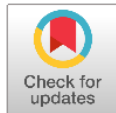




Artículo de investigación



Remoción de arsénico y fluoruro del agua mediante filtros con arena, hierro y destilación solar

Removal of arsenic and fluoride from water using sand filters, iron and solar distillation

Juan Carlos Burillo Montúfar¹ , Antonio Cardona Benavides² , Gilberto Wenglas Lara¹ , Jorge Márquez Balderrama¹

¹Universidad Autónoma de Chihuahua, Av. Escorza No. 900, Zona Centro. Chihuahua, Chihuahua, México México.

²Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Álvaro Obregón 64, Zona Centro, C.P. 78000, San Luis Potosí, San Luis Potosi, México.

Autor de correspondencia: Juan Carlos Burillo Montúfar, Universidad Autónoma de Chihuahua, Av. Escorza No. 900, Zona Centro. Chihuahua, Chihuahua, México México. E-mail: jburillo@uach.mx. ORCID: 0000-0002-2539-9615.

Recibido: 28 de abril 2026

Aceptado: 30 de Junio del 2026

Publicado: 30 de Julio del 2026

Resumen.- Los prototipos para potabilizar agua son una opción económica y ambiental viable al alcance de una vivienda o sectores urbanos. Esta propuesta se alinea con el derecho humano al agua establecido por la ONU y los Objetivos de Desarrollo Sostenible 6 y 11 de la Agenda 2030. El objetivo del presente estudio es evaluar la eficiencia de tres prototipos para la remoción de arsénico (As) y fluoruro (F) del agua en una comunidad del Estado de Chihuahua. Se hizo la propuesta de diseño, construcción y operación de dos filtros de arenas con clavos de hierro y un destilador solar. Las concentraciones de As (0.0307–0.4527 mg/L) y F (2.32–8.75 mg/L) registradas en el acuífero Meoqui-Delicias son comparables con las del pozo San José de la comunidad La Regina, donde la concentración máxima de As fue de 0.324 mg/L y de F de 33.39 mg/L. Con el filtro casero se alcanzó hasta 96% de remoción de As y 95% de F; para el filtro comunitario, la eficiencia conjunta de As y F fue de más del 72%, y el destilador solar de más del 88%. La eficiencia dependió de la cantidad y tamaño de los clavos, tiempos de filtrado y tipo de arena. El filtro casero en la prueba 2 alcanzó un valor de As (0.009 mg/L), y el destilador solar en la prueba 17 As y F (0.002 y 0.86 mg/L), respectivamente; sin embargo, el agua tratada aún no es potable. El reto actual es involucrar a las comunidades para adaptar y operar estos sistemas.

Palabras clave: Filtros; Remoción; Arsénico; Fluoruro; Agua; Destilación solar.

Abstract.- Prototypes for purifying water are a viable economic and environmental option accessible to households and urban areas. This proposal aligns with the human right to water established by the UN and Sustainable Development Goals 6 and 11 of the 2030 Agenda. The objective of this study is to evaluate the efficiency of three prototypes for removing arsenic (As) and fluoride (F) from water in a community in the state of Chihuahua. A proposal was developed for the design, construction, and operation of two sand filters with iron nails and a solar distiller. The As concentrations (0.0307–0.4527 mg/L) and F (2.32–8.75 mg/L) recorded in the Meoqui-Delicias aquifer are comparable to those in the San José well in the community of La Regina, where the maximum concentration of As was 0.324 mg/L and that of F was 33.39 mg/L. The homemade filter achieved up to 96% removal of As and 95% removal of F; for the community filter, the combined removal efficiency for As and F was over 72%, and for the solar distiller, over 88%. Efficiency depended on the number and size of the nails, filtration times, and type of sand. The homemade filter in Test 2 achieved an As concentration of 0.009 mg/L, and the solar distiller in Test 17 achieved As and F concentrations of 0.002 and 0.86 mg/L, respectively; however, the treated water is still not potable. The current challenge is to engage communities in adapting and operating these systems.

Keywords: Filters; Removal; Arsenic; Fluoride; Water; Solar distillation.



1. Introducción

Resulta viable la potabilización del agua a nivel doméstico mediante sistemas de bajo costo y materiales asequibles de reducido impacto ambiental. Estas soluciones deben suministrar volúmenes adecuados para satisfacer las necesidades de la comunidad, ser económicamente accesibles, de rápida construcción y operación sencilla. Para ello, es necesario evaluar la tecnología disponible en términos de materiales (arena, grava, membranas), equipos (filtros, destiladores, aireadores, electroquímicos) y el aprovechamiento de energía de bajo costo (solar o eléctrica). Se debe considerar el ensamblaje de estos dispositivos utilizando agua original, asegurando que la calidad del agua sea verificable y sostenible en el tiempo.

Un sistema de potabilización con enfoque comunitario tiene como propósito desarrollar un proyecto de filtración que remueva eficazmente contaminantes como arsénico, fluoruro, plomo, fierro, manganeso. La viabilidad del sistema se incrementa al emplear materiales locales y mantener un bajo consumo energético.

Sus ejes fundamentales incluyen los contaminantes a remover, la selección de medios filtrantes y capacitación técnica para la operación y mantenimiento.

La integración social implica que la ciudadanía participe en el diseño, construcción y operación del sistema en viviendas o escuelas, proceso fortalecido por programas educativos y sanitarios. Se busca que estos sistemas cumplan con los estándares de calidad, reduzcan los riesgos epidemiológicos y fomenten el empoderamiento comunitario. Finalmente, la propuesta debe ser sostenible y escalable, que integre otros proyectos como cosecha de agua y recarga de acuíferos, asegurando una disposición segura de residuos y alineándose con el Objetivo de Desarrollo Sostenible 6 (ODS 6): Agua limpia y saneamiento [1].

Existen diversas técnicas para remover arsénico y fluoruro del agua subterránea, tales como la precipitación, coagulación/filtración, adsorción, intercambio iónico, tratamiento con cal, oxidación y filtración por membranas. El objetivo común es la transformación de As (III) a As(V), para después adsorberlo o precipitarlo.

En ambientes reductores, se requiere la aireación del agua para la oxidación de Fe (II) y la consecuente precipitación del As (III), seguida de una filtración en medio granular más un filtro de ósmosis inversa para completar la remoción del As (III)[2]. El uso de caliza local representa una alternativa de tratamiento sostenible para remover arsénico del agua subterránea en Guanajuato e Hidalgo, México. Pruebas en lote y columna utilizando agua natural de pozos profundos y sintética demostraron que, con un tamaño de partícula inferior a 0.062 mm de caliza, puede remover hasta 1.29 mg/L de As [3].

Por otra parte, los materiales naturales como cáscaras de plátano, yuca, coco y nuez han demostrado ser efectivos para remover metales pesados como As, Zn, Cd, Hg, Cu y Pb en sistemas caseros [4]. En el contexto local de Chihuahua, [5] sintetizaron hidrocarbón (hydrochar) a partir de bagazo de sotol para remediación simultánea de arsénico y fluoruro en agua subterránea. De igual forma, [6] reportó la remoción de As y F mediante un compuesto de biocarbón-fosfoyeso derivado de granos de destilería, alcanzando capacidades de 140.40 mg/g y 196.09 mg/g, respectivamente, manteniendo una eficiencia de 75.23% tras cinco ciclos de desorción.



En este ámbito, [7] realizó una revisión exhaustiva de las tecnologías de mitigación en Bangladesh, mientras que [8] desarrollaron un proyecto de remediación de un sitio contaminado con arsénico en agua subterránea. Mediante pruebas en columnas, se logró inmovilizar As (III) mediante la síntesis in situ de sulfuro ferroso (FeS) obtenido a partir de la reacción entre las soluciones de sulfato ferroso (FeSO_4) y sulfuro de sodio (Na_2S). Mediante este proceso, la concentración de arsénico disminuyó de 2000 $\mu\text{g/L}$ a 10 $\mu\text{g/L}$, cumpliendo con el estándar de calidad de la Organización Mundial de la Salud (OMS) [9].

Se evaluó la capacidad de dos materiales de trimesato de hierro (Basolite F-300 y Fe-BTC MOF) para remover arsénico. En cuanto al uso de carbón activado, se probó la remoción de As (V) empleando óxido de hierro cubierto con carbón activado puro (CAP) y granular (CAG). La máxima capacidad de adsorción se obtuvo a pH 5.5, con una dosis de 5 g/L y un tiempo de contacto de 16 h [10].

A nivel nacional, se ha investigado el origen del arsénico y del fluoruro en el agua y su riesgo asociado en estados como: Zacatecas [11]; [12], Guanajuato [13], la región de Guanajuato-Hidalgo [3] y Chihuahua [9] [14] y a nivel mundial en países como: Etiopía [15], Bolivia [16], Bangladesh [17], India [18], [19]; [20]; [21]; [22], Argentina [23] [24], Brasil [25], Indonesia [26], Pakistán [27], [28] [29] [30], [31]. y Estados Unidos [32]; en la mayoría de estos casos, los pozos de extracción se localizan en acuíferos compuestos por depósitos aluviales derivados de rocas volcánicas (riolitas y vidrio volcánico), así como en rocas sedimentarias y metamórficas, o en presencia de óxidos de hierro y arcillas.

La solución convencional para reducir el riesgo por consumo de agua con As y F ha sido la dilución con fuentes no contaminadas o el empleo de tecnologías con base en dispositivos de ósmosis inversa [14]. Sin embargo, la implementación en comunidades remotas es compleja debido a los costos y los requerimientos de operación y mantenimiento. Las nuevas propuestas incluyen la estabilización de desechos sólidos que retuvieron arsénico, el uso de materiales filtrantes cubiertos con hierro, la atenuación natural vía barreras reactivas de grava-hierro, compósitos de nano-Fe y nano-Mg, y sistemas de remoción integrados para la remoción simultánea de metales pesados y fluoruros. En definitiva, el diseño de un sistema de tratamiento sustentable requiere comprender la especiación química y los procesos redox involucrados en un contexto hidrogeológico [33].

El objetivo del presente estudio es evaluar la eficiencia de tres prototipos para la remoción de arsénico y fluoruro en una comunidad del Estado de Chihuahua. Hacer la propuesta de diseño, construcción y operación de prototipos, comparar su eficiencia de remoción, costo y cumplimiento normativo.

2. Materiales y métodos

2.1. Caracterización del área de estudio

Se consultaron los reportes de calidad del agua ante las autoridades locales de Julimes con el fin de identificar el pozo con los niveles más críticos de arsénico y fluoruro. Los registros analizados corresponden al año 2021, por ser los más recientes disponibles. Se monitoreó la calidad del agua en la fuente principal, el pozo “La Regina”, mediante mediciones in situ con una sonda multiparamétrica marca YSI y la toma de muestras para análisis fisicoquímico de laboratorio (Figura 1). El análisis fisicoquímico incluyó la determinación de pH, alcalinidad, calcio (Ca), magnesio (Mg), sodio (Na), potasio (K), hierro (Fe), bicarbonatos (HCO_3), sulfatos (SO_4), nitratos (NO_3), cloruros (Cl) y demanda química de oxígeno (DQO). La cuantificación de los fluoruros se realizó mediante el método de electrodo de ion selectivo (ISE), mientras que el arsénico se determinó por espectroscopía de absorción atómica, de acuerdo con la



norma NMX-AA-051-SCFI-2016. Todos los procedimientos analíticos se fundamentaron en el marco normativo vigente (NOM-0140SSA, NMX-AA-0740SCFI-2014, NMX-AA-082-SCFI-200, NMX-AA-073-SCFI-2001, NMX-AA-077).

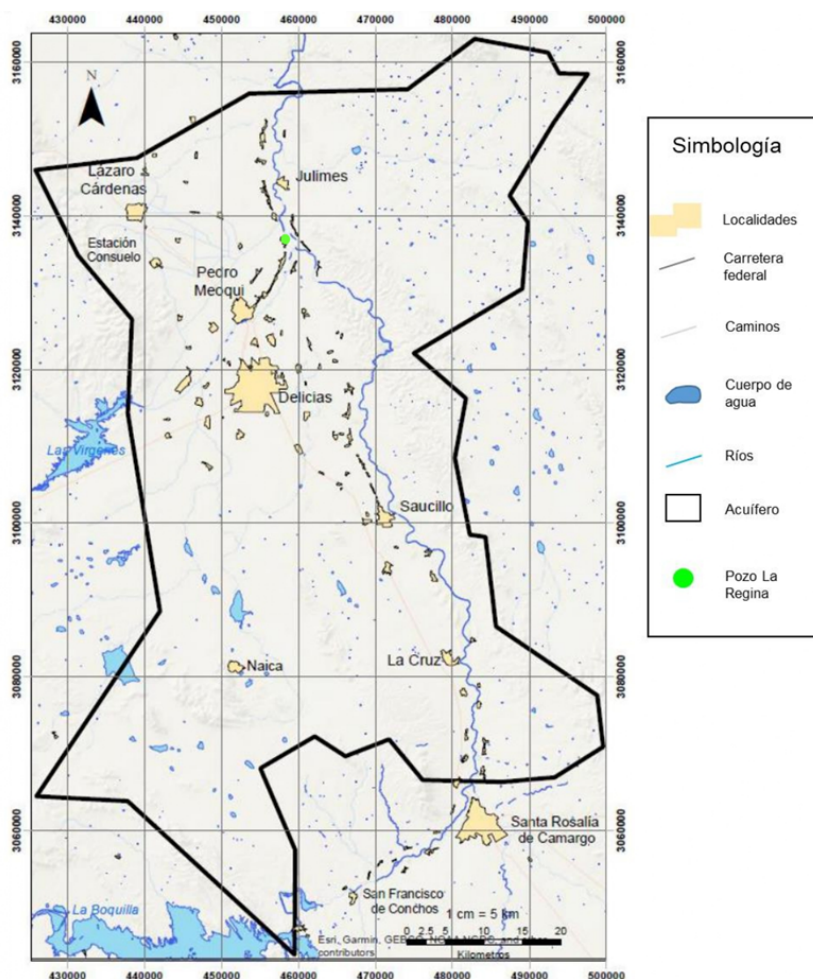


Figura 1. Localización del área de estudio (acuífero Meoqui-Delicias).

2.2. Diseño y construcción de los prototipos

Para el diseño y construcción de los prototipos se recolectaron materiales locales (sedimentos, grava y arena), los cuales fueron lavados, secados y caracterizados mediante análisis mineralógicos y granulométricos. Así mismo, se estimaron los costos de materiales, ensamblaje e instalación. Finalmente, se llevaron a cabo las pruebas de tratabilidad empleando agua real de los pozos “La Regina” y “Julimes”, así como del arroyo Julimes, para determinar la eficiencia de remoción. Los resultados se contrastaron con la NOM-127-2021[34], la cual establece como límites máximos permisibles 0.01 mg/L para arsénico y 1.0 mg/L para fluoruro, siendo de observancia obligatoria en el territorio nacional.

El material sedimentario utilizado para la construcción de los filtros se obtuvo de muestras recolectadas en Julimes, Jiménez y Samalayuca que corresponden a los filtros 1, 2 y 3, respectivamente. En la tabla 1 se detallan las coordenadas geográficas de cada punto de muestreo.



Tabla 1. Localización del material sedimentario de los filtros.

Material	Localidad	Coordenadas Este	Coordenadas Norte
Arena Filtro 1	Julimes	462318.00 m E	3143389.00m N
Grava Filtro 1	Julimes	461560.00 m E	3143697.00m N
Arena Filtro 2	Jiménez	509882.06 m E	3004066.04m N
Grava Filtro 2	Jiménez	509882.06 m E	3004066.04m N
Arena Filtro 3	Samalayuca	365124.83 m E	3457357.71m N
Grava Filtro 3	Samalayuca	349265.00 m E	3452487.00m N

Como material filtrante se seleccionó arena proveniente del lecho del río Florido, afluente del río Conchos, cuyo cauce atraviesa la ciudad de Jiménez, Chihuahua. El sitio de extracción se localiza a la altura del ejido Héroes de la Revolución, una comunidad rural perteneciente a dicho municipio. En la Figura 2 se presenta un croquis detallado con la ubicación geográfica exacta del punto de muestreo. En sitio se recolectaron aproximadamente 60 kg de grava de río con una granulometría de entre $\frac{1}{2}$ '' y $\frac{3}{4}$ '' . Se obtuvieron cerca de 40 kg de arena fina, depositada naturalmente por la corriente del río.



Figura 2. Localización del punto de extracción del material filtrante. Coordenadas geográficas: Lat. 27.159277°, Long. - 104.900142°.

Las muestras de suelo fueron clasificadas según sus granulometrías; para las gravas se emplearon tamices desde la malla 1 $\frac{1}{2}$ '' hasta la No. 4, mientras que para las arenas se utilizaron de la malla No. 4 a la No. 200. Mediante el cribado se eliminaron sedimentos finos (limos y arcillas), los cuales podrían aportar arsénico al agua. Para el lavado final de la grava se utilizó una malla No. 8 de acero galvanizado (2.75 mm) y, para la arena, una malla No. 60 (0.250 mm). El lavado se realizó con un flujo abundante de agua potable de red y, finalmente, el material se expuso al sol para su secado sobre costales de lona o de tela ixtle durante aproximadamente una hora. Una pequeña fracción del material fue analizada bajo el microscopio o lupa. Las imágenes se presentan en las figuras 3, 4 y 5.

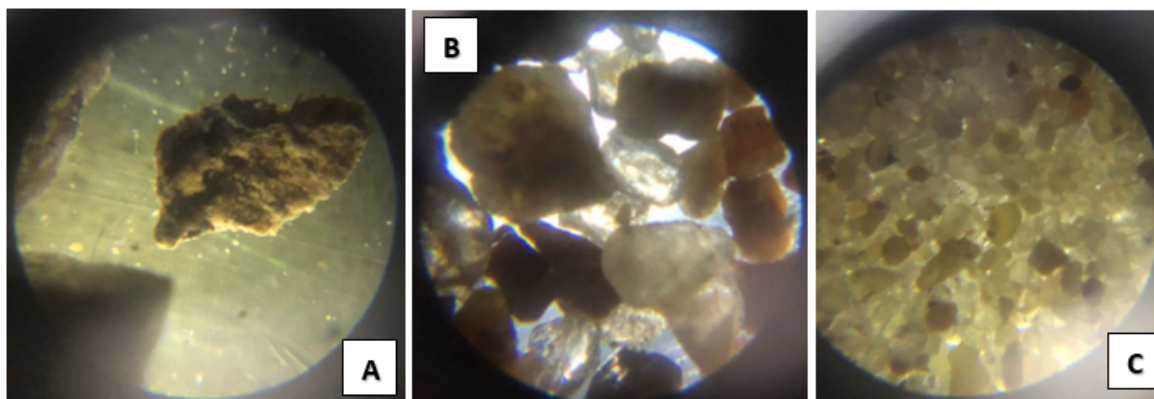


Figura 3. A) Grano de sedimento de Julimes. B) Jiménez C) Samalayuca.

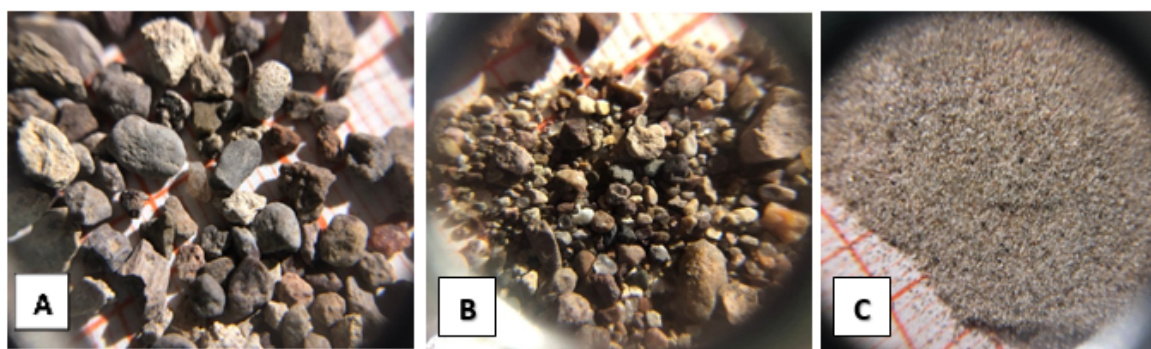


Figura 4. A) Fragmentos sedimentarios de Julimes. B) arena del río Florido, Jiménez; C) arena de Samalayuca.

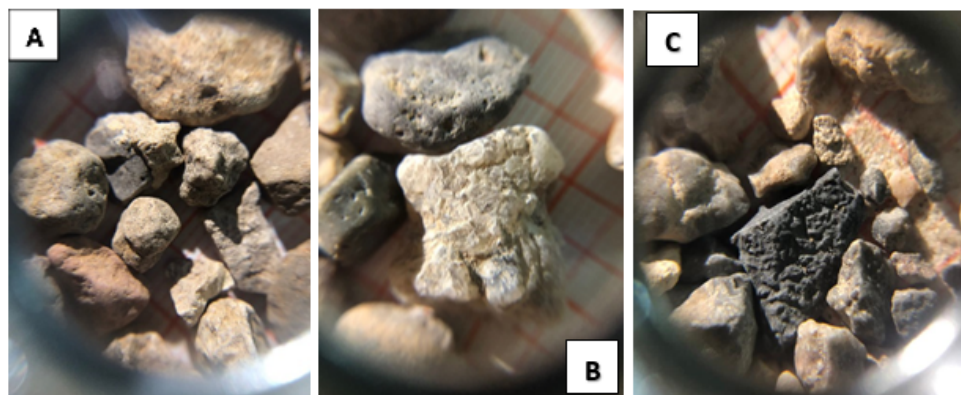


Figura 5. A) Grava de Julimes. B) Fragmentos de roca de Jiménez. C) Fragmentos de roca de Samalayuca.

El análisis granulométrico se realizó empleando tamices desde la malla No. 4 hasta la No. 200 para la arena, y desde 1 ½" hasta la No. 4 para la grava. El procedimiento se fundamentó en la Norma Mexicana NMX-C-077-1997-ONCE, titulada: "Agregados para concreto: Análisis granulométrico: Método de prueba". Asimismo, se atendieron las especificaciones de las normas complementarias:

- NMX-C-30-2004: "Industria de la construcción – Agregados - Muestreo".
- NMX-C-170-1997: "Industria de la construcción – Agregados - Reducción de las muestras de agregados obtenidas en el campo al tamaño requerido para las pruebas".



El proceso inició con la homogenización del material, seguido del muestreo y su reducción (cuarteo) bajo los lineamientos normativos mencionados; esto resultó en una muestra de 4.807 kg para la grava, acorde a un tamaño máximo de agregado de $\frac{1}{2}$ ", y de 531 g para la arena. Posteriormente, se hizo pasar el material por cada una de las mallas seleccionadas y se registraron las masas retenidas en cada una mediante una balanza.

El diseño del filtro doméstico consistió en el uso de cuatro garrafones de 19 litros dispuestos sobre soportes metálicos. Se construyeron tres variantes de filtros. Las especificaciones técnicas de estos prototipos se presentan en la Tabla 2 y figura 6.

Tabla 2. Materiales de construcción.

Materiales			
	Filtro 1	Filtro 2	Filtro 3
bote de 19 L	4 piezas	4 piezas	4 piezas
grava	20 kg	17 kg	15 kg
arena	23 kg	20 kg	22 kg
origen	Julimes	Jiménez	Samalayuca
clavos 3"	5 kg	2 kg	1 kg
tubo PVC 1/2"	2 m	2 m	2 m
válvula 1/2"	3 piezas	3 piezas	3 piezas
codo PVC 1/2"	4 piezas	4 piezas	4 piezas
tuerca unión 1/2"	2 piezas	2 piezas	2 piezas
filtro y portafiltro de sedimentos	1 pieza	1 pieza	1 pieza
mallla mosquitera	1.5 m	1.5 m	2 m
estructura metálica	1 pieza	1 pieza	1 pieza
regadera	2 piezas	2 piezas	2 piezas
conector de PVC 1/2" macho	7 piezas	7 piezas	7 piezas
conector de PVC 1/2" hembra	3 piezas	3 piezas	3 piezas



Para la construcción del prototipo comunitario, se utilizaron clavos de acero de 1 pulgada sin cabeza como fuente de hierro para el sistema. Se seleccionó el menor tamaño disponible con el fin de maximizar el área superficial específica y reducir los espacios intersticiales en el estrato filtrante. Los contenedores se seleccionaron de acrílico de 6 mm de espesor, con dimensiones de 50 x 50 cm de base y 30 cm de altura. La transparencia del acrílico facilita el análisis del comportamiento del flujo hídrico a través del medio filtrante y permite monitorear visualmente el proceso de oxidación de los clavos de acero. Como método de medición, se implementó el volumétrico, asistido por regletas verticales para medir la altura del agua en cada módulo.

ISSN: 2594-1925



cajón 3. La estratificación se basó en el modelo de [35], disponiendo capas de arena fina, clavos, arena fina y grava. Se propuso instalar en la tubería de descarga del cajón 3 un filtro de sedimento, con un cartucho reemplazable que funge como mantenimiento de este. Un boceto de la estructura del filtro se encuentra en la figura 7.

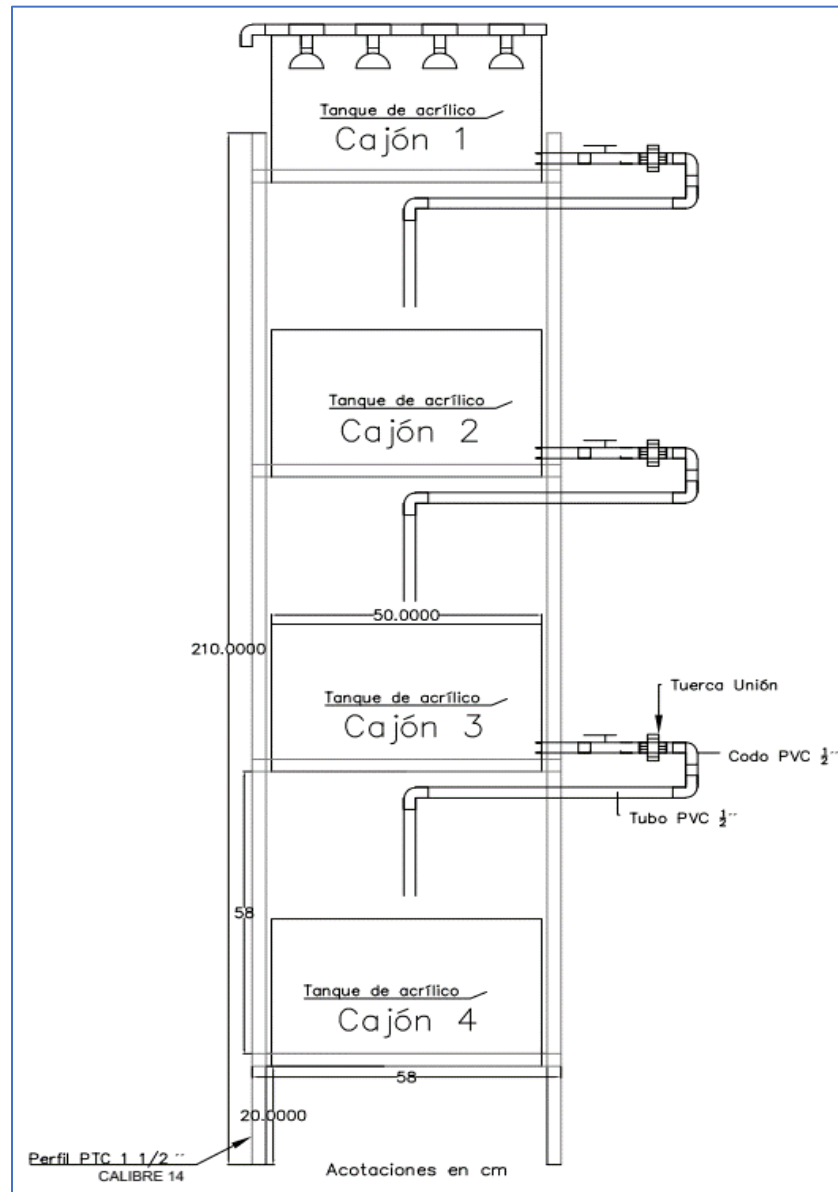


Figura 7. Prototipo comunitario.

Los estratos utilizados para el filtro se basaron en el trabajo presentado por [35] disponiendo una capa superior de arena fina, seguida del estrato que contiene los clavos, para posteriormente incluir otra capa de arena fina y finalmente grava en el último estrato, cubriendo el tubo de descarga del recipiente. El contenedor final (cajón 4) se destinó exclusivamente a arena y grava para retener los restos de óxido de hierro suspendido. Un boceto de los estratos propuestos para los cajones de acrílico, así como el grosor de estos, se muestra en la Figura 8.

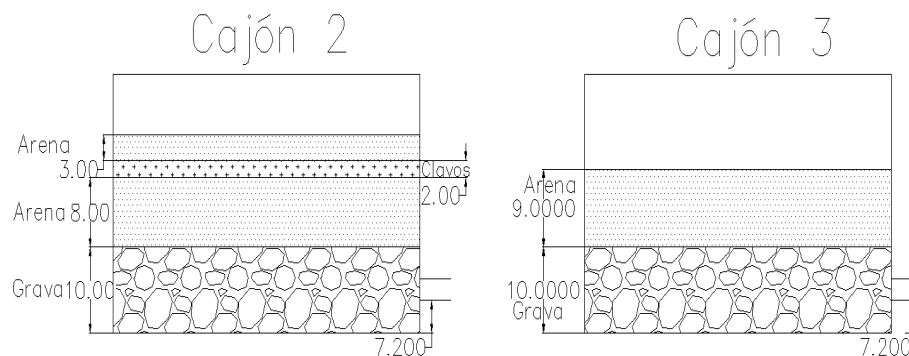


Figura 8. Estratos propuestos para los cajones 2 y 3 del filtro. Acotaciones en cm.

Se construyó e instaló un destilador solar en la Facultad de Ingeniería, utilizando una base de madera contrachapada (triplay) montada sobre una estructura de lámina de acero (Figura 9). El equipo, con dimensiones de 32 x 85 cm y capacidad de 25 L, incorpora un espejo interno para maximizar la reflexión de la radiación solar. Para la fase experimental, se preparó una solución salina y se generó una curva de calibración (mg/L vs. C.E.) para correlacionar la concentración de sólidos disueltos con la conductividad eléctrica. El acondicionamiento hidráulico incluyó las etapas de llenado, destilación, condensación y captación de agua dulce.



Figura 9. Prototipo destilador solar.

El filtro doméstico representó una inversión aproximada de \$8,800, distribuidos en \$6,700 para la estructura metálica y \$2,100 para la instalación hidráulica y los materiales filtrantes (incluyendo los clavos). El prototipo genera un caudal de agua tratada de 0.17 L/min.

Por su parte, el filtro comunitario tuvo un costo total de \$23,454, desglosado de la siguiente manera: \$12,504 en los contenedores de acrílico, \$8,000 en la estructura de soporte y \$2,950 en componentes hidráulicos. El prototipo produce un caudal de 1.7 L/min.



Finalmente, el destilador solar alcanzó un costo de \$32,000, el cual se divide en \$17,000 para insumos (madera contrachapada, lámina, ferretería, vidrio y espejo), \$12,800 por concepto de ensamblaje y \$2,200 destinados al diseño y elaboración de planos. El prototipo genera un caudal de agua destilada de 0.0007 L/min.

2.3. Operación de los prototipos

Para el funcionamiento del sistema doméstico, el agua a tratar se vertió en el contenedor o bote 1 y se transfirió al contenedor 2 mediante una válvula de paso de $\frac{1}{2}$ ". Una vez saturado el segundo contenedor, se inició la alimentación del contenedor 3 mediante una regadera. El agua filtrada se recolectó finalmente en el contenedor 4, completando así el ciclo de tratamiento. Con el fin de garantizar la obtención de agua clarificada, se instaló un filtro de sedimentos entre los contenedores 3 y 4 (Figura 10). Se efectuaron pruebas experimentales con tres prototipos: en el prototipo 1 el proceso se repitió cuatro veces, mientras que en los prototipos 2 y 3 se realizaron tres ciclos.



Figura 10. Prototipo casero.

La operación del sistema comunitario consistió en un flujo secuencial, utilizando válvulas de paso en la descarga de cada módulo para asegurar que el flujo en un nivel terminara por completo antes de iniciar el siguiente.

Las pruebas preliminares 1 y 2 se efectuaron empleando agua del pozo "La Regina" (Julimes, Chihuahua). Los resultados de la prueba con el prototipo comunitario se resumen en la tabla 3.

Tabla 3. Resultados de las pruebas con el prototipo comunitario.

Prueba	cajón	V	t	Q	L	S	h	altura	ke
		cm ³	min	cm ³ /min	cm	cm ²	cm	hidráulica	
1	2	25500	13	1961.5	13	2500	21.3	8.3	0.4377
1	3	25500	14.7	1734.69	11	2500	19.6	8.6	0.3894
2	2	21500	12.5	1720	13	2500	18.4	5.4	0.4384
2	3	21500	13.53	1589.06	11	2500	18	7	0.3884



Se calculó el coeficiente de permeabilidad equivalente (k_e) para los cajones 2 y 3 mediante la ecuación $k_e = QL/sh$, donde Q es el caudal, L el espesor del estrato, s el área transversal y h la diferencia de carga hidráulica. El coeficiente fue mayor en el cajón 2 que en el 3 ($0.43 > 0.38$), lo que indica que la presencia de los clavos favorece la permeabilidad en los materiales filtrantes. Las pruebas subsecuentes presentaron variaciones tanto en los tiempos de contacto dentro del segundo cajón como en la configuración de los ciclos de aireación.

Finalmente, para las pruebas de destilación, se vertieron 25 L de agua de pozo en el depósito del prototipo. Los experimentos se realizaron de manera secuencial, empleando el mismo destilador para dos muestras independientes: la primera del 28 al 30 de mayo de 2025 y la segunda del 2 al 4 de junio del mismo año. Cada ciclo experimental tuvo una duración de tres días. Los parámetros climatológicos se consultaron a través del portal NASA POWER. Durante este periodo, las condiciones meteorológicas registradas fueron: humedad relativa entre el 10 y 80%, temperaturas de 15 a 35 °, velocidad del viento entre 1 y 6 m/s y una radiación solar máxima de 4 MJ/h.

2.4. Pruebas de tratabilidad

Las pruebas de tratabilidad se realizaron con muestras de agua reales, por lo que se colectó 1 m³ de agua del pozo “La Regina” para las pruebas de filtración y 50 litros de agua del pozo Julimes para las de destilación. Se hicieron análisis de agua antes y después del tratamiento del agua. Para la prueba con el destilador solar, se determinó el flujo molar del permeado, mol/min/m². Se realizó la descripción del material filtrante de Julimes antes y después de las pruebas de tratabilidad con el filtro casero, para lo cual se colectaron muestras de arena, material grueso y clavos y se observaron mediante una lupa de joyero con luz LED de 20x-21 mm. Se observa el cambio de color del material filtrante, que es gris antes de la filtración y rojizo después de la filtración debido a la oxidación de los clavos de hierro (Figuras 11 y 12).

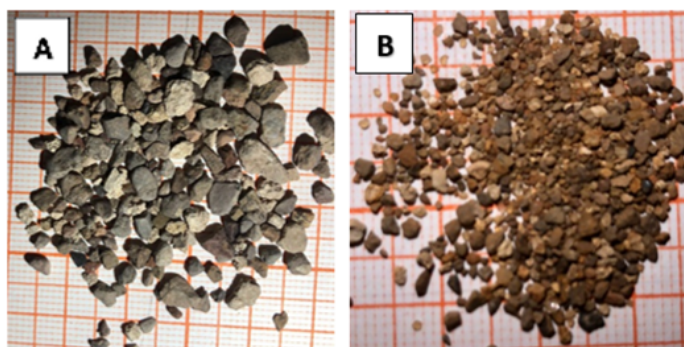


Figura 11. A) Material de Julimes antes de la filtración. B) Material después de la filtración.

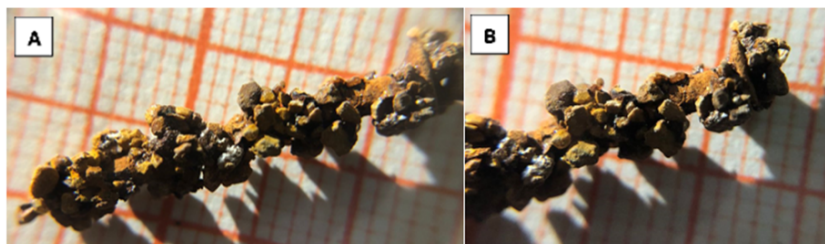


Figura 1. Clavos de 1”, con adhesiones de sedimentos y óxidos.



3. Resultados y discusión de resultados

3.1. Evaluación del área de estudio

En los pozos con registro del acuífero Meoqui-Delicias, se observó que las concentraciones de arsénico y fluoruros exceden los límites máximos permisibles establecidos por la NOM-127-2021[34]: 0.01 mg/L para arsénico y 1.0 mg/L para fluoruro. El rango de concentración en ambos elementos está fuera del límite de la norma NOM-127-2021 (Tabla 4).

Tabla 4. Calidad del agua del acuífero Meoqui-Delicias en septiembre de 2021.

Pozo	Contenido en mg/L	
	As	F
Julimes - Unidad Deportiva	0.0767	4.16
C. Salud	0.1007	4.39
C. Esperanza	0.1194	4.38
San José, La Regina	0.4527	8.75
Humboldt	0.0698	3.12
L. Nueva	0.0512	2.57
Arenillas	0.0307	2.32
El Carrizo	0.072	3.31
rango	0.0307 – 0.4527	2.32 – 8.75
NOM-127-2021	0.010	1.0

Al evaluar la calidad del agua en el pozo San José, en la comunidad de La Regina, entre 2022 y 2023 se identificaron valores elevados de sulfatos, un pH alcalino y un ambiente ligeramente oxidante con baja concentración de oxígeno disuelto. Lo anterior sugiere una posible disolución de minerales, principalmente yesos, calcita y fluorita, en un ambiente ligeramente aerobio que liberó minerales de arsénico como la arsenopirita y la fluorita (Figura 13). El rango de concentración de arsénico fue de 0.3 a 0.5 mg/L, que es superior al límite máximo permisible de la norma de 0.01 mg/L. El rango de concentración de fluoruro fue de 2 a 35 mg/L, por arriba del valor permisible de 1 mg/L. El rango de concentración de sulfato fue de 450-800 mg/L, que está por arriba del valor permisible de 400 mg/L. El rango permisible de pH es de 6.5-8.5; el rango del pH de las muestras fue de 8.1 a 8.9, que es considerado fuera del estándar. La concentración de oxígeno (OD) y el potencial óxido-reducción (Eh) no están regulados por la norma y se emplean para interpretar las condiciones del acuífero. El rango de concentración de oxígeno disuelto fue de 0 a 2.3 mg/L, mientras que el rango de Eh fue de 120 a 180 mV; la combinación de OD bajo, Eh positivo y pH alcalino es indicativa de aguas subterráneas con largo tiempo de residencia y poca interacción reciente con la atmósfera; esta condición favoreció la presencia de las especies de arsénico y fluoruros en el agua. Los resultados de las concentraciones de arsénico y fluoruros son comparables con los obtenidos por [36].

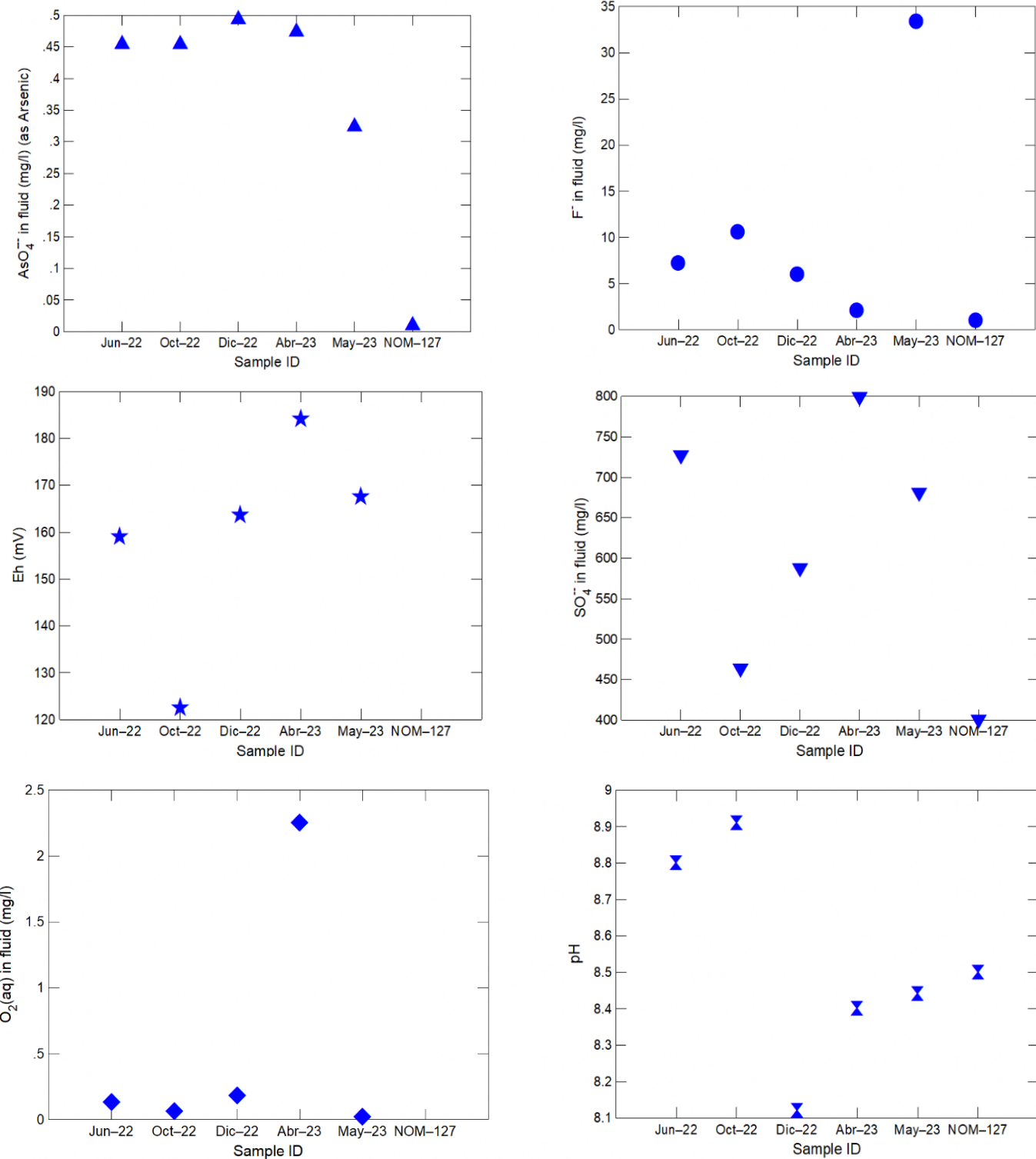


Figura 13. Calidad del agua del pozo “La Regina”



3.2. Evaluación del funcionamiento de los prototipos

Para el filtro de Julimes se emplearon 5 kg de clavos, para el de Jiménez 2 kg y para el de Samalayuca 1 kg (Tabla 2); como se observa en los valores resaltados en azul de la tabla 5, la cantidad de clavos mejora la remoción de arsénico del agua [35]. Se observó que la concentración del As con 2 ciclos de filtrado fue 0.034 mg/L y la concentración de F con 1 ciclo de filtrado fue 1.98 mg/L; en forma práctica, es más sencillo solo filtrar el agua 1 o 2 veces para potabilizarla.

Tabla 5. Calidad del agua con el prototipo casero en el pozo de Julimes (unidades de concentración en mg/L).

	Pozo	Filtro 1-Julimes				Filtro 2-Jiménez			3-Samalayuca			$\bar{x} \pm \mu$
												-
Prueba	No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	-
Parámetro	ciclos	3	11	2	10	1	12	2	1	2	4	-
pH	7.7	6.54	6.31	8.06	8.03	7.63	6.92	6.9	6.75	7.57	7.89	7.3±0.2
As	0.324	0.10	0.00	0.03	0.01	0.23	0.09	0.21	0.16	0.25	0.27	15 ± 0.03
F-	33.39	13.5	13.7	12.9	12.9	5.16	1.59	3.04	1.98	3.31	5.42	9.7±2.8
Alcalinidad	215	294	243	249	277	240	246	257	310	308	294	267±9
HCO ₃ ⁻	263	358	297	304	388	293	300	314	379	375	358	330.3±13
DQO	0	9.5	11.5	12.5	12.5	5	16.5	7	23	14	17.5	11.73 ±1.91
Cl	104.2	84.3	81.8	94.3	91.8	116	114	106	116	126	116	104.83±4.4
Ca ²⁺	25.61	61.7	55.8	115	66.0	59.3	105	92.6	74.3	62.1	57.6	70.6 ± 7.66
Mg ²⁺	0.62	3.94	2.99	3.67	2.68	3.07	5.45	3.59	4.08	2.15	3.64	3.26 ± 0.37
Na ⁺	336.9	267	209	248	251	302	290	337	446	443	380	319.3±23.6
N-NO ₃ ⁻	1.83	7.22	6.38	7.68	5.6	4.49	12.8	3.65	6.52	5.77	4.22	6.017 ±0.85
SO ₄ ²⁻	680.8	548	529	540	727	846	819	843	701	799.	718	705.1±36.3
Fe	<0.01	1.08	0.96	0.9	<0.1	0.17	0.12	0.22	0.44	0.2	0.8	0.15 ± 0.12

La remoción de As y F está controlada por la competencia de los iones por los sitios activos de los materiales adsorbentes; como los iones arseniatos y fluoruros tienen carga negativa, compiten con los bicarbonatos, sulfatos y nitratos del agua. Una interacción agua-clavos por días inicia un proceso de desorción de arsénico y fluoruro, lo que la aleja del límite permisible deseable, por lo que la recomendación es operar el filtro en flujo constante y vaciarlo después de su uso. La mejor remoción de arsénico y fluoruro se obtuvo después de 10 minutos de filtrado (Tabla 6). La NOM-127-2021 establece los siguientes límites máximos permisibles de calidad de agua potable: pH (6.5-8.5), cloruros (Cl) 250 mg/L, dureza total 500 mg/L como CaCO₃, sodio (Na) 200 mg/L, nitrógeno de nitratos (N-NO₃) 10 mg/L, sulfatos (SO₄) 400 mg/L e hierro (Fe) 0.30 mg/L. En el filtro comunitario se emplearon clavos de 1 pulgada, mientras que, en el filtro casero, de 3 pulgadas. La remoción aumentó con clavos de menor longitud porque aumenta el área superficial de contacto entre el agua y el material filtrante.


Tabla 6. Calidad del agua con el prototipo comunitario en el pozo de Julimes (unidades de concentración en mg/L).

	Pozo						
Prueba	No.	1	2	3	4	5	$x \pm \mu$
Parámetro	ciclos	1	1	3	2	1	
Duración	Tiempo*	10 min	3 días	4 días	1 día	10 min	-
pH	7.7	6.5	7.64	6.45	6.92	7.82	7.17 ± 0.25
As	0.324	0.0223	0.0869	0.0503	0.0301	0.0908	0.10 ± 0.04
F-	33.39	1.3	2.38	4.63	4.71	2.38	8.13 ± 5.08
Alcalinidad	215	778.4	425	439.6	246.4	274.4	396.5 ± 85.4
HCO ₃ ⁻	263.03	949.6	519.2	536.31	300.61	334.77	484 ± 104
DQO	0	35	12.5	8.5	16.5	2	12.42 ± 5.1
Cl	104.22	29.78	76.93	74.45	114.15	94.3	82.3 ± 12.2
Ca ²⁺	25.61	150.8	148.8	142.5	105.2	113.6	114.4 ± 19.4
Mg ²⁺	0.62	9.56	7.28	7.23	5.45	5.78	6 ± 1.23
Na ⁺	336.9	43.96	105.5	105.4	290.9	182	177.4 ± 47.1
N-NO ₃ ⁻	1.83	8.67	3.35	4.43	12.83	2.11	5.54 ± 1.77
SO ₄ ²⁻	680.79	266.2	550.7	407.66	819.7	605.35	555.1 ± 80.3
Fe	<0.01	0.13	<0.10	<0.10	0.12	<0.10	0.09 ± 0.01

*Tiempo de contacto agua-clavos en el cajón 2.

La conductividad eléctrica del agua y arroyo en Julimes se debe a la alcalinidad de bicarbonatos, cloruros, sulfatos, nitratos como aniones, así como a la presencia de calcio, magnesio y sodio como cationes (Tabla 7). El flujo molar del permeado de 4×10^{-2} mol/min-m² es comparable al obtenido por [37] con un destilador solar de membrana empleando agua natural salada de la nación navajo en Arizona.

Tabla 7. Calidad del agua con el destilador solar en Julimes (unidades de concentración en mg/L).

Sitio	Pozo		Arroyo		$x \pm \mu$
Parámetro	cruda	tratada	cruda	tratada	-
pH	7.3	4.82	7.3	6.40	6.45 ± 0.5
As	0.122	<0.001	0.123	0.002	0.06 ± 0.3
F-	10.40	1.21	13.55	0.86	6.5 ± 3.22
C.E. (μS/cm)	2470	24.40	1866	53.50	1103 ± 627
Alcalinidad	452.6	7.80	227.5	16.90	176 ± 105
SDT	1660	16.00	1026.67	29.33	683 ± 403
HCO ₃ ⁻	452.6	7.80	227.5	16.90	176 ± 105
Cl	209.93	0.00	69.98	1.00	70.2 ± 49.4
SO ₄ ²⁻	896	13.49	176	1.92	272 ± 212
Ca ²⁺	194.9	5.29	149.4	5.29	88.7 ± 49.1
Mg ²⁺	21.4	0.92	16.7	1.83	10.21 ± 5.2
Na ⁺	523	0.00	264.3	0.00	197 ± 125
N-NO ₃ ⁻	1.94	0.80	1.11	2.40	1.56 ± 0.3



3.3. Eficiencia de remoción y cumplimiento normativo

En cuanto a criterios sanitarios, el agua tratada no es todavía apta para consumo humano respecto a aspectos estéticos como su sabor regulado por el sodio (Na), cuyo límite es 200 mg/L, sulfatos con un límite de 400 mg/L y la posible presencia de incrustaciones por la dureza del agua. Las altas concentraciones de sulfatos en las muestras de agua de este estudio (n=20) se deben a la disolución de yeso, la alcalinidad de bicarbonatos, calcio y magnesio a disolución de calcita y dolomita, y el sodio y cloro a la evaporación del agua (Figura 14).

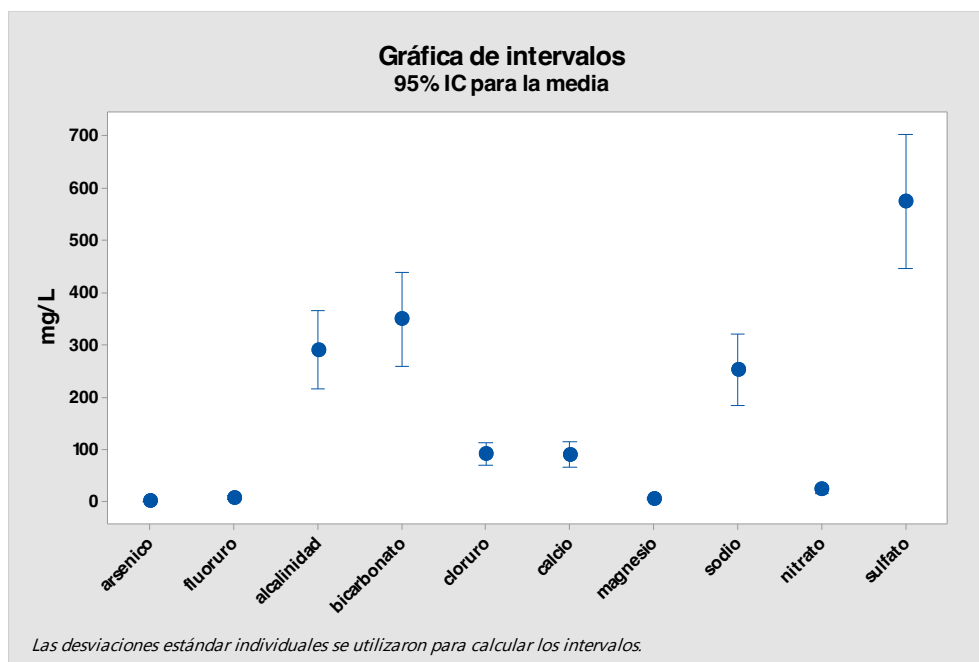


Figura 14. Gráfica de intervalos para todas las muestras de agua de este estudio.

La figura 15 muestra las eficiencias de remoción (%) y el cumplimiento normativo vigente de las muestras de agua tratada (n=17) según la norma NOM-127-SSA1-2021. Para las pruebas 1 a 10 se empleó el filtro casero con clavos de 3 pulgadas; del 11 al 15, el filtro comunitario con clavos de 1 pulgada; 16 y 17, el destilador solar. En las pruebas 1 a 4 se utilizó la arena de Julimes con 3, 11, 2 y 10 ciclos; en las pruebas 5, 6 y 7 se empleó la arena de Jiménez con 1, 12 y 2 ciclos; en las pruebas 8, 9 y 10 se empleó la arena de Samalayuca con 1, 2 y 4 ciclos. Las pruebas 11 y 12 se realizaron con 1 ciclo y 10 minutos de interacción agua-clavo, la prueba 13 con 1 ciclo y 3 días, la prueba 14 con 2 ciclos y 3 días, y la prueba 15 con 3 ciclos y 4 días. La prueba 16 se realizó con el agua del pozo Julimes, mientras que la 17 se hizo con el agua de su arroyo cercano. La mayor eficiencia de remoción de arsénico, 96%, se obtuvo con la arena de Julimes; la mejor remoción de fluoruro, 95%, con la arena de Jiménez y 94%, Samalayuca. Para el filtro comunitario se obtuvieron eficiencias de remoción conjunta de arsénico y fluoruro de más del 72%, mientras que con el destilador solar las eficiencias fueron de más del 88%. El filtro casero en la prueba 2 cumplió con el límite máximo permisible de arsénico (0.009 mg/L), y el destilador solar en la prueba 17 con los límites de arsénico y fluoruro (0.002 y 0.86 mg/L). El filtro comunitario en la prueba 11 produjo agua tratada con valores de arsénico de 0.02 mg/L y fluoruro 1.3 mg/L que están cerca del límite máximo permisible. El rango del arsénico del agua tratada está entre 0.001 y 0.274 mg/L, mientras que el del fluoruro, entre 0.86 y 12.84 mg/L (Figura 15).

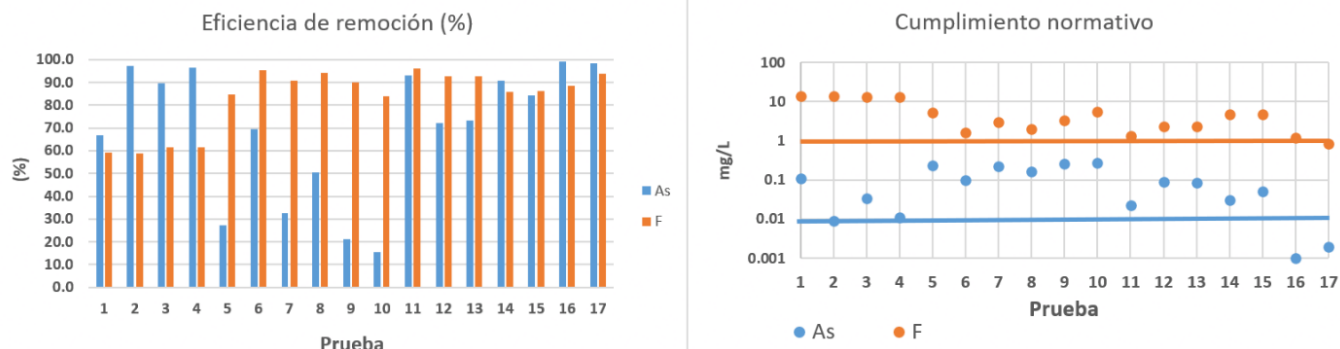


Figura 15. Eficiencias de remoción de arsénico y fluoruro, cumplimiento normativo según la norma NOM-121-SSA1-2021 de agua potable para consumo humano.

4. Conclusiones

Las concentraciones de arsénico As (0.0307 – 0.4527 mg/L) y fluoruro F (2.32 – 8.75 mg/L) en el acuífero Meoqui-Delicias son comparables con las que se obtuvieron en el pozo San José de la comunidad La Regina, en Julimes, Chihuahua, donde se obtuvieron concentraciones máximas de As de 0.324 mg/L y de F de 33.39 mg/L; la combinación de oxígeno disuelto bajo, Eh positivo y pH alcalino es indicativa de aguas subterráneas con largo tiempo de residencia y poca interacción reciente con la atmósfera. La disolución de yesos, calizas, fluorita y arsenopirita favoreció la liberación de As y F al agua.

Se diseñaron, construyeron y operaron tres diferentes prototipos para remover estos contaminantes; el filtro casero produce 0.17 L/min con un costo aproximado de \$8,800, mientras que el filtro comunitario produce 1.7 L/min con un costo de \$23,454. El destilador solar tuvo un costo de \$32,000 con un caudal de destilado de 0.0007 L/min; se calculó el flujo molar del permeado de este sistema, siendo de 4×10^{-2} mol/min-m². En todos los prototipos, se requiere de materiales asequibles en ferreterías locales.

Las pruebas de filtración se realizaron con agua real de Julimes caracterizada por su alta salinidad. La calidad del agua indica la presencia de iones arsénico, fluoruro, sulfatos, bicarbonatos, cloruros, calcio, sodio y magnesio. La remoción de As y F está condicionada por la competencia de estos iones por sitios activos de los materiales filtrantes.

La eficiencia de remoción de As y F depende de las características constructivas y operativas de los prototipos: aumenta la eficiencia con la cantidad de clavos de hierro (5 kg > 2 kg > 1 kg) porque se cuenta con mayor material adsorbente, al disminuir la longitud de clavo (1" > 3") porque aumenta el área superficial del material filtrante, al reducir el número de ciclos de filtrado (1 > 2 > 11 > 12) y el tiempo de filtrado (10 minutos > 3 días > 4 días) porque se evita la desorción del contaminante del material filtrante; se debe revisar la aireación del agua y el acondicionamiento de la grava y arena de acuerdo a las especificaciones del diseño. La mayor eficiencia de remoción de arsénico, 96%, se obtuvo con la arena de Julimes; la mejor remoción de fluoruro, 95%, con la arena de Jiménez y 94%, Samalayuca. Para el filtro comunitario se obtuvieron eficiencias de remoción conjunta de arsénico y fluoruro de más del 72%, mientras que con el destilador solar las eficiencias fueron de más del 88%. El filtro casero en la prueba 2 cumplió con el límite máximo permisible de arsénico (0.009 mg/L), y el destilador solar en la prueba 17 con los límites de arsénico y fluoruro (0.002 y 0.86 mg/L), respectivamente.



El agua tratada no es todavía apta para consumo humano, siendo el principal reto eliminar el contenido de sulfatos para el cumplimiento de la norma ambiental actual y la formación de sarro; se propone llevar a las comunidades locales esta propuesta de tratamiento para que adapten un diseño propio, revisen su funcionamiento, garanticen su operación y cumplimiento normativo.

5. Agradecimientos

Proyecto Ciencia de Frontera 377899 Fuentes geogénicas y mecanismos de movilización de arsénico y fluoruro a los sistemas de flujo de agua subterránea en la Sierra Madre Occidental, Laboratorio de hidráulica, Laboratorio de Ingeniería Sanitaria UACH, Autoridades locales en Julimes, Chihuahua.

6. Reconocimiento de autoría

Juan Carlos Burillo Montúfar: Conceptualización, análisis de datos, discusión, escritura y administración del proyecto. *Gilberto Wenglas Lara*: Ideas, Investigación, Desarrollo experimental y Análisis de datos. *Jorge Márquez Balderrama*: Revisión y edición. *Antonio Cardona Benavides*: Investigación y escritura.

Referencias

- [1] P. Singh, S. M. Andrabi, D. B. Raina, and A. Kumar, “Three staged integrated community-based water filter system for potable water by effective removal of contaminants from ground water,” *Journal of Water Process Engineering*, vol. 49, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.jwpe.2022.103044.
- [2] E. E. Cañas Kurz, U. Hellriegel, A. Figoli, B. Gabriele, J. Bundschuh, and J. Hoinkis, “Small-scale membrane-based arsenic removal for decentralized applications—Developing a conceptual approach for future utilization,” May 15, 2021, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.watres.2021.116978.
- [3] M. A. Armienta-Hernández *et al.*, “Evaluation of the Use of Limestones for the Removal of Arsenic from Groundwater,” *Water (Switzerland)*, vol. 17, no. 11 de junio de 2025, doi: 10.3390/w17111687.
- [4] L. D. Senanu, G. Kranjac-Berisavljevic, and S. J. Cobbina, “The use of local materials to remove heavy metals for household-scale drinking water treatment: A review,” Feb. 01, 2023, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.eti.2023.103005.
- [5] P. E. Silva-Escalante *et al.*, “Hydrochar from Sotol bagasse for groundwater remediation of arsenic and fluoride contaminants,” *Groundw. Sustain. Dev.*, vol. 30, p. 101471, ago. 2025, doi: 10.1016/J.GSD.2025.101471.
- [6] J. Liu, B. Wang, M. Chen, P. Wu, M. Hassan, and X. Zhang, “Synergistic removal of arsenic and fluoride in water by engineered phosphogypsum-biochar composite: Adsorption behavior and mechanisms,” 2025. [En línea]. Available: <https://ssrn.com/abstract=5237281>. doi: 10.1016/j.jece.2025.118316.
- [7] Salma Akter Mou Md Humayun Kabir Sabina Yasmin Shamim Ahmed, “Arsenic Mitigation Technologies from Ground Water: A Brief Review,” *American Journal of Pure and Applied Biosciences*, pp. 139–158, Oct. 2020, doi: 10.34104/ajpab.020.01390158.
- [8] M. Tiwari, K. K. Mandal, and T. Raychoudhury, “Evaluation of injection schedule for synthesizing iron-sulfide within the porous media for immobilizing arsenite: In-situ remediation



- approach for arsenic in groundwater,” *Groundw. Sustain. Dev.*, vol. 10, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.gsd.2019.100320.
- [9] T. Türk, T. Boyraz, and I. Alp, “Fe-based layered double hydroxides for removing arsenic from water: Sorption–desorption–regeneration,” *J. Water Health*, vol. 19, no. 3, pp. 457–467, Jun. 2021, doi: 10.2166/WH.2021.026.
- [10] M. Muongpak, S. Khaodhiar, and J. Lohwacharin, “Iron oxide coated activated carbons for arsenate adsorption from groundwater *,” no. January, 2017.
- [11] J. Ortiz-Letechipia, J. González-Trinidad, H. E. Júnez-Ferreira, C. Bautista-Capetillo, and S. Dávila-Hernández, “Evaluation of groundwater quality for human consumption and irrigation in relation to arsenic concentration in flow systems in a semi-arid mexican region,” *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 18, no. 15, Aug. 2021, doi: 10.3390/ijerph18158045.
- [12] J. Ortiz Letechipia *et al.*, “Aqueous Arsenic Speciation with Hydrogeochemical Modeling and Correlation with Fluorine in Groundwater in a Semiarid Region of Mexico,” *Water (Switzerland)*, vol. 14, no. 4, Feb. 2022, doi: 10.3390/w14040519.
- [13] P. S. K. Knappett *et al.*, “Changing recharge pathways within an intensively pumped aquifer with high fluoride concentrations in Central Mexico,” *Science of the Total Environment*, vol. 622–623, pp. 1029–1045, 2018, doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.12.031.
- [14] M. Gutiérrez, M. S. Espino Valdés, M. T. Alarcón Herrera, A. Pinales Munguía, and H. Silva Hidalgo, “Arsénico y flúor en agua subterránea de Chihuahua: su origen, enriquecimiento, y tratamientos posibles,” *TECNOCENCIA Chihuahua*, vol. 15, no. 2, pp. 95–108, Sep. 2021, doi: 10.54167/tecnociencia. v15i2.828.
- [15] G. Bianchini *et al.*, “Origin of fluoride and arsenic in the main ethiopian rift waters,” *Minerals*, vol. 10, no. 5, 2020, doi: 10.3390/min10050453.
- [16] I. Quino Lima *et al.*, “Hydrogeochemical contrasts in the shallow aquifer systems of the Lower Katari Basin and Southern Poopó Basin, Bolivian Altiplano,” *J. South Am. Earth Sci.*, vol. 105, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.jsames.2020.102914.
- [17] N. Saha and M. S. Rahman, “Groundwater hydrogeochemistry and probabilistic health risk assessment through exposure to arsenic-contaminated groundwater of Meghna floodplain, central-east Bangladesh,” *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, vol. 206, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.ecoenv.2020.111349.
- [18] J. Podgorski and M. Berg, “Global threat of arsenic in groundwater,” *Science (1979).*, vol. 368, no. 6493, pp. 845–850, 2020, doi: 10.1126/science.aba1510.
- [19] P. J. S. Kumar, “Groundwater fluoride contamination in Coimbatore district: a geochemical characterization, multivariate analysis, and human health risk perspective,” *Environ. Earth Sci.*, vol. 80, no. 6, Mar. 2021, doi: 10.1007/s12665-021-09521-w.
- [20] S. A. Lone, G. Jeelani, A. Mukherjee, and P. Coomar, “Arsenic fate in upper Indus river basin (UIRB) aquifers: Controls of hydrochemical processes, provenances and water-aquifer matrix interaction,” *Science of the Total Environment*, vol. 795, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.148734.
- [21] S. Madhav, N. J. Raju, A. Ahamad, A. K. Singh, P. Ram, and W. Gossel, “Hydrogeochemical assessment of groundwater quality and associated potential human health risk in Bhadohi environs, India,” *Environ. Earth Sci.*, vol. 80, no. 17, Sep. 2021, doi: 10.1007/s12665-021-09824-y.
- [22] S. K. Yadav, A. L. Ramanathan, M. Kumar, S. Chidambaram, Y. P. Gautam, and C. Tiwari, “Assessment of arsenic and uranium co-occurrences in groundwater of central Gangetic Plain, Uttar Pradesh, India,” *Environ. Earth Sci.*, vol. 79, no. 6, 2020, doi: 10.1007/s12665-020-8892-x.



- [23] A. Aullón Alcaine *et al.*, “Hydrogeochemical controls on the mobility of arsenic, fluoride and other geogenic co-contaminants in the shallow aquifers of northeastern La Pampa Province in Argentina,” *Science of the Total Environment*, vol. 715, May 2020, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.136671.
- [24] E. E. Mariño, G. T. Ávila, P. Bhattacharya, and C. J. Schulz, “The occurrence of arsenic and other trace elements in groundwaters of the southwestern Chaco-Pampean plain, Argentina,” *J. South Am. Earth Sci.*, vol. 100, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.jsames.2020.102547.
- [25] A. C. Meneguelli-Souza *et al.*, “Arsenic in groundwater in Paraíba do Sul river, Brazil: sources, hydrogeochemistry, and correlation with redox parameters,” *Environ. Earth Sci.*, vol. 79, no. 9, May 2020, doi: 10.1007/s12665-020-08934-3.
- [26] A. F. Rusydi *et al.*, “Groundwater salinity and its effect on elevated concentrations of other contaminants in a coastal plain: A perspective for infrastructure protection,” in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Institute of Physics, 2022. doi: 10.1088/1755-1315/1065/1/012054.
- [27] S. A. Talpur *et al.*, “Hydrogeochemical signatures and suitability assessment of groundwater with elevated fluoride in unconfined aquifers, Badin district, Sindh, Pakistan,” *SN Appl. Sci.* 2, 175 (2020). *Sci.*, vol. 2, no. 6 de junio de 2020, doi: 10.1007/s42452-020-2821-1.
- [28] Natasha *et al.*, “Hydrogeochemical and health risk evaluation of arsenic in shallow and deep aquifers along the different floodplains of Punjab, Pakistan,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 402, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.124074.
- [29] A. Parvaiz, J. A. Khattak, I. Hussain, N. Masood, T. Javed, and A. Farooqi, “Salinity enrichment, sources and its contribution to elevated groundwater arsenic and fluoride levels in Rachna Doab, Punjab Pakistan: Stable isotope ($\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$) approach as an evidence,” *Environmental Pollution*, vol. 268, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.envpol.2020.115710.
- [30] V. Amiri, P. Bhattacharya, and M. Nakhaei, “The hydrogeochemical evaluation of groundwater resources and their suitability for agricultural and industrial uses in an arid area of Iran,” *Groundw. Sustain. Dev.*, vol. 12, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.gsd.2020.100527.
- [31] Y. Zheng, “Global solutions to a silent poison,” May 22, 2020, *American Association for the Advancement of Science*. doi: 10.1126/science.abb9746.
- [32] Jones, M.C., Credo, J.M., Ingram, J.C., Baldwin, J.A., Trotter, R.T., Jr. and Propper, C.R. (2020), Arsenic Concentrations in Ground and Surface Waters across Arizona Including Native Lands. *Journal of Contemporary Water Research & Education*, 169: 44-60. doi: 10.1111/j.1936-704X.2020.03331.x
- [33] S. R. Kanel *et al.*, “Arsenic Contamination in Groundwater: Geochemical Basis of Treatment Technologies,” May 17, 2023, *American Chemical Society*. doi: 10.1021/acsenvironau.2c00053.
- [34] Secretaría de Salud (SSA). (2021). NOM-127-SSA1-2021, Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua: SSA.
- [35] A. Bretzler *et al.*, “Arsenic removal with zero-valent iron filters in Burkina Faso: Field and laboratory insights,” *Science of the Total Environment*, vol. 737, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139466.
- [36] D. A. Padilla-Reyes *et al.*, “Arsenic and fluoride in groundwater triggering a high risk: Probabilistic results using Monte Carlo simulation and species sensitivity distribution,” *Chemosphere*, vol. 359, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.chemosphere.2024.142305.



- [37] V. Karanikola, A. F. Corral, P. Mette, H. Jiang, R. G. Arnoldand, and W. P. Ela, “Solar membrane distillation: Desalination for the Navajo Nation,” *Rev. Environ. Health*, vol. 29, no. 1–2, pp. 67–70, 2014, doi: 10.1515/revch-2014-0019.

Derechos de Autor (c) 2026 Juan Carlos Burillo Montúfar, Antonio Cardona Benavides, Gilberto Wenglas Lara, Jorge Márquez Balderrama



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Usted es libre para compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia](#) - [Texto completo de la licencia](#)