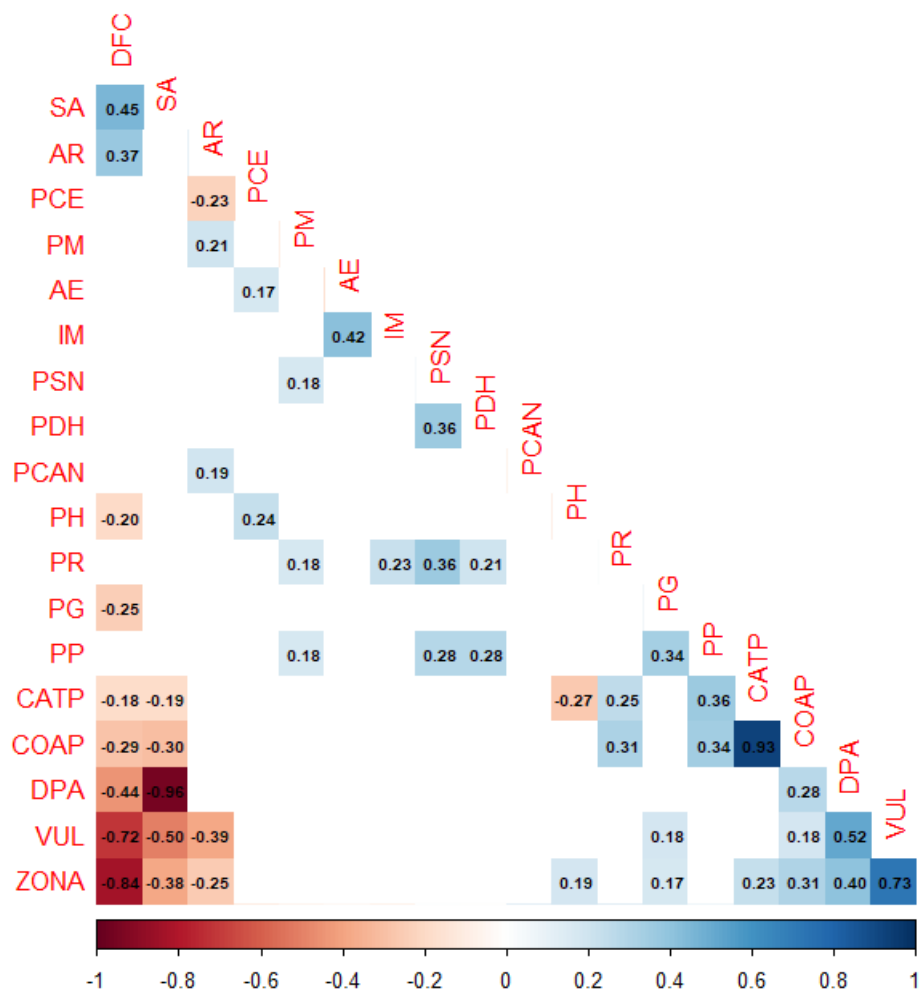


Figura 7. Cuadro de correlaciones de Pearson entre variables. Correlaciones considerando todas las afectaciones de salud encuestadas.

Al agrupar los problemas o afecciones de salud se obtienen las siguiente correlaciones con significancia estadística: PPIEL-CATP (0.36), PSNER-PREN (0.36), PDYH-PSNER (0.36), PGAS-PPEL (0.34), PREN-COAP (0.31), PDYH-

PPIEL (0.28), PSNER-PPIEL (0.28), PCEST-PH (0.24). No se observan correlaciones con significancia estadística entre, las variables contempladas y PMET, PCAN y PCEST.



Figura

8 . Resultados de correlaciones de Pearson entre variables. Correlaciones considerando las afectaciones de salud encuestadas agrupadas. Se presentan únicamente las correlaciones con significancia estadística $p \leq 0.05$.

Análisis de funciones discriminantes (FDA)

Se realizó un análisis estadístico multivariado de funciones discriminantes con los datos de 18 variables obtenidos con las encuestas aplicadas. Se estableció como variable dependiente categórica de agrupamiento a el sitio de aplicación: BT, CJ y LM. En el Anexo Y de este capítulo se presenta el código empleado para el análisis FDA usando el programa RStudio.

La dimensión 1 del gráfico obtenido con el análisis FDA explica el 98 % de la varianza de la muestra total lográndose una separación clara entre los hogares encuestados en CJ respecto a los hogares de BT y LM. Las variables que más contribuyen en la separación de los grupos en la dimensión 1 son: 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 3 sitios encuestados, se sometió a las 18 variables del modelo FDA a un análisis multivariado de varianza (MANOVA) resultando diferencias entre grupos ($p \leq 0.05$) en las variables: DFC, AR, SA, PH, COAP, CATP, VUL, PG y PCE. (**Figura 9 y Tabla 7**)

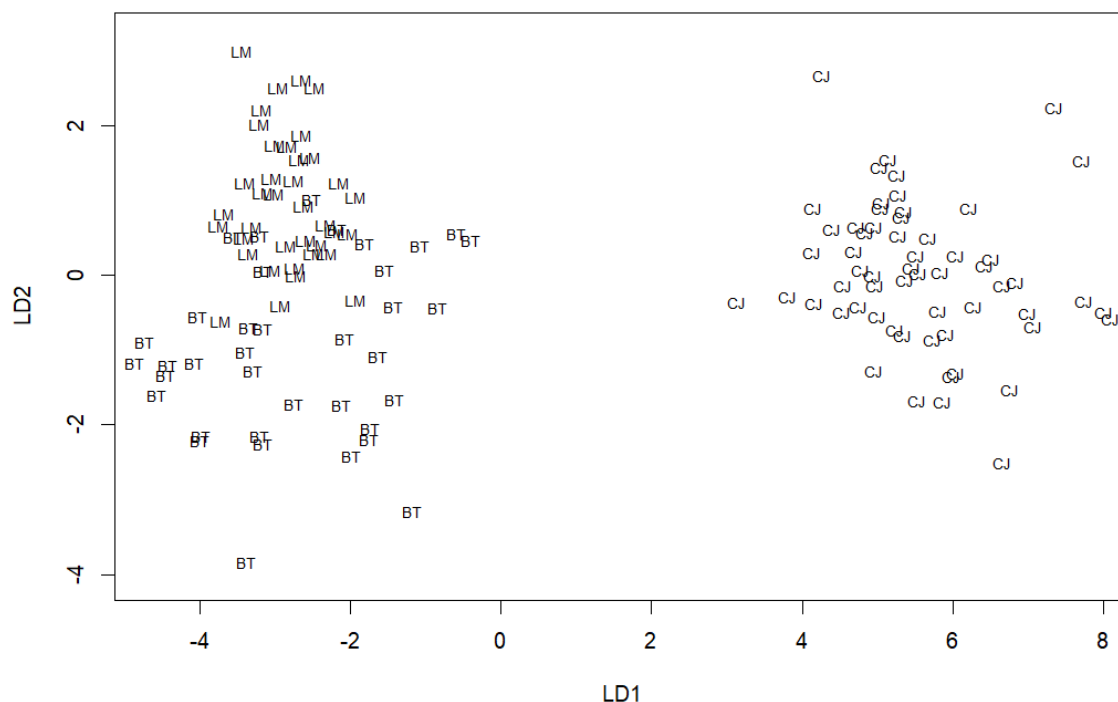


Figura 9. Gráfica en plano del análisis de funciones discriminantes (FDA). Ordenamiento de los hogares encuestados en Cerro de Jumil (CJ), Loma de Mejía (LM) y Tetlama (BT). Dimensión Lineal 1(LD1), Dimensión Lineal 2 (LD2)

Tabla 7. Importancia relativa de las 18 variables consideradas en la clasificación intergrupar del análisis de funciones discriminantes (FDA). Se identifica con asterisco a las variables cuyos valores muestran diferencias con significancia estadística ($p \leq 0.05$) al realizar un análisis multivariado de varianzas (MANOVA).

Variable	Dimensión 1	Dimensión 2
Distancia del hogar al foco contaminante (DFC)*	0.000833	-1.04E-04

Distancia del hogar al pozo de abastecimiento (DPA)	-0.000363	1.50E-05
Años de residencia de persona encuestada (AR)*	-0.007835	-2.21E-02
Años de estudio de persona encuestada (AE)	-0.008659	4.06E-02
Contar en hogar con servicio público de agua (SA)*	-0.597372	-2.17E-01
Número de personas en el hogar (PH)*	-0.07348	-2.39E-01
Gasto económico mensual para abastecimiento alternativo de agua, por persona (COAP)*	-0.004435	9.17E-03
Gasto económico mensual en agua por persona (CAPT)*	0.003611	-1.04E-02
Ingreso monetario mensual en el hogar encuestado (IM)	-0.107184	1.62E-02
Nivel de vulnerabilidad DRASTFU en el que se ubica el hogar encuestado (VUL)*	-0.587832	-5.52E-01
Problemas de salud gastrointestinales, agrupados (PG)*	0.058597	1.37E-01
Problemas de salud en piel, agrupados (PP)	-0.124086	2.57E-01
Problemas de salud en riñones y vías urinarias, agrupados (PR)	0.117832	-4.82E-01
Problemas de salud relacionados	0.130467	-1.58E-01

con el sistema nervioso, agrupado (PSN)		
Problemas de salud metabólicos, agrupados (PM)	0.153061	2.39E-01
Problemas de salud, cáncer (PCAN)	-0.75266	-6.06E-01
Problemas de salud en dientes y/o huesos, agrupados (PDH)	0.013632	-1.92E-01
Problemas de comportamiento en estudiantes (PCE)*	0.07512	5.47E-01

DISCUSIÓN

Los resultados de esta investigación demuestran que la vulnerabilidad de contaminación del agua subterránea no debe evaluarse únicamente desde la perspectiva hidrogeológica, como lo han hecho tradicionalmente modelos como DRASTIC (USEPA, 1987) y sus adaptaciones posteriores (Foster et al., 2013), sino que es indispensable incorporar dimensiones socioeconómicas y de salud poblacional. Estudios previos (Massone, 2013; Appelo y Postma, 2004) han evidenciado la relación entre contaminantes ambientales y enfermedades en pobladores, sin embargo, dichos enfoques han sido generalmente reactivos, aplicándose después de detectarse daños a la salud o la presencia confirmada de contaminantes. El presente trabajo, en contraste, adopta un abordaje preventivo al integrar la vulnerabilidad hidrogeológica (a través del modelo DRASTFU) con las condiciones sociodemográficas y las prevalencias de enfermedades reportadas en

la población, permitiendo identificar de manera anticipada las áreas y grupos en mayor riesgo.

Los hallazgos indican que existen diferencias significativas en la prevalencia de enfermedades entre las tres zonas de estudio (BT, LM y CJ), especialmente en problemas gastrointestinales, renales y de comportamiento en estudiantes, lo cual concuerda con la literatura que asocia la exposición prolongada a contaminantes del agua con afectaciones crónicas de carácter multiorgánico (Jaishankar et al., 2014; Xie et al., 2023). La identificación de correlaciones estadísticas entre variables de vulnerabilidad, acceso al agua, condiciones socioeconómicas y prevalencias de enfermedades constituye un aporte metodológico relevante, al evidenciar la compleja interacción de los determinantes sociales de la salud (Moral et al., 2014; Urbina y González, 2012).

Asimismo, la inclusión de la percepción social sobre la calidad del agua y la identificación de prácticas de almacenamiento y consumo doméstico representan un valor agregado respecto a investigaciones anteriores, que en su mayoría se han limitado al análisis químico o microbiológico del recurso (Vedagiri et al., 2018; Alarcón-Herrera et al., 2018). Este enfoque mixto ha permitido evidenciar la desigualdad en el acceso al agua potable, la dependencia del suministro mediante pipas en algunos sectores y los costos económicos adicionales que enfrentan las

familias, aspectos poco documentados en estudios de vulnerabilidad hidrogeológica.

En comparación con investigaciones previas que abordan exclusivamente contaminantes específicos (Li et al., 2022; Parvin et al., 2021), este estudio integra una visión multidimensional, lo que ofrece una mayor aplicabilidad práctica para la gestión pública. De esta forma, la metodología propuesta no solo identifica áreas vulnerables desde el punto de vista hidrogeológico, sino que las vincula con riesgos reales para la salud y el bienestar de las comunidades.

En suma, este trabajo demuestra que la vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea es un fenómeno multidimensional que requiere de abordajes inter y transdisciplinarios, combinando la hidrogeología con la epidemiología ambiental, la sociología y la economía. Esta aproximación representa un avance significativo frente a los modelos tradicionales, ya que permite priorizar acciones preventivas y focalizar recursos en las comunidades más expuestas.

CONCLUSIONES

La investigación confirma la existencia de diferencias estadísticamente significativas en la prevalencia de enfermedades entre las poblaciones estudiadas, lo cual sugiere una relación entre la vulnerabilidad hidrogeológica del agua subterránea y la salud de los pobladores.

El modelo DRASTFU, al integrarse con información socioeconómica y de salud, ofrece una herramienta robusta para la identificación de áreas críticas, superando las limitaciones de modelos hidrogeológicos convencionales.

La percepción social y las prácticas domésticas de almacenamiento y consumo de agua constituyen factores clave que modulan la exposición a riesgos, y deben ser consideradas en las evaluaciones de vulnerabilidad y riesgo ambiental.

Los resultados obtenidos demuestran que la metodología utilizada es aplicable en contextos donde los recursos para el monitoreo directo de contaminantes son limitados, proporcionando un mecanismo preventivo de gestión del recurso hídrico y de protección de la salud pública.

El enfoque multidimensional empleado constituye un aporte metodológico a la literatura sobre vulnerabilidad del agua subterránea, al vincularla con determinantes sociales de la salud y resultados epidemiológicos poblacionales.

Las afectaciones descritas constituyen una amenaza directa al derecho humano al agua reconocido en el artículo 4° de la Constitución Política de los Estados Unidos

Mexicanos. La reducción de la cantidad disponible atenta contra el criterio de suficiencia; la degradación de la calidad atenta contra el criterio de salubridad.

Otro punto que consideramos importante mencionar es la posible injusticia en el acceso a la información. La contaminación del agua subterránea por metales pesados como cadmio y arsénico no produce cambios visibles ni de olor ni de sabor hasta que las concentraciones alcanzan niveles altos; el descenso del nivel freático es invisible para quienes no cuentan con instrumentos de medición. La falta de acceso a información ambiental oportuna, accesible y comprensible es en sí misma una dimensión de injusticia ambiental reconocida por el Acuerdo de Escazú (suscrito por México en 2021), que garantiza el derecho de acceso a la información, la participación pública y el acceso a la justicia en materia ambiental (Roa-García 2021).

Recomendaciones para futuros trabajos

Realizar estudios longitudinales que permitan establecer relaciones causales entre exposición a contaminantes del agua subterránea y enfermedades crónicas en la población.

Ampliar el análisis a otros sitios de riesgo y replicar la metodología en diferentes regiones para validar la utilidad del modelo en distintos contextos hidrogeológicos y socioculturales.

Incorporar análisis químicos y microbiológicos directos del agua, complementando la información de vulnerabilidad y percepción social con datos objetivos de calidad

del recurso. Esto debe realizarse mediante muestreos continuos tanto al agua subterránea (en sitios seleccionados de la cuenca) como a la que se encuentra en la red de abastecimiento público

Integrar indicadores de cambio climático y urbanización, considerando los posibles efectos en la recarga, calidad y disponibilidad del agua subterránea.

Desarrollar programas de educación ambiental y de salud dirigidos a las comunidades locales, orientados a mejorar las prácticas de almacenamiento, consumo y protección del recurso hídrico. Estos programas deben incluir el manejo y gestión apropiados del agua para mantenerla en la calidad y cantidad requeridas en su consumo y uso diario.

Promover la articulación del modelo con políticas públicas de ordenamiento territorial, gestión de residuos y concesiones mineras, para fortalecer la prevención de riesgos socioambientales.

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>

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>

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>

Li P., Wu J. y Shukla, S. (2022). Achieving the one health goal: highlighting groundwater quality and public health. *Water*, 14(21), 3540.

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*

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>

OMS (1998). *Glosario de promoción de salud*. Organización Mundial de la Salud. [en línea] <https://recs.es/wp-content/uploads/2017/05/glosario.-promocion-de-la-salud.pdf> el día 15 de noviembre de 2023.

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>

Roa-García, M. C., & Murcia-Riaño, D. M. (2021). El Acuerdo de Escazú, la democracia ambiental y la ecologización de los derechos humanos. Naturaleza y Sociedad. Desafíos Medioambientales, (1), 43-85.

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

Urbina F. M. y González B. M. (2012). La importancia de los determinantes sociales de la salud en las políticas públicas. Instituto Nacional de Salud Pública. Morelos, México. 131 pp,

Vedagiri U. K., Anderson R. H., Loso H. M. y Schwach, C. M. (2018). Ambient levels of PFOS and PFOA in multiple environmental media. Remediation Journal, 28(2), 9-51.

Watanabe M. (2015). Gestión del riesgo de desastres en ciudades de América Latina. Apuntes de investigación, 4, 1-15.

WHO (2011). Guidelines for drinking-water Quality. World Health Organization. Fourth edition. Geneve, Switzerland. 564 pp

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>

ANEXO 1. Cuestionario: Uso y consumo de agua subterránea y salud poblacional

Código de vivienda: _____

Edad: _____ Sexo: _____

Ocupación: _____ Ubicación o zona: _____

Años de residencia en la zona: _____ *En caso de tiempo de residencia <5 años, lugar anterior de residencia _____

Escolaridad (nivel o grado máximo de estudios):

1-Considerandose usted mismo(a), cuantas personas viven en este hogar?

Adultos () Niños menores de 9 años ()

2-¿Cuenta en su hogar con servicio de agua conectado a una red pública? Si ()
No ()

3-Si su hogar no está conectado a la red pública de agua ¿de dónde proviene el agua que usan en su hogar?

4-¿Cuenta con algún medio para almacenar agua como son?

Tinaco plástico () Cisterna cemento ()

Tinaco asbesto () Cisterna plástica ()

Otro: _____

5-¿Utiliza alguno o varios de estas medios para abastecerse de agua?

Pipa () Pozo en casa () Manantial () río o arroyo ()

Bordo o estanque () Lago o Presa () Otro: _____

6-El agua que utiliza para BEBER en este hogar es principalmente de:

Pozo () Manantial () Llave de la red pública ()

Garrafón o embotellada () otra: _____

7-¿Le aplican algún tratamiento al agua que utilizan para beber? No ()

Si ()

¿Cuál?

8.- ¿La calidad del agua que usan en este hogar para higiene, bañarse y actividades diversas (no para beber) es?

Muy mala () Mala () Regular () Buena () Excelente ()

9.- ¿ La calidad del agua que utilizan en este hogar para beber es?

Muy mala () Mala () Regular () Buena () Excelente ()

10-¿El agua que normalmente beben en este hogar presenta alguna?

Coloración No () Si () Especifique:_____

Sabor No () Si () Especifique:_____

Aroma No () Si () Especifique:_____

11. -¿El agua que normalmente usan en este hogar para lavado, higiene y actividades diversas (no para beber) presenta alguna?

Coloración No () Si () Especifique:_____

Aroma No () Si () Especifique:_____

12-A la semana aproximadamente ¿Cuánta agua beben en su hogar (un garrafón son 20 litros)?

13-Normalmente ¿qué agua utilizan en este hogar para cocinar?

Garrafón o embotellada () Red pública () Pozo ()
Otra:_____

14-¿Sabe usted si el tomar agua contaminada o no potable, genera o puede generar alguna enfermedad? No () Si () ¿Cuáles?

15- ¿Usted o algún miembro de su familia ha padecido o padece alguna de las siguientes afectaciones a la salud?

*Piel reseca ()

*Dificultad para orinar ()

*Salpullido ()
riñones ()

*Cálculos o piedras en

*Infecciones por hongos ()
renal ()

*Necesidad de diálisis

*Manchas negras en palmas o plantas de los pies ()
continuas () *Temblores de pies o manos ()

*Diarreas frecuentes o

*Vómito frecuente o continuo

*Insomnio Frecuente ()

*Anemia ()

*Diabetes ()

*Incremento de ansiedad o agresividad ()

*Hipertensión ()

*Demencia ()

*Osteoporosis ()

*Parkinson ()
dientes ()

*Manchas o coloración amarilla en

dientes ()

*Despostillamiento o fractura de

*Cáncer () en caso afirmativo, favor de contestar lo siguiente:

-Tipo o localización:_____

-Edad a la que se diagnostica:_____

-Ocupación:_____

*Si en el hogar hay quien estudie primaria o secundaria, ¿ha notado o le han comentado cuestiones de?

- Hiperactividad ()

-Dificultad para aprender ()

- Falta de atención ()

-Irritabilidad frecuente ()

17 ¿Sabe usted que es el “agua subterránea” y cuál es su importancia?

18. ¿Sabe usted como puede contaminarse el agua subterránea?

19. ¿Considera que usted o su familia pueden hacer algo para cuidar o mantener la calidad y cantidad del agua subterránea?

20. ¿Ha notado algún cambio tanto (+ o -) en su comunidad debido al tiradero de basura clausurado de Tetlama?

22. El ingreso monetario mensual que tiene en su hogar es: Menor a \$5000 ()
Entre 5 y 10 mil ()

Entre 10 mil y 15 mil () Mas de 15 mil ()

23. ¿Personal de alguna institución de gobierno le han informado a usted y/o a su familia sobre las relación entre el agua que usamos y consumimos con nuestra salud?

Si ()

No ()

¿Quién o quienes?_____

ANEXO 2. Aprobación del protocolo de investigación por parte del Comité de Ética del CITPsi de la UAEM



CENTRO DE INVESTIGACIÓN TRANSDISCIPLINAR EN PSICOLOGÍA



Cuernavaca, Morelos, 30 de mayo de 2023
Oficio No. CITPSI//CEI/25/2023
ASUNTO: Dictamen

MTRO. BERTÍN TRUJILLO PÉREZ
ESTUDIANTE DEL DOCTORADO EN CIENCIAS NATURALES,
CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN BIODIVERSIDAD Y CONSERVACIÓN
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS
P R E S E N T E.

1. Datos de identificación de la propuesta de investigación revisada por el CEI.

- a) Número de protocolo: 071122-89
- b) Título: EFFECTOS CONTAMINANTES DEBIDOS A LA ACTIVIDAD MINERA, AGRICOLA Y RESIDUOS URBANOS EN EL AGUA SUBTERRÁNEA: IMPLICACIONES PARA LA SALUD EN POBLACIONES DE MORELOS

2. Datos de identificación del investigador principal responsable de conducir la investigación y el establecimiento o institución de salud.

- a) Nombre completo del investigador responsable: Mtro. Bertín Trujillo Pérez

3. Descripción de los documentos evaluados.

Idioma: español.

- a) Oficio de solicitud de revisión de protocolo, con fecha del 8 de noviembre de 2022.
- b) Formato de solicitud de revisión de protocolo de investigación, con fecha del 8 de noviembre de 2022.
- c) Currículum vitae del responsable y del corresponsable del estudio, con fecha del 8 de noviembre de 2022.
- d) Protocolo de investigación, con fecha del 8 de noviembre de 2022.
- e) Cuestionario: Uso y consumo de agua subterránea y salud poblacional, con fecha del 8 de noviembre de 2022.
- f) Cartel de difusión, con fecha del 8 de noviembre de 2022.
- g) Carta de consentimiento informado, con fecha del 29 de mayo de 2023.
- h) Carta de la institución, con fecha del 8 de noviembre de 2022.
- i) Aviso de privacidad simplificado, con fecha del 8 de noviembre de 2022.

4. Resolución del CEI: APROBADO.

5. Vigencia de la aprobación de la investigación: 30 de mayo de 2023 al 29 de mayo de 2024.

Consideraciones importantes:

- i. Usted se compromete a elaborar y presentar dos informes, uno parcial y uno final sobre el cumplimiento de los aspectos éticos en su investigación, con las características que se indican en la página del CEI. El primero deberá enviarlo entre el 25 al 29 de septiembre de 2023 y el informe final al término de la vigencia de aprobación de su proyecto en el formato electrónico

Pico de Orizaba 1, casi esq. con Popocatepetl, Col. Volcanes, Cuernavaca Morelos, México 62350,
Tel. (777) 3297970

Una universidad de excelencia



**UA
EM**

RECTORÍA
2017-2023



disponible en <http://citpsi.uaem.mx/#/investigacion/CEI/protocolos>. Ambos informes deberán ser firmados electrónicamente por el responsable y corresponsable del estudio. Anexe evidencia del cumplimiento de los aspectos éticos (cartas de consentimiento anonimizadas, autorizaciones, etc.). El CEI revisará su documentación presentada en la sesión ordinaria más próxima a la recepción de su informe. En caso de cumplir con la información solicitada, el estatus de cumplimiento de su compromiso será publicado en https://docs.google.com/spreadsheets/d/1_zYa-fglrOsdPvFcNOKVaqBfQPWIGFiQOLyyGIUG2aw/edit?usp=sharing.

En caso de no enviar uno o ambos informes, estará en incumplimiento, pudiendo ser cancelada su vigencia de aprobación.

ii. Si antes del periodo de vigencia de un año se presentan cambios en los objetivos, el diseño, instrumentos, procedimientos u otros aspectos relevantes del protocolo, estos deberán ser dictaminados por el CEI como requisito para continuar con su vigencia.

iii. En los casos de solicitud de renovación de vigencia donde no exista alguna razón para dictaminar nuevamente el protocolo y, de contar con la documentación completa, se procederá al refrendo o renovación de la vigencia sin la necesidad de emitir un dictamen específico.

iv. En todos los casos, los protocolos dictaminados y aprobados por el comité que se hayan terminado o suspendido prematuramente, deberán informar al CEI las razones y los resultados obtenidos hasta ese momento.

v. Informe al CEI de todo evento adverso grave, máximo tres días después de sucedido el evento al correo cei.citpsi@uaem.mx, conforme lo establecen los lineamientos del CEI. El Comité lo revisará y tomará las acciones correspondientes para minimizar el riesgo potencial a los participantes.

ATENTAMENTE

Por una humanidad culta

Documento firmado electrónicamente

MTRA. CINTHYA ANAMÍA FLORES JIMÉNEZ
PRESIDENTA DEL COMITÉ DE ÉTICA EN INVESTIGACIÓN DEL
CENTRO DE INVESTIGACIÓN TRANSDISCIPLINAR EN PSICOLOGÍA
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

C.c.p. – Archivo



Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

CINTHYA ANAMIA FLORES JIMENEZ | Fecha:2023-05-30 13:22:23 | Firmante
dbAYlg8A+V/AotvJZz0GY/lguLF0QbiqpSkZkERVImLzGlyTC3RnxevYA4WzUz3fnoirkxhFC+COZXf7ol8YGzI82Nr01qqoxFVFx2CkiFrWWdlWpksfiowcB/wHcGkjroZfbdu7jcCA
0MhRvo2RzsGMlnlbQHd/GqvXorjXxNGr9WREIS4k5pBVkysdRICV411ZtDl2bCEwMc+E7OBU+Z5WthfGm/s0Q7n9Npvdw3MSyA9kv6p1x4HpbONyDeWqPHrB6QhNT0s8RZi90
e9FHCjA6suortGwz78hrBkZTDXl2DwL7kuxtPw9+8op4vQGsOoIqPLJX67UirAhg==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o
escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



5uX8HlnOq

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/MGx3QILZKg5sAS2bxHvDoVruh3JJKIWH>



Una universidad de excelencia

RECTORÍA
2017-2023

ANEXO 3. Carta de consentimiento informado



Carta de consentimiento informado

Le invitamos a participar en el presente proyecto de investigación, el cual es desarrollado por el Centro de Investigación en Biodiversidad y Conservación (CIByC) de la UAEM. El estudio se realizará en diferentes colonias de la zona poniente de los municipios de Temixco y Xochitepec. Si acepta participar en el estudio, es importante que considere la siguiente información. Siéntase libre de preguntar cualquier asunto que no le quede claro.

El propósito del presente estudio es conocer el origen, uso e intensidad de consumo de agua que realizan los habitantes de la región así como conocer el estado de salud general de usted y los miembros de su familia. Le pedimos participar en este estudio porque usted y su familia forman parte de los habitantes que viven en la región poniente del estado de Morelos y que se encuentran cerca de un lugar con riesgo de contaminación al agua subterránea.

Su participación consistirá en responder las preguntas de un cuestionario que le aplicaré. La aplicación de este cuestionario nos tomará alrededor de 20 minutos y abarcará preguntas sobre el origen, uso y consumo de agua así como información sobre el estado de salud de usted y de su familia. Para facilitar y agilizar la recopilación de la información grabaré un audio de esta entrevista. Usted podrá interrumpir la grabación en cualquier momento y retomarla cuando quiera.

Título de proyecto: Efectos contaminantes debidos a la actividad minera, agrícola y residuos urbanos en el agua subterránea: implicaciones para la salud en poblaciones de Morelos.

Nombre del Investigador Principal: Bertín Trujillo Pérez

Fecha aprobación por el Comité de ética: Junio de 2023

Beneficios: La persona encuestada recibirá información sobre buenos hábitos del uso y consumo de agua para disminuir los riesgos de afectación a su salud y la de los miembros de su familia. En colaboración con funcionarios de los municipios de Temixco y Xochitepec, se impartirán talleres y conferencias sobre el cuidado y buenos hábitos de uso y consumo del agua subterránea.

Confidencialidad: Toda la información que Usted nos proporcione para el estudio será de carácter estrictamente confidencial, será utilizada únicamente por el equipo de investigación del proyecto y no estará disponible para ningún otro propósito. Usted quedará identificado(a) con un número y no con



su nombre. Los resultados de este estudio serán publicados con fines científicos, pero se presentarán de tal manera que no podrá ser identificado(a).

Participación Voluntaria/Retiro: Su participación en este estudio es absolutamente voluntaria. Usted está en plena libertad de negarse a participar o de retirar su participación del mismo en cualquier momento. Su decisión de participar o no en el estudio no implicará ningún tipo de consecuencia por ejemplo en su trabajo o en las escuelas de los miembros de su familia que asistan a ellas. Este proyecto no tiene relación con algún programa gubernamental

Aviso de Privacidad: A continuación, se enumeran los datos personales y sensibles que se preguntan en esta investigación. Si alguna de las preguntas le hicieran sentir un poco incomodo(a), tiene el derecho de no responderla.

- Nombre
- Edad
- Sexo
- Ocupación
- Años de residencia
- Escolaridad
- Diferentes preguntas sobre su estado de salud entre las que se incluye: diabetes, hipertensión, osteoporosis, diarreas y/o vómito continuo, cáncer, enfermedad de Parkinson y cálculos o piedras en los riñones
- Ingreso monetario familiar mensual

Su participación en este proyecto de investigación es libre. Usted no recibirá ningún pago por participar en el estudio ni implicará algún costo monetario para usted.



Consentimiento Informado

Yo _____ con hogar identificado con el código: _____ declaro que he sido informado e invitado a participar en una investigación denominada *"Efectos contaminantes debidos a la actividad minera, agrícola y residuos urbanos en el agua subterránea: implicaciones para la salud en poblaciones de Morelos"*, éste es un proyecto de investigación científica que cuenta con el respaldo del Centro de investigación en Biodiversidad y Conservación perteneciente a la Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Entiendo que este estudio busca conocer el uso y consumo de agua así como el estado de salud general presente en mi familia. Sé que mi participación se llevará a cabo en mi domicilio y consistirá en responder una encuesta que demorará alrededor de 20 minutos. Me han explicado que la información registrada será confidencial, y que harán uso de un código para identificarme, esto significa que las respuestas no podrán ser reconocidas por otras personas ni tampoco ser identificadas en la fase de publicación de resultados. Estoy en conocimiento que los datos no me serán entregados y que no habrá retribución por la participación en este estudio, sí que esta información podrá beneficiar de manera indirecta y por lo tanto tiene un beneficio para la sociedad dada la investigación que se está llevando a cabo. Asimismo, sé que puedo negar la participación o retirarme en cualquier etapa de la investigación, sin expresión de causa ni consecuencias negativas para mí.

Sí. Acepto voluntariamente participar en este estudio y he recibido una copia del presente documento
¿Acepta usted ser audiograbado) Si _____ No _____

Firma participante: _____

Fecha: _____

Firma Testigo 1: _____

Firma Testigo 2: _____

Si tiene alguna pregunta durante cualquier etapa del estudio puede comunicarse con el investigador responsable de este proyecto Dr. Xavier López Medellín al teléfono 777-327-0079 o al correo electrónico xlmedellin@uaem.mx

Este proyecto cuenta con el aval del Comité de Ética en Investigación del Centro de Investigación Transdisciplinar en Psicología, para informes de dictamen y vigencia escriba el correo cei.citpsi@uaem.mx

ANEXO 4. Información obtenida con el cuestionario: Uso y consumo de agua subterránea y salud poblacional.

Pregunta o sección	Objetivo o información obtenida	Observaciones
Datos iniciales Sociodemográficos y de identificación	Obtener información sociodemográfica de la persona encuestada. Se debe confirmar que los habitantes de ese hogar hayan habitado allí al menos 5 años. Se anota edad, sexo, años de residencia, escolaridad y ocupación de la persona encuestada.	Se encuesta de preferencia a la madre o tutora del hogar ya que es más probable que ella nos informe sobre la salud de los miembros de la familia. Es importante marcar la ubicación en un mapa para posteriormente georreferenciarla para su análisis GIS.
Variables obtenidas: Años de estudio de la persona encuestada (AE); años de residencia de la familia en el hogar encuestado (AR). Con la ubicación del hogar encuestado se obtiene: distancia del hogar al sitio con alto peligro contaminante (DFC), distancia del hogar al pozo de abastecimiento de agua (DPA), nivel de vulnerabilidad DRASTFU en el que se ubica el hogar (VUL), zona en que se ubica el hogar encuestado, BT, CJ o LM (ZONA).		
Pregunta 1	Saber el número de habitantes del hogar. Se anota cuantas personas del hogar tienen 9 años o menos.	Importante para los cálculos de prevalencias de enfermedades y el cálculo del gasto económico para obtención de agua.
Variable obtenida: Número de personas en el hogar (PH)		
Pregunta 2	Saber si el hogar cuenta con el servicio de agua potable municipal.	En la zona de estudio, la red municipal de agua abastece con agua subterránea extraída de los pozos de la zona. Preguntar sobre frecuencia de abastecimiento,

		días de la semana y tiempo que tienen el servicio, así como la presión con que llega el agua (normal, alta o baja). Preguntar costo de servicio.
Variable obtenida: Contar o no con el servicio público de abastecimiento de agua (SA).		
Pregunta 3	Conocer el origen con que se abastece el hogar en caso de no estar conectados a la red municipal de agua	Indagar si cuentan con pozo particular o si existe una fuente de agua natural como río o manantial.
Pregunta 4	Saber si almacenan agua en su hogar y de qué manera o en qué recipiente la almacenan.	Indagar el material o tipo de recipiente en que almacenan para saber si existe un riesgo adicional de contaminación.
Pregunta 5	Saber de medios alternativos de abastecimiento de agua además de la red pública.	Preguntar sobre costos de este abastecimiento y frecuencia con que lo usan o contratan.
Variables obtenidas: Gasto económico mensual en agua por persona (CAPT) y gasto económico mensual para abastecimiento alternativo de agua por persona (COAP).		
Pregunta 6	Saber de dónde proviene el agua que beben en el hogar	Hay que aclarar que es sólo el agua que beben. Preguntar costo si responden que compran agua de garrafón o embotellada.
Pregunta 7	Saber si utilizan algún método para potabilizar el agua	Anotar el proceso físico o químico realizado y nombre del producto usado.
Pregunta 8	Conocer la percepción de la persona encuestada sobre la calidad del agua que usan en	Hay que aclarar que es el agua que usan para higiene y actividades en el hogar, no para

	el hogar.	beber.
Pregunta 9	Conocer la percepción de la persona encuestada sobre la calidad del agua que beben en el hogar.	Hay que aclarar que es el agua que beben en el hogar, no aquella que usan para higiene y actividades domésticas.
Pregunta 10	Saber si el agua que beben en el hogar presenta algún color, sabor o aroma.	En los casos afirmativos preguntar detalles del color, sabor o aroma detectado, frecuencia y si lo han relacionado con alguna afectación de salud.
Variables obtenidas: Gasto económico mensual en agua por persona (CAPT) y gasto económico mensual para abastecimiento alternativo de agua por persona (COAP).		
Pregunta 11	Saber si el agua que usan para higiene personal y actividades domésticas presenta algún color o aroma.	En los casos afirmativos preguntar detalles del color o aroma detectado, frecuencia y si lo han relacionado con alguna afectación de salud.
Pregunta 12	Saber el consumo aproximado de agua para beber en el hogar.	Decirle a la persona que un garrafón de agua son aproximadamente 20 litros por lo que puede calcular cuantos garrafones de agua consumen en su familia por semana. Confirmar el costo del garrafón de agua en caso de que lo compren.
Variables obtenidas: Gasto económico mensual en agua por persona (CAPT) y gasto económico mensual para abastecimiento alternativo de agua por persona (COAP).		
Pregunta 13	Saber el origen del agua que usan para cocinar.	Esto debido a que contaminantes como metales pesados no se

		eliminan hirviendo el agua.
Pregunta 14	Preguntar sobre el conocimiento general que tiene la persona encuestada sobre el agua y la salud de las personas	Preguntar en primer lugar si considera o sabe de una relación entre el agua que consumimos y nuestra salud. En respuestas afirmativas pedir que especifique las afecciones o enfermedades relacionados con el consumo de agua contaminada o no potable.
Pregunta 15	Se menciona un listado de 21 afectaciones a la salud y/o enfermedades que, diferentes estudios científicos, indican una posible relación con el uso y consumo de agua no potable.	Para favorecer que la persona encuestada nos brinde esta información se le menciona que únicamente estamos haciendo una encuesta para saber si estas afectaciones de salud se están presentando en la comunidad. Le recordamos que no pretendemos diagnosticar o curar alguna de estas enfermedades y que la información que nos brinda es sólo con fines estadístico en los cuales se mantendrá el anonimato de la persona encuestada y de los miembros de su familia. Si la persona encuestada no reconoce alguna de las afecciones o enfermedades mencionadas, el encuestador deberá mencionar los signos y/o síntomas más frecuentes. En el caso de “Cáncer”, se pedirá especificar el

		tipo o localización del cáncer diagnosticado, la edad y sexo, así como la ocupación de la persona con esta afección.
Variables obtenidas: Anemia (PANE), ansiedad (PANSI), cálculos renales (PCAL), cáncer (PCAN), fluorosis dental (PDAM), demencia (PDEM), dientes fracturados (PDFR), problemas de salud en dientes y/o huesos (PDH), diabetes (PDIAB), necesidad de diálisis renal (PDIAL), diarreas frecuentes (PDIAR), dificultad para orinar (PDO), problemas de salud gastrointestinales, agrupados (PG), infecciones en piel por hongos (PIH), hipertensión arterial (PHIPER), insomnio (PINS), problemas de salud metabólicos, agrupados (PM), enfermedad de Parkinson (PPARK), problemas de salud en piel, agrupados (PP), piel reseca (PPR), salpullido (PPS), osteoporosis (POST), problemas de salud en riños y vías urinarias, agrupado (PR), problemas de salud relacionados con el sistema nervioso, agrupado (PSN), temblores de pies o manos (PTM), vómito (PVO).		
Pregunta 16	Pregunta sobre afecciones detectadas en el comportamiento de estudiantes de niveles primaria o secundaria.	Esta pregunta únicamente aplica en hogares en donde, al momento de la encuesta, tengan jóvenes estudiando en estos niveles. Se pregunta si algún profesor le ha indicado sobre estos compartimientos.
Variables obtenidas: problemas de comportamiento en estudiantes, agrupado (PCE), hiperactividad en estudiantes (PCHIP), dificultad en aprendizaje en estudiantes (PCDA), falta de atención, estudiantes (PCFA), irritabilidad frecuente, estudiantes (PCIRR).		
Pregunta 17	Conocimiento de la persona encuestada sobre el “agua subterránea”	El entrevistador debe cuidar de no mencionar, antes de esta pregunta, que es el agua subterránea. En caso de que la persona entrevistada diga no

		saber que es, se dará una definición simple como por ejemplo: es el agua que se encuentra debajo de la tierra y de la cual se abastecen los pozos o los manantiales. Es importante dar esta definición para que la persona entrevistada pueda contestar las preguntas 18 y 19.
Pregunta 18	Conocimiento de la persona encuestada sobre la forma en que puede contaminarse el agua subterránea.	Debe permitirse la libre expresión de las ideas y conocimientos de la persona encuestada. Sólo después de contestar la pregunta 19 se puede informar de la problemática y de qué hacer para reducir el riesgo de contaminación.
Pregunta 19	Se pregunta a la persona encuestada si considera que ella y los miembros de su familia pueden hacer algo para cuidar la calidad y cantidad del agua subterránea.	Esta pregunta nos dará información sobre el conocimiento y percepción que tiene la persona encuestada sobre la problemática de contaminación del agua subterránea.
Pregunta 20	Se pregunta a la persona encuestada si ha notado algún cambio positivo o negativo debido a la actividad del sitio con alto peligro contaminante seleccionado.	Se busca que la persona entrevistada mencione tanto las afectaciones como los puntos positivos (si considera que existen). La pregunta cambia de acuerdo con la zona en que se esté encuestando: relleno

		sanitario Loma de Mejía, proyecto minero en el Cerro del Jumil o basurero clausurado de Tetlama.
Pregunta 21	Se pregunta a la persona encuestada cuál es el ingreso monetario con que cuentan en su familia.	Se dan las opciones de respuesta para clasificar el ingreso en una de las categorías del cuestionario. No es necesario un monto exacto.
Variable obtenida: ingreso monetario mensual en el hogar encuestado (IM)		
Pregunta 22	Se pregunta a la persona encuestada si con anterioridad, personal de alguna institución de gobierno u otra instancia le había preguntado o brindado información sobre los temas del agua que usan y beben con relación a la salud de ella y de su familia.	En caso de respuesta afirmativa se pregunta quien o quienes le brindaron la información y cuando fue.

ANEXO 5. Prevalencias de causas de morbilidad y de mortalidad para los municipios de Miacatlán, Temixco y Xochitepec

Morbilidad Miacatlán. Principales motivos de consulta (egresos) en servicios médicos para residentes del municipio de Miacatlán, 2024. Se emplea la tercera edición de la Clasificación Internacional de Enfermedades (CIE-3). Población calculada de 16,148 habitantes (SSA 2024).

CLAVE CIE-3	Principal motivo de egreso	Número de egresos
Z49	Cuidados relativos al procedimiento de diálisis	433
O80	Parto único espontáneo	34
E11	Diabetes mellitus Tipo 2	20
O82	Parto único por cesárea	18
K80	Colelitiasis	15
K35	Apendicitis aguda	11
S82	Fractura de la pierna, inclusive del tobillo	11
J18	Neumonía, organismo no identificado	10
A97	Dengue	9
O62	Anormalidades de la dinámica del trabajo de parto	8
O06	Aborto no especificado	8
K37	Apendicitis, no especificada	7
S72	Fractura del fémur	7
K40	Hernia inguinal	7
J44	Otras enfermedades pulmonares obstructivas crónicas	7
N18	Enfermedad renal crónica	6
O68	Trabajo de parto y parto complicados por sufrimiento fetal	6
S62	Fractura a nivel de la muñeca y de la mano	6
K72	Insuficiencia hepática, no clasificada en otra parte	6
N39	Otros trastornos del sistema urinario	5
O34	Atención materna por anomalías conocidas o presuntas de los órganos pelvianos de la madre	5
O47	Falso trabajo de parto	5
S06	Traumatismo intracraneal	5
S52	Fractura del antebrazo	5
P36	Sepsis bacteriana del recién nacido	5

Morbilidad Temixco. Principales motivos de consulta (egresos) en servicios médicos para residentes del municipio de Temixco, 2024. Se emplea la tercera edición de la Clasificación Internacional de Enfermedades (CIE-3). Población calculada de 126,909 habitantes (SSA 2024).

CLAVE CIE-3	Principal motivo de egreso	Número de egresos
Z49	Cuidados relativos al procedimiento de diálisis	1,355
O80	Parto único espontáneo	199
082	Parto único por cesárea	165
O06	Aborto no especificado	61
A97	Dengue	39
E11	Diabetes mellitus Tipo 2	31
C91	Leucemia linfoide	27
K80	Colelitiasis	27
N18	Enfermedad renal crónica	24
J18	Neumonía, organismo no especificado	23
O47	Falso trabajo de parto	23
K37X	Apendicitis, no especificada	20
E14	Diabetes mellitus, no especificada	17
K35	Apendicitis aguda	16
N39	Otros trastornos del sistema urinario	15
S52	Fractura de antebrazo	15
S82	Fractura de la pierna, inclusive del tobillo	14
C50	Tumor maligno de la mama	13
H28	Catarata y otros trastornos del cristalino en enfermedades clasificadas en otra parte	13
O13X	Hipertensión gestacional (inducida por el embarazo)	13
S72	Fractura del fémur	13
K40	Hernia inguinal	12
O14	Preeclamsia	12
P59	Ictericia neonatal por otras causas y por las no especificadas	12
A09	Otras gastroenteritis y colitis de origen infeccioso y no especificado	11

Morbilidad Xochitepec. Principales motivos de consulta (egresos) en servicios médicos para residentes del municipio de Xochitepec, 2024. Se emplea la tercera edición de la Clasificación Internacional de Enfermedades (CIE-3). Población calculada de 77,629 habitantes (SSA 2024).

CLAVE CIE-3	Principal motivo de egreso	Número de egresos
Z49	Cuidados relativos al procedimiento de diálisis	621
O80	Parto único espontáneo	136
O82	Parto único por cesárea	96
A97	Dengue	34
O06	Aborto no especificado	28
J18	Neumonía, organismo no especificado	18
N18	Enfermedad renal crónica	17
E11	Diabetes mellitus Tipo 2	15
K37X	Apendicitis, no especificada	15
C91	Leucemia linfoide	14
K35	Apendicitis aguda	12
S82	Fractura de la pierna, inclusive del tobillo	12
O62	Anormalidades de la dinámica del trabajo de parto	11
C49	Tumor maligno de otros tejidos conjuntivos y de tejidos blandos	10
K80	Colelitiasis	10
O47	Falso trabajo de parto	10
K81	Colecistitis	9
O02	Otros productos anormales de la concepción	9
T14	Traumatismo de regiones no especificadas del cuerpo	9
P22	Dificultad respiratoria del recién nacido	8
C56X	Tumor maligno del ovario	7
C83	Linfoma no folicular	7
D64	Otras anemias	7
K40	Hernia inguinal	7
O60	Trabajo de parto prematuro y parto	7

Morbilidad para los municipios de Miacatlán, Temixco y Xochitepec (año 2024). Información obtenida de la base de datos "Cubos dinámicos" de la Dirección General de Información en Salud de la Secretaría de Salud, México. Datos normalizados a tasa de 100 mil habitantes. SCR, sin casos reportados (SSA 2024).

	MIACATLÁN (casos por 100 mil habitantes)	TEMIXCO (casos por 100 mil habitantes)	XOCHITEPEC (casos por 100 mil habitantes)
Cuidados relativos al procedimiento de diálisis	2681	1068	800
Cuidados en el embarazo, parto y atención relacionada al neonato	725	414	446
Traumatismos, fracturas, luxaciones y heridas	347	91	99
Colelitiasis, apendicitis, pancreatitis y otros trastornos del peritoneo	272	72	95
Enfermedades respiratorias, rinofaringitis, bronquitis, neumonía	136	39	49
Diabetes mellitus	130	39	27
Miomas, hiperplasias y tumores	105	80	148
Enfermedad hipertensiva, infartos, EVC	87	39	31
Síndrome nefrótico y afectaciones diversas en vías urinarias	81	58	52
Enfermedades inflamatorias del hígado	81	11	15
Hernia, umbilical, ventral, inguinal	68	13	9
Aborto	68	54	43
Gastroenteritis y sepsis bacteriana	56	13	10
Dengue	56	31	44
Otras afectaciones a la salud	37	41	41
Malformaciones congénitas	31	21	6
Anemia, obesidad y otras afectaciones nutricionales	19	28	26
Cataratas y otitis	19	17	19
Problemas del comportamiento	19	13	6
Afectaciones y enfermedades del sistema nervioso	12	20	9
Artrosis y problemas en huesos	0	7	17

Principales causas de muerte para residentes del municipio de Miacatlán en el año 2023. Se emplea la tercera edición de la Clasificación Internacional de Enfermedades (CIE-3). Población calculada de 16,148 habitantes. Fuente. Cubos dinámicos de la DGIS (SSA 2024).

CLAVE CIE-3	Principal motivo muerte	Número de casos
E11	Diabetes mellitus Tipo 2	17
I21	Infarto agudo del miocardio	10
X95	Agresión con disparo de armas de fuego, y las no especificadas	6
J44	Otras enfermedades pulmonares obstructivas crónicas	6
I12	Enfermedad renal hipertensiva	5
N18	Enfermedad renal crónica	3
J18	Neumonía, organismo no especificado	3
E14	Diabetes mellitus , no especificada	3
X70	Lesión autoinfligida intencionalmente por ahorcamiento, estrangulamiento o sofocación	2
X59	Exposición a factores no especificados	2
U07	COVID-19	2
N19X	Insuficiencia renal no especificada	2
M19	Otras artrosis	2
K92	Otras enfermedades del sistema digestivo	2
K74	Fibrosis y cirrosis del hígado	2
K70	Enfermedad alcohólica del hígado	2
K65	Peritonitis	2
I67	Otras enfermedades cerebrovasculares	2
I25	Enfermedad isquémica crónica del corazón	2
I11	Enfermedad cardíaca hipertensiva	2
E87	Otros trastornos de los líquidos, de los electrolitos y del equilibrio ácido-base	2
D64	Otras anemias	2
C85	Linfoma No Hodgkin de otro tipo y el no especificado	2
C61X	Tumor maligno de la próstata	2
C25	Tumor maligno del páncreas	2

Principales causas de muerte para residentes del municipio de Temixco en el año 2023. Se emplea la tercera edición de la Clasificación Internacional de Enfermedades (CIE-3). Población calculada de 126,909 habitantes. Fuente. Cubos dinámicos de la DGIS (SSA 2024).

CLAVE CIE-3	Principal motivo de muerte	Número de casos
I21	Infarto agudo de miocardio	172
E11	Diabetes mellitus Tipo 2	134
X95	Agresión con disparo de otras armas de fuego, y las no especificadas	75
J18	Neumonía, organismo no especificado	37
J44	Otras enfermedades pulmonares obstructivas crónicas	29
K74	Fibrosis y cirrosis del hígado	19
E14	Diabetes mellitus, no especificada	16
N18	Enfermedad renal crónica	16
X91	Agresión por ahorcamiento, estrangulamiento y sofocación	15
X70	Lesión autoinfligida intencionalmente por ahorcamiento, estrangulamiento o sofocación	14
K72	Insuficiencia hepática, no clasificada en otra parte	13
X99	Agresión con objeto cortante	13
C80	Tumor maligno de sitios no especificados	12
K70	Enfermedad alcohólica del hígado	12
K92	Otras enfermedades del sistema digestivo	11
C50	Tumor maligno de la mama	9
Y09	Agresión por medios no especificados	9
A41	Otras sepsis	8
C18	Tumor maligno del colon	8
I12	Enfermedad renal hipertensiva	8
J84	Otras enfermedades pulmonares intersticiales	8
N39	Otros trastornos del sistema urinario	8
V89	Accidente de vehículo de motor o sin motor, tipo de vehículo no especificado	8
C34	Tumor maligno de los bronquios y del pulmón	7
I10X	Hipertensión esencial (primaria)	7

Principales causas de muerte para residentes del municipio de Xochitepec en el año 2023. Se emplea la tercera edición de la Clasificación Internacional de Enfermedades (CIE-3). Población calculada de 77,629 habitantes. Fuente. Cubos dinámicos de la DGIS (SSA 2024).

CLAVE CIE-3	Principal motivo de muerte	Número de casos
E11	Diabetes mellitus Tipo 2	56
I21	Infarto agudo del miocardio	54
X95	Agresión con disparo de otras armas de fuego, y las no especificadas	40
J18	Neumonía, organismo no especificado	22
K72	Insuficiencia hepática, no clasificada en otra parte	16
K74	Fibrosis y cirrosis del hígado	16
E14	Diabetes mellitus, no especificada	14
V89	Accidente de vehículo de motor o sin motor, tipo de vehículo no especificado	14
J44	Otras enfermedades pulmonares obstructivas crónicas	12
K70	Enfermedad alcohólica del hígado	12
K92	Otras enfermedades del sistema digestivo	10
I12	Enfermedad renal hipertensiva	9
N18	Enfermedad renal crónica	9
C22	Tumor maligno del hígado y de las vías biliares intrahepáticas	8
N39	Otros trastornos del sistema urinario	7
A41	Otras sepsis	6
N00	Síndrome nefrítico agudo	6
U07	COVID-19	6
X70	Lesión autoinfligida intencionalmente por ahorcamiento, estrangulamiento o sofocación	6
A15	Tuberculosis respiratoria, confirmada bacteriológica e histológicamente	5
C34	Tumor maligno de los bronquios y del pulmón	5
C50	Tumor maligno de mama	5
I50	Insuficiencia cardíaca	5
X59	Exposición a factores no especificados	5
C18	Tumor maligno del colon	4

Tabla 11. Causas de mortalidad para habitantes de los municipios de Miacatlán, Temixco y Xochitepec (año 2023). Información obtenida de la base de datos "Cubos dinámicos" de la Dirección General de Información en Salud de la Secretaría de Salud, México. Datos normalizados a tasa de 100 mil habitantes. SCR, sin casos reportados (SSA 2024).

Enfermedades o afectaciones a la salud agrupadas	MIACATLAN (casos por 100 mil habitantes)	TEMIXCO (casos por 100 mil habitantes)	XOCHITEPEC (casos por 100 mil habitantes)
Enfermedad hipertensiva, infartos, EVC y otros relacionados	143	222	124
Diabetes mellitus	130	121	95
Traumatismos, fracturas, luxaciones y heridas	87	134	113
Miomas, hiperplasias y tumores	75	82	87
Enfermedades respiratorias, rinofaringitis, bronquitis, neumonía	62	39	57
Anemia y trastornos del metabolismo	43	18	12
Síndrome nefrótico y afectaciones diversas en vías urinarias	43	28	35
Colelitiasis, apendicitis, pancreatitis y otros trastornos del peritoneo	37	44	34
Enfermedades inflamatorias del hígado	31	21	57
Hemorragia postparto, malformaciones y otras afectaciones del neonato	31	10	10
Artrosis y problemas en huesos y tejido conectivo	19	11	5
COVID-19	12	2	8
Dengue	6	4	4
Gastroenteritis y sepsis bacteriana	6	8	16
Enfermedad de Alzheimer	SCR	SCR	3
Enfermedades virales como hepatitis y VIH	SCR	6	4
Trastornos mentales, del comportamiento y afectaciones en el sistema nervioso	SCR	14	1
Hernia umbilical, diafragmática o no especificada	SCR	2	3
Enfermedad de Parkinson	6	2	3

Capítulo 3

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

GROUNDWATER AND PUBLIC HEALTH: VULNERABILITY OF POPULATION IN A CENTRAL REGION OF MEXICO

GROUNDWATER AND PUBLIC HEALTH: A STUDY CASE IN CENTRAL MEXICO

Bertín TRUJILLO-PÉREZ¹, Elisabet V. WEHNCKE¹, Xavier LÓPEZ-MEDELLÍN^{1*},
Urinda ÁLAMO-HERNÁNDEZ², Valentina CARRASCO-CARBALLIDO¹, Marcela
OSORIO-BERISTAIN¹, Eric MORALES-CASIQUE³

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

Bertin 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 Tetlana (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 Tetlana 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 Tetluma 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 DRASTIC 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 Tetluma 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-Kuij 2017). Una vez extraída, el agua es clorada para

disminuir el peligro de contaminación microbiana, 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 perimetros 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

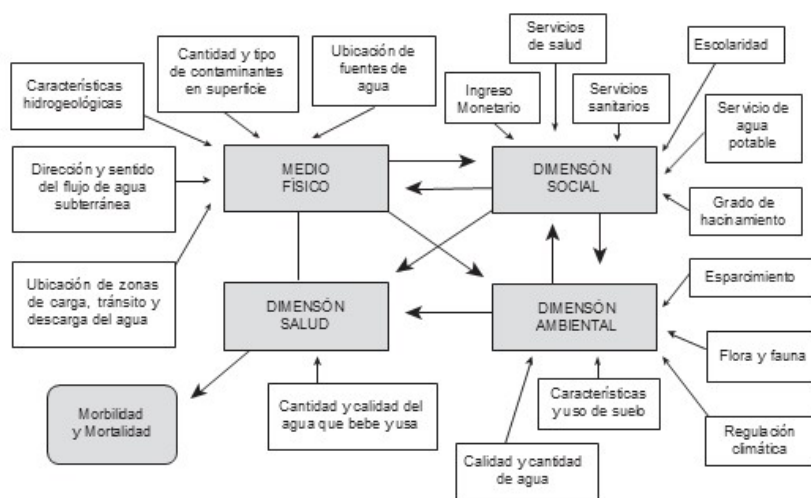


Fig. 1. Relaciones multidimensionales en la vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación y el subsecuente riesgo de afectación a la salud de pobladores que la usan y beben. Modificado de Domínguez-Cortinas et al. (2012).

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.

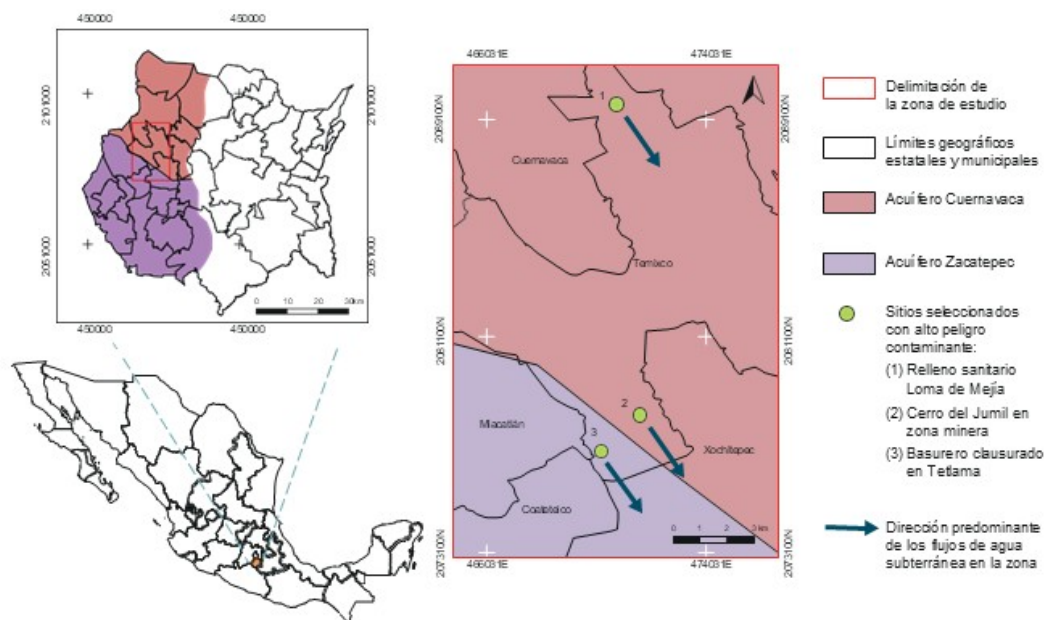


Fig. 2. Ubicación de la zona de estudio en la región norponiente del estado de Morelos, México.

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 Milpillás Tetlana (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 (Farias et al. 2021, CONAGUA 2023, Mahlkecht 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 I. 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: Tetlana (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
PHIFER	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)
PTEM	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).

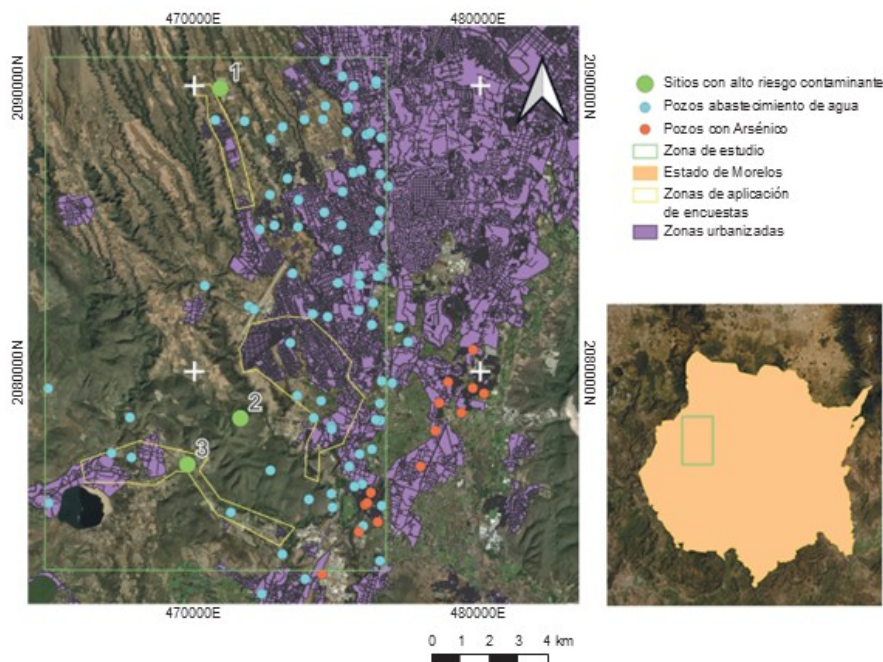


Fig. 3. Ubicación de zonas urbanizadas y de los tres sitios identificados con alto peligro de contaminación al agua subterránea dentro de la zona de estudio.

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 de 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 %).

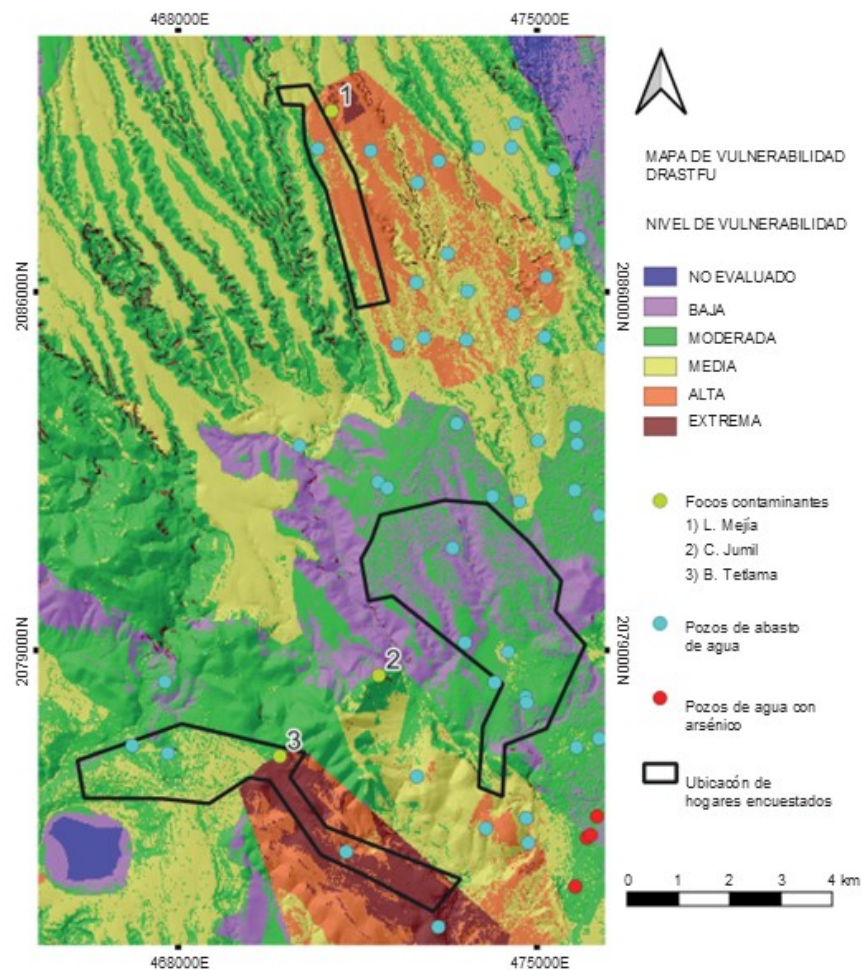


Fig. 4. Mapa de vulnerabilidad de contaminación obtenido con el modelo DRASTFU para la región norponiente del estado de Morelos.

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).

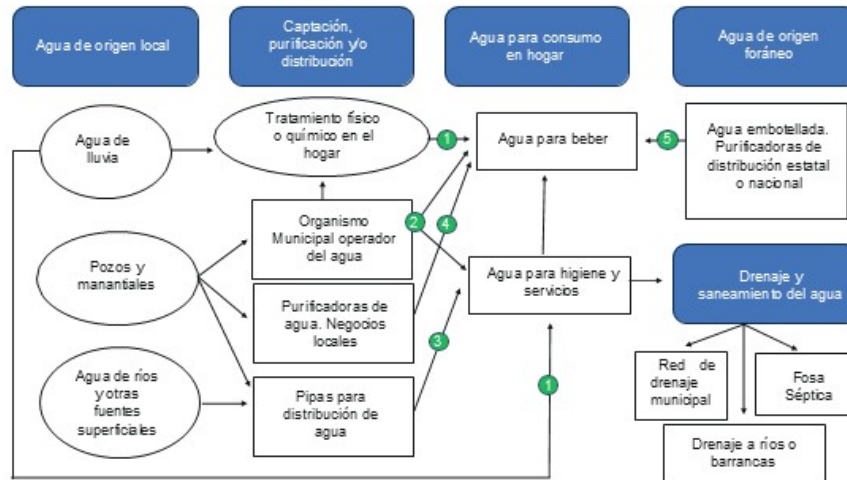


Fig. 5. Fuentes de abastecimiento y destino final del agua para uso en hogar y para beber en la región norponiente del estado de Morelos. En los círculos verdes se indica una relación general de costo del agua, de menor (1) a mayor (5).

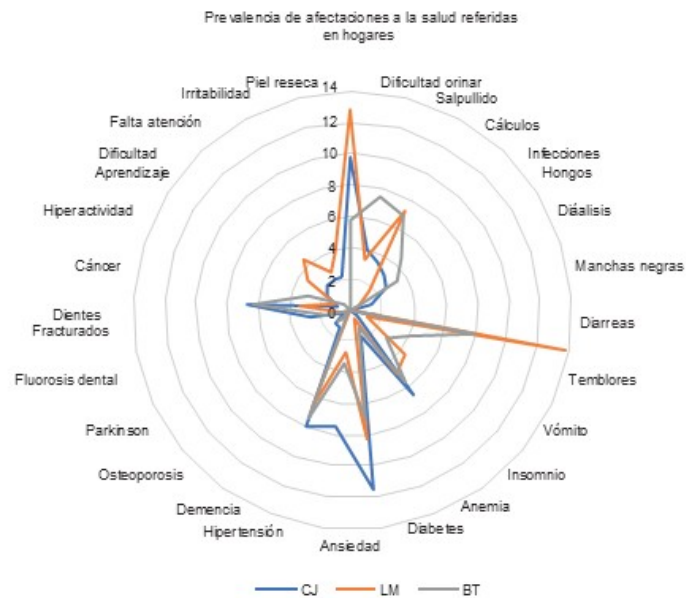


Fig. 6. Prevalencia (en porcentaje) de afectaciones a la salud referidas por encuestados para los tres sitios dentro de la zona de estudio. Sitios encuestados: Cerro del Jumil (CJ), Loma de Mejía (LM) y Tetlama (BT).



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 Tetluma (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 Miaatlán

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 Miaatlán, 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 Miaatlán, 1068 en Temixco y 800 en Xochitepec. Respecto a la diabetes mellitus tipo 2, los casos reportados fueron: 130 en Miaatlán, 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 Miaatlán, 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:

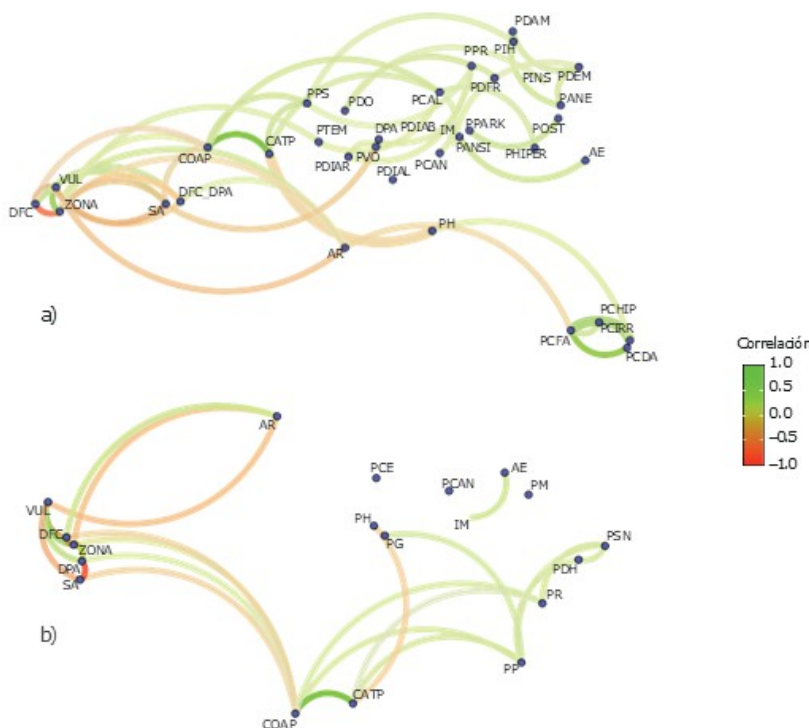


Fig. 8. Mapa de correlaciones de Pearson entre variables. (a) Correlaciones considerando todas las afectaciones de salud encuestadas. (b) Correlaciones considerando las variables de salud agrupadas. Se presentan únicamente las correlaciones con valor absoluto mayor a 0.25. Variables socioeconómicas: AE: años de estudio de la persona encuestada; AR: años de residencia de la familia en el hogar encuestado; 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: 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: Tetlma, Cerro del Jumil o Loma de Mejía. 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; PDEF: 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; PTM: 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, CAPT, 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

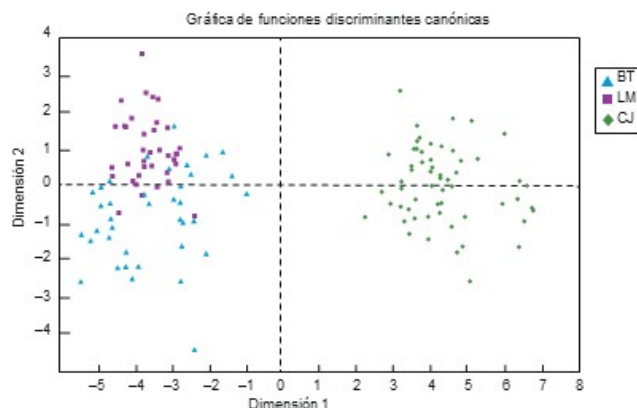


Fig. 9. Gráfica en plano del análisis de funciones discriminantes. Ordenamiento de los hogares encuestados en Cerro de Jumil (CJ), Loma de Mejía (LM) y Tetlama (BT).

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 % refinó 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 intergrupal.

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 (Farias et al. 2021). Asimismo, es necesario considerar otras posibles vías de exposición a los contaminantes, como es la vía aérea (Sánchez-Anías 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.
- Dominguez-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.
- Fariás 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/ijerph182111490>
- 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/ig.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-Magliano 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/espacioydatos/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.
- Jai Shankar 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., Karunaniidhi 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., Farias 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/igeof.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 Milpillal, Teñama, 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.dgissalud.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. Paris, 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 DRAS TFU 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	
CAPAR (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	
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/GeoInfo/MexGobMx/#
	QpHoB-A (basalto-andesita, extrusiva)	9	
	KapceCz (caliza, sedimentaria)	6	
	Qhoal (aluvial, sedimentaria)	5	
	TplLh (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: Mf, 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 DRAS TFU 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 (%)		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	
CAPA F. La dirección y sentido predominante de los SFAS en el área de estudio es de norte a sureste (Mórales-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	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.
	1	20-18	
	2	19-17	
	3	18-16	
	4	17-15	
	5	16-14	
	6	15-13	
	7	14-12	
	8	13-11	
	9	12-10	

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES GENERALES

El presente trabajo se desarrolló en el contexto de la creciente importancia de asegurar la calidad y cantidad del agua subterránea, al ser la principal fuente de abastecimiento en el estado de Morelos, tanto para el consumo humano como para los sectores agrícola e industrial. El inicio de la investigación coincidió con el conflicto socioambiental en la región norponiente, derivada del inicio de trabajos de exploración de un proyecto minero en las inmediaciones del Cerro del Jumil y de la operación del relleno sanitario de Loma de Mejía, sumados a la presencia histórica del basurero clausurado de Tetlama. La convergencia de estos tres sitios con alto potencial de contaminación en una misma zona reforzó la pertinencia de evaluar la vulnerabilidad hidrogeológica y su relación con la salud de las poblaciones aledañas considerando además que, zonas con alta densidad poblacional, ubicadas principalmente en los municipios de Temixco y Xochitepec son dependientes de esta agua.

Los resultados obtenidos muestran que la vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea no puede analizarse únicamente a partir de parámetros hidrogeológicos, como lo plantean modelos convencionales como DRASTIC (USEPA 1987, Foster et al. 2013). Por ello, la propuesta metodológica del modelo DRASTFU incorporó la dirección y sentido de los flujos subterráneos (Tóth 1999) y la ubicación de los principales focos de riesgo, lo que permitió identificar áreas críticas de manera más realista y focalizar esfuerzos en la atención preventiva de esta problemática. En este sentido, el mapa DRASTFU evidenció que la dinámica

de los sistemas de flujo subterráneo puede dirigir el transporte de los posibles contaminantes hacia pozos de abastecimiento, incrementando el riesgo sanitario para los habitantes de las comunidades estudiadas (Appelo y Postma 2004, Huizar-Álvarez y Carrillo-Rivera 2021).

Al integrar el análisis hidrogeológico con información socioeconómica, de percepción social y de prevalencia de enfermedades, este estudio revela la naturaleza multidimensional del problema. Se identificaron diferencias estadísticamente significativas en problemas gastrointestinales, renales y de comportamiento en estudiantes de las comunidades analizadas, lo cual coincide con reportes que vinculan la exposición a contaminantes del agua con afectaciones agudas y crónicas (Jaishankar et al. 2014, Xie et al. 2023). Asimismo, las prácticas domésticas de almacenamiento, la desigualdad en el acceso al servicio público y la dependencia del suministro mediante pipas constituyen factores moduladores del riesgo que, aunque poco explorados en otros estudios (Vedagiri et al. 2018, Alarcón-Herrera et al. 2020), resultaron esenciales para comprender la exposición diferencial en la población. Si bien, debido a la metodología empleada y a la complejidad de los fenómenos analizados, no es posible establecer una relación causal directa con los resultados obtenidos, la información recopilada refuerza las hipótesis generales planteadas respecto a la relación entre el uso y consumo de agua contaminada o no potable y las afectaciones en la salud poblacional resaltando las diferencias entre los sitios cercanos al basurero y al relleno sanitario respecto al sitio cercano a la región con exploración minera.

En conjunto, los hallazgos demuestran que la vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea es un fenómeno complejo que requiere un enfoque inter y transdisciplinario, en el que confluyan la hidrogeología, la epidemiología ambiental, la sociología y la economía (Moral et al. 2014, Urbina y González 2012). Este enfoque permitió no solo mapear áreas de riesgo, sino también vincularlas con la salud comunitaria y con las prácticas sociales, generando un insumo estratégico para la gestión pública y la prevención de conflictos socioambientales.

Es importante subrayar que este estudio de vulnerabilidad y el análisis estadístico multidimensional constituyen un primer paso en el abordaje de esta problemática. No obstante, estas aproximaciones deben complementarse con los pasos tradicionales de la evaluación de riesgos ambientales, que incluyan el análisis directo de la calidad de las muestras de agua y la realización de estudios epidemiológicos detallados en las poblaciones expuestas (Howard et al. 2006, Downs et al. 1999). La combinación de ambas perspectivas permitirá construir diagnósticos más robustos y guiar la implementación de medidas de prevención, mitigación y remediación.

El modelo DRASTFU demostró ser una herramienta de bajo costo, replicable y con utilidad directa en contextos donde el monitoreo químico y microbiológico resulta limitado (Jordana y Batista 2004). Su capacidad para priorizar acciones preventivas en torno a pozos y comunidades vulnerables lo convierte en un recurso relevante para fortalecer la seguridad hídrica y la salud pública en la región de estudio y en escenarios similares a nivel nacional.

En conclusión, este trabajo confirma que el agua subterránea en la región norponiente de Morelos enfrenta riesgos elevados de contaminación derivados de la interacción de factores naturales y antrópicos, lo cual repercute en la salud de las poblaciones. La investigación aporta un modelo innovador y multidimensional que contribuye a la identificación temprana de áreas críticas, orienta la toma de decisiones y refuerza la urgencia de implementar políticas integrales de protección del recurso. El reto futuro será articular este tipo de aproximaciones preventivas con estudios directos de calidad del agua y de epidemiología ambiental, de modo que se avance hacia diagnósticos más completos y hacia una gestión sustentable que garantice el derecho humano al acceso a agua limpia y segura.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



DES de Ciencias Naturales
Doctorado en Ciencias Naturales

Cuernavaca, Morelos, a 18 de noviembre del 2025.

VOTOS APROBATORIOS DE TESIS

Los integrantes de la Comisión Revisora de la tesis titulada: "Interacción Agua Subterránea y Salud Humana: vulnerabilidad de ambos sistemas en la región norponiente del estado de Morelos, México", que presenta el **C. Bertín Trujillo Pérez**, del Programa de Posgrado Doctorado en Ciencias Naturales, bajo la dirección del DR. XAVIER LÓPEZ MEDELLÍN y la co-dirección de la DRA. ELISABET VERONICA WEHNCKE RODRÍGUEZ, han determinado que el documento reúne los requisitos académicos para su defensa oral en el examen de grado, por lo que emiten su **VOTO APROBATORIO**.

Comisión Revisora de tesis (firma electrónica)

DR. XAVIER LOPEZ MEDELLIN (DIRECTOR DE TESIS, CIBYC, UAEM)

DR. ELISABET VERÓNICA WEHNCKE RODRÍGUEZ (Investigadora Independiente)

DRA. MARIA MARCELA OSORIO BERISTAIN (CIBYC, UAEM)

DR. ERIC MORALES CASIQUE (IG, UNAM)

DRA. PATRICIA VALENTINA CARRASCO CARBALLIDO (CIBYC, UAEM)

DRA. LARISA DE ORBE GONZÁLEZ (INSP)

DR. JOSE JUAN BLANCAS VAZQUEZ (CIBYC UAEM)





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento con firma electrónica UAEM, soportada por el certificado vigente a la fecha de su elaboración y con efectos plenos de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS PUBLICADOS en el ÓRGANO INFORMATIVO UNIVERSITARIO "ADOLFO MENÉNDEZ SAMARÁ" número 117 de fecha 20 de abril de 2021.

Sello electrónico

ELISABET VERÓNICA WEHNCKE RODRÍGUEZ | Fecha:2025-12-04 08:28:33 | FIRMANTE

m+MbKwByZ50w4ZuROWFI5PH21Z6RsmjP7c+1YhMn/7fSVzB47maxKbenUx5G3Khupw69P+qEZiCIHToS+ynt2lkd/YjGDWcZK8hPJ5PVD0y7Lb7RHs0yJ+aWO9Nmdy3o4Nfrl
zrrvV+N+IQh38SYHG8CCyuoOH06WA4FsmVp/q64gwZjWSWwCjPtasxsUFLJhyWRGuuHdAp3YxatW+bMMZDSd0ANw5MqOMwNHIKeWWz5yUMB4IxBnMVq5QiB3ARYQA
CoPiZymZk+fZLiilV7O3dYW8GveNqmSnq0ZxxYnATlgTYSmQb+i2m+LOqfWk1THB+5WWWBbsB3X80Z5dH7xw==

ERIC MORALES CASIQUE | Fecha:2025-12-04 10:24:31 | FIRMANTE

JuEAapzbrSgbN/MZSvazbt3rlzjhlYa7LBI2MqxzB/dvS0lcJ9g9N7bDVG9QrzHIW/3oEeE2J8c7tiaUhwUMK7TGhL+dYvqsWucKoNlmEcEulldnqLJ7y6x5clJ28wRrOcESgE36DjVfz
Yu+1YAJK1oJ0DsQvbl9smXKUL8eLiVX1s7cmrDgD0GI7QxspajF1rGWIB1fmdZyINLjrveZQal094icWnLg2NGeSsRQ8NdRjCZH7yg+sdv1j7G0o9pb8lSzb2+7agZ29EfnwPcl1mN
DxtTCFTIJXemN5XoAbX5KFBtOKi/qztqmlM6+8CRRiHoPFp5RrfjC19iQw4kOg==

XAVIER LOPEZ MEDELLIN | Fecha:2025-12-04 17:31:21 | FIRMANTE

FvRz2qpHA7Yteb8Y9nQNmvKCRCE/CzdHkYCMpK9I8Wp4Y9X3sIDDU4md92d8vBgvY8mZor/AXIGbJ5gGIJNpo8EUxVH4rTh2bUDGPFUZQZ4SoOfejO/S3uS4VuJZ1Knhgzlzp
4lQYqbkUvSOWKPNbblo0mOzTDyPxPKZXKo6KZZoFclm+k4y3N0JFcl1ubl6O1qcNB9Glm1G5ikFdH4IDcmgodhrfGTKKoltdHKAeF/FYAvmWWYxPTtmHcDdjMHmazlxReeLbC
czp+bLlIXdVoo8YJ0yUvJqZvdyupMLawIY5RKhk61ZG5MN29li7SQlkrzB6w6tVND6WTUo0rLPGg==

PATRICIA VALENTINA CARRASCO CARBALLIDO | Fecha:2025-12-05 09:01:54 | FIRMANTE

JG8gUTOeIHP+QzzJgLnOQ3W3LVtID0qTPCKeHggMyTcOw2M5By8O7MB+4UvNcyirigQ4ZVJ66+0M8PY4MT/hEyi2C0sZcp/bS9HrN1dn5rPuPbuiYpjplWPaIY5YEOsFMgu9HI
ydua8qxl9oMwZcQ7S17VuoDAVWKc3N96Ku4Bk+/j8HDz9LalNG5T1g+exSVtBbH9uULXPZuHYu9ZJRApJxClP/zUn3CdAq9o19rN6wAgZ4MzwGrrYCVmckyYoxSY0g9PWZl6O
3ykua7EK4EqSOIS2bf7GfR4we/TC2rdGS1VWvsaL0M/ze5EP8Jn82kHWVuw6767UCYmrglJlA==

MARIA MARCELA OSORIO BERISTAIN | Fecha:2025-12-05 11:51:21 | FIRMANTE

J/CobPJMHK3yfAig1qNDcZYmr8+3coC6W4/kiXUIEYrLTSI2CIA8F8GrSkWITJfJs+d0ISyCfS7wzf/YcrHKFzXJXWh6vyGRgdn9HL304Xb6yvo9UmFqcJw2FseAC5ntUrN390apr
+oqF58ta3/OSfMe2uXdwzbzaWBISFqn7kbp6DqVHfPQHx4AJ9/MZwDe/sv/MR3mxEfmXP4VBQHKSGZoKvL0FD9M+JchpRmqldijcUkQqmf1O1BbG8jV9im/HkblEGzXOPvIvoqP1
Do/ojSUMOqtW9H9S0s/aEIVC0Hu/SpMeRKRZIMAAw/BylWG/vfd4KCzxtmk6K7NMFwdg==

JOSE JUAN BLANCAS VAZQUEZ | Fecha:2026-01-20 17:01:48 | FIRMANTE

gksRjNCORejy6VcKwPpYRjHn/glcldwslhbwjEgcyqm/sGH0qv+939L+ZSM+hx4t2u7+zba5/6HxrXpE1ECc7yn4hFyUIUbuJUJ0Ha8j/hj0luH2LP+JMPyQSuXDrjzE+n6u+uEhviUufn1DE
XWc2sB1cwOT+e/VO9GzcD0aY9xP1a6evgaDy3wkZPxVrtOTRXJFDQ0Bet8ziCG6BL8jpiKKAwe9V3y63ant27cLqAQV/FnTTxidn5VlnryOsuzioWPfGUK5galY2Tzu3335HuS8lwf
5MoUJeFie0cLYpM0w5UXITE26TCWvNrtlDaxJrmwKylWnMyvpW1A7XS0UhCrcQ==

LARISA DE ORBE GONZÁLEZ | Fecha:2026-01-28 18:11:41 | FIRMANTE

Ff3rDviWkfOmQw4Xqcb056y81hx2/5kwc89piOL1KLBrzG8LsPuh8zGX1p8B+j0h6E26FoEbLJq9LLKwn8apUCgmwJP4v21TzF3d/08unyyd0EaK68IUPpB+KRq5/+k5EVA3gxTWo
hObJwxldE2gd6fMx73lhXuaUoA3yEROsLLDa/ow2TBxR/xbxdaZVknURwrJTf9tkFj6pZayjawH/djZbWUKA7mveI9iO5hfdtu8jp7WJBhEU/FylE4RV+29ZEN9wf3s2CRzqwF1plsvNhg
NG9AoitFSHKOVCoSdGACvVpA7oxUQ7nEh30bqQ93DNLsetNyp6noM3ctBU4eML9g==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o
escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



AnNX78Hfg

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/fSWmNFyk4jnf0NuAyOMqJwfj5BmX4tJ>



UAEM
RECTORÍA
2023-2029