

## Remoción de hierro del agua mediante un filtro permeable adicionado con jarosita. Iron removal from water using a permeable filter supplemented with jarosite.

A. Dominguez-Jimate <sup>a,\*</sup>, J. R. Serralde-Lealba <sup>b</sup>, E. Moreno-Pérez <sup>a</sup> y J. Hernández-Ávila <sup>b</sup>

<sup>a</sup>Área Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

<sup>b</sup>Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

### Resumen

Esta investigación evaluó la jarosita de potasio como filtro de metales pesados en la presa “El Potrero” en Hidalgo, mediante su incorporación en concreto permeable. Por ello, se diseñaron cilindros de concreto permeable con jarosita para analizar su capacidad de filtrar metales pesados y elementos tóxicos para futuras aplicaciones en aguas de embalses, peligrosas para plantas y humanos. Asimismo, se midió la resistencia a la compresión a los 28 días y la calidad del agua antes y después de la filtración. Los resultados mostraron una reducción en la concentración de metales, principalmente el Fe, de acuerdo con la normativa NOM-127-SSA1-2021. También, la jarosita no afectó la resistencia del concreto siendo viable para estructuras y tratamiento de aguas contaminadas, manteniéndose inerte y sin impacto ambiental.

*Palabras Clave:* Jarosita, gestión del agua, metales pesados

### Abstract

This research evaluated potassium jarosite as a filter for heavy metals in the “El Potrero” dam in Hidalgo, through its incorporation in permeable concrete. Therefore, permeable concrete cylinders were designed with jarosite to analyze its capacity to filter heavy metals and toxic elements for future applications in reservoir waters, dangerous for plants and humans. The 28-day compressive strength and water quality before and after filtration were also measured. The results showed a reduction in the concentration of metals, mainly Fe, in accordance with NOM-127-SSA1-2021. In addition, jarosite did not affect the strength of the concrete, being viable for structures and treatment of contaminated water, remaining inert and without environmental impact.

*Keywords:* Jarosite, heavy metals, water management

### 1. Introducción

Los embalses son cuerpos de aguas artificiales esenciales para la generación hidroeléctrica, el suministro de agua potable, la agricultura y la vida acuática. (Caballero Arbizú, 2023; Márquez-Pacheco et al., 2023). La evaluación de la calidad del agua en estos embalses ha revelado problemas con la turbidez, color y concentraciones elevadas de hierro, factores que contribuyen a que muchos de estos cuerpos de agua se consideren marginales o inadecuados para el consumo humano y solo regulares para la protección de la vida acuática (Caballero Arbizú, 2023; Rodríguez Cruz, 2022). Investigaciones anteriores han indicado que el nivel de contaminación por metales pesados en los sistemas acuáticos fluctúa estacionalmente debido a los cambios en las precipitaciones y el comportamiento humano (Elzwayie et al., 2017, Yuan et al., 2020).

Estos embalses contaminados representan un grave riesgo tanto para los ecosistemas como para la salud pública, ya que los metales pesados como el plomo, mercurio y el propio hierro pueden causar daños significativos (Gao et al., 2021). Las afecciones incluyen la disminución del crecimiento de plantas y problemas de salud graves en humanos, como enfermedades respiratorias, cáncer y deterioro al sistema nervioso (Huizar-Álvarez, 1997; Yaashikaa et al., 2022).

En México, el 74% de los ríos y cuencas están contaminados, afectando no solo la biodiversidad local sino también la calidad del agua disponible para el consumo humano (Viniegra et al., 2017). Ríos como el Santiago-Lerma, Tula y Atoyac son ejemplos de cuerpos de agua severamente afectados por la contaminación, presentando concentraciones peligrosas de metales pesados como plomo y mercurio (Reyes et al., 2016). Además, la escorrentía urbana ha exacerbado la contaminación en las aguas superficiales y subterráneas, un

\*Autor para la correspondencia: do434778@uaeh.edu.mx

Correo electrónico: do434778@uaeh.edu.mx (Aketzali Dominguez-Jimate) \*, juan\_serralde@uaeh.edu.mx (Juan Rubén Serralde-Lealba), emp10000@hotmail.com (Emiliano Pérez-Moreno) y herjuan@uaeh.edu.mx (Juan Hernández-Ávila).

problema que ha sido creciente desde los años 60 (ACI-522R-06, 2006). Esta situación subraya la necesidad urgente de implementar soluciones que aborden tanto la contaminación existente como la prevención de futuras contaminaciones.

En 2017, se identificaron concentraciones de hierro que excedían los límites establecidos por la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 en el agua de la presa El Potrero (figura 1), ubicada en la localidad de La Estanzuela, Municipio de Mineral del Chico, Hidalgo. Este embalse, como muchos otros en el país, ha sido afectado por la contaminación debido a la acumulación de metales pesados y otros desechos industriales (Jabar, 2020). Para abordar esta problemática, el proyecto propone un proceso de filtración en dos etapas utilizando jarosita potásica y concreto permeable.



Figura 1. Ubicación de la presa "El Potrero", en el estado de Hidalgo, México.

La jarosita potásica es un residuo minero con propiedades de retención de metales pesados, lo que la convierte en un material viable para la remediación de aguas contaminadas (Urviola et al., 2020). Su capacidad para retener metales como el plomo ha sido demostrada en estudios previos, posicionándola como una opción prometedora para el tratamiento de aguas residuales (Aguilar-Carrillo et al., 2017; Serralde et al., 2023). Por otro lado, el concreto permeable es un material que ha sido utilizado desde el siglo XIX, conocido por su capacidad para permitir el paso del agua, reduciendo así la escorrentía y promoviendo la filtración natural (Bosso y Enzweiler, 2002; Fassman y Blackbourn, 2010). Este material es especialmente útil en áreas urbanas, donde la impermeabilización del suelo es un problema común que contribuye a la contaminación de las aguas de embalses (Fan et al., 2022).

La utilización combinada de jarosita potásica y concreto permeable en este proyecto, no solo busca reducir la concentración de metales pesados en los embalses contaminados, sino también ofrecer una solución sostenible que aprovecha materiales residuales, promoviendo así la economía circular (Bosso and Enzweiler, 2002). Este enfoque podría representar un avance significativo en la mejora de la calidad del agua en regiones afectadas por la actividad industrial y el crecimiento urbano descontrolado (Gao et al., 2021). El hierro, a pesar de ser un elemento esencial para la vida humana, puede ser altamente perjudicial en concentraciones elevadas, actuando como un oxidante potente que puede dañar las arterias y el tejido cardíaco (Dilpazeer et al., 2023). Este riesgo es particularmente alto en áreas donde la contaminación por metales pesados es prevalente, lo que subraya la importancia de desarrollar tecnologías efectivas

para su remoción del agua (Reyes et al., 2016). En este contexto, la combinación de jarosita potásica y concreto permeable ofrece una solución innovadora y potencialmente efectiva para mitigar los efectos de la contaminación en los embalses, mejorando la calidad del agua y protegiendo la salud pública y el medio ambiente.

## 2. Metodología

### 2.1 Síntesis de jarosita potásica.

La síntesis de la jarosita de potasio se realizó en la Unidad Central de Laboratorios de la UAEH (UCL) bajo las siguientes condiciones: 0.15 M de sulfato de hierro,  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  (J.T. Baker, Phillipsburg, NJ, EE. UU.) y 0.15 M de sulfato de potasio,  $\text{K}_2\text{SO}_4$  (J.T. Baker, Phillipsburg, NJ, USA).

La solución acuosa se preparó en un reactor de cuatro bocas de 1.0 L de capacidad con agua destilada, y equipado con un sistema de medición de pH, manteniendo la temperatura a 70 °C y agitación mecánica continua (figura 2a). Para ajustar el pH de la solución a un valor entre 1 y 2, se emplearon hidróxido de sodio (NaOH) y ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), ambos suministrados por Sigma-Aldrich (St. Louis, MO, EE. UU.).

Ya finalizada la reacción de síntesis, la solución permaneció en reposo por un tiempo de 24 horas para evitar la coalescencia de las partículas y posteriormente el producto fue decantado y secado a temperatura ambiente por 24 horas (figura 2b).

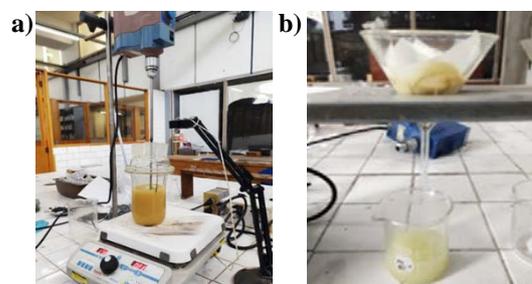


Figura 2. Síntesis (a) y filtración (b) de la jarosita de potasio.

### 2.2. Caracterización química y mineralógica.

La muestra se preparó mediante un tamizado de partículas menores de 75  $\mu\text{m}$  y se calentó a 100 °C durante seis horas en un horno de laboratorio, utilizando un controlador digital. Posteriormente, se sometió a métodos analíticos de caracterización.

#### 2.2.1 Microscopía electrónica de barrido.

El análisis morfológico de las muestras se llevó a cabo empleando un Microscopio Electrónico de Barrido JEOL JSM-IT300, fabricado por JEOL en Tokio, Japón, ubicado en la Escuela Superior de Apan de la UAEH. El microscopio está equipado con un espectrómetro de rayos X en dispersión de energía (EDS) de la marca Oxford. Para el análisis, se colocaron 10 mg de material en polvo en un porta-muestras y se recubrieron con oro, utilizando un voltaje de operación de 20 kV.

## 2.2.2 Composición química y mineralógica.

Para determinar la composición química mineralógica se realizó medición de las muestras en un equipo de Difracción de Rayos X marca INEL modelo Equinox 2000 (Centro Val de Loire, Francia). Este dispositivo utiliza un filamento de Cobalto y realiza barridos de 10 minutos por muestra. La indexación de los difractogramas obtenidos se llevó a cabo mediante el software MATCH, versión 1.1 (desarrollado por Crystal Impact, Bonn, Alemania), realizando un refinamiento Rietveld para determinar los porcentajes de cristalinidad y los tamaños de cristal de cada muestra.

Para verificar y confirmar la presencia del elemento dopado en la estructura de la jarosita, se llevó a cabo un análisis infrarrojo por transformada de Fourier con reflectancia total (ATR-FTIR). Este examen se realizó utilizando un espectrómetro FTIR Perkin Elmer Frontier (Waltham, MA, EE. UU.). Se colocaron 10 mg de la muestra en polvo sobre la superficie del cristal de forma cuidadosa, y cada espectro obtenido se registró con una absorbancia menor al 75 %. Los espectros se escanearon en un rango de longitudes de onda de 4300 a 300  $\text{cm}^{-1}$ .

## 2.3 Ensayo mecánico: Resistencia a la compresión

Para evaluar la resistencia a la compresión, se prepararon dos tipos de especímenes de concreto permeable: uno sin aditivos (CN) y otro con adición de jarosita (CJ), cada uno con tres réplicas. Se utilizó un agregado de tamaño 3/8", fundamentado en estudios que indican que este tamaño mejora las características del concreto permeable (Pinto et al., 2018). La mezcla se elaboró conforme a las directrices de la Norma ACI 522R-06, utilizando una relación agua/cemento de 0.36 y una relación de agregado/cemento de 4:1, de acuerdo con Tennis et al. (2004). En el concreto con jarosita (CJ), el mineral se integró uniformemente en la mezcla.

Los especímenes CN y CJ fueron evaluados en resistencia a la compresión siguiendo las normas NMX-083 y ASTM C39, garantizando una superficie estable mediante el uso de cabezales de neopreno. Se sometieron a una carga gradual en una máquina de ensayo Controls Pilot, ubicada en la Ciudad del Conocimiento de la UAEH, hasta alcanzar el fallo, registrando la carga máxima soportada por cada espécimen.

## 2.4 Filtros de probeta

Se elaboraron tres tipos de especímenes de filtros de concreto permeable en forma de cilindros de 2.5 cm de diámetro por 6 cm de altura con un tubo de acrílico dentro. Los filtros se clasificaron de la siguiente manera: uno con concreto (FC), otro solo con el mineral jarosita (FJ) y uno con concreto y jarosita (FCJ), todos por triplicado (figura 3). De igual manera, se seleccionó un tamaño de agregado de 2.38 mm, debido al tamaño reducido de los cilindros.

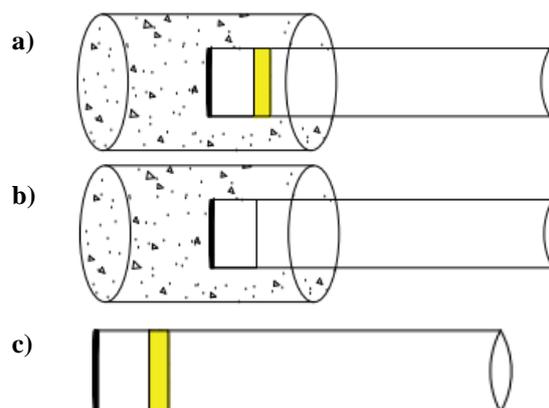


Figura 3. Filtros de jarosita: la figura a) muestra un filtro combinado de jarosita, algodón y papel filtro imbuído en un cilindro de concreto; la figura b) se muestra solo el filtro con el algodón, papel filtro y concreto; la figura c) muestra el filtro con jarosita, algodón y papel filtro.

Se mezclaron los materiales siguiendo las proporciones y métodos descritos en la Norma ACI 522R-06, utilizando una relación agua/cemento de 0.36 y una relación de agregado/cemento de 4:1. Los especímenes se mantuvieron en condiciones de curado controlados durante 28 días según las normativas, para garantizar un adecuado desarrollo de resistencia y permeabilidad

## 2.5 Análisis químico del agua.

Se llevó a cabo una prueba de filtración utilizando cilindros de concreto permeable en tres variantes: uno con concreto permeable normal (FC), otro con jarosita (FJ), y uno con ambos (FCJ). Estos cilindros fueron colocados en un entorno controlado simulado con agua contaminada en exceso de hierro (Fe) y manganeso (Mn), siguiendo los parámetros de la norma NOM-127-SSA1-2021. La prueba consistió en pasar 300 ml de agua a través de cada cilindro usando una jeringa. Posteriormente, el agua filtrada de cada muestra fue analizada en las instalaciones de CAASIM conforme a la misma norma.

## 3. Resultados

### 3.1 Microscopía Electrónica de Barrido.

Para determinar la morfología de la muestra de jarosita se utilizó microscopía electrónica de barrido (MEB) para evaluar y analizar el tamaño de partículas y la porosidad de la jarosita tratada.

En la micrografía de la figura 4 se observan pequeñas partículas cuasi-esféricas con tamaños de grano que varían entre 1 y 2 micras, las cuales se encuentran aglomeradas formando partículas de mayor tamaño (5-15  $\mu\text{m}$ ) con una morfología tipo rosetas. Esta forma es característica de las jarositas de potasio tal como se reporta en estudios previos (Hernández et al., 2021).

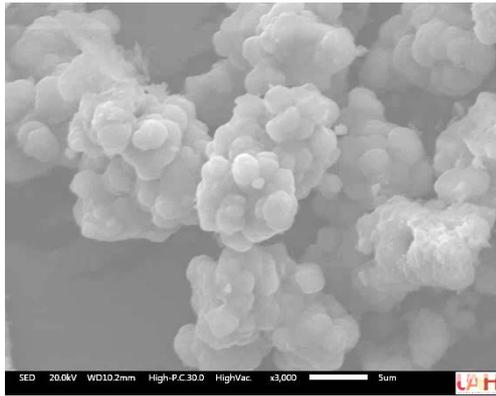


Figura 4. Micrografía de la muestra de jarosita de potasio.

Por otro lado, en la micrografía también se puede apreciar separaciones considerables entre cada partícula de jarosita, generando intersticios que van de 1 a 5 micras. Esto ocasiona que la jarosita sea lo suficientemente porosa para cumplir su capacidad de filtro.

### 3.3. Difracción de rayos X

Los resultados para determinar la composición química mineralógica de la jarosita de potasio se ilustran en la Figura 5, que presenta un espectro típico para una jarosita de potasio ( $H_3O-KFe_3(SO_4)_2(OH)_6$ ) (Serralde et al, 2022). Los picos e intensidades en el espectro corresponden en su mayoría a las fases esperadas, sin la presencia de fases adicionales que alteren los resultados. Este hallazgo confirma las observaciones de la micrografía, que no muestra ninguna forma diferente a la jarosita de potasio, indicando un control adecuado de los parámetros durante el proceso de síntesis.

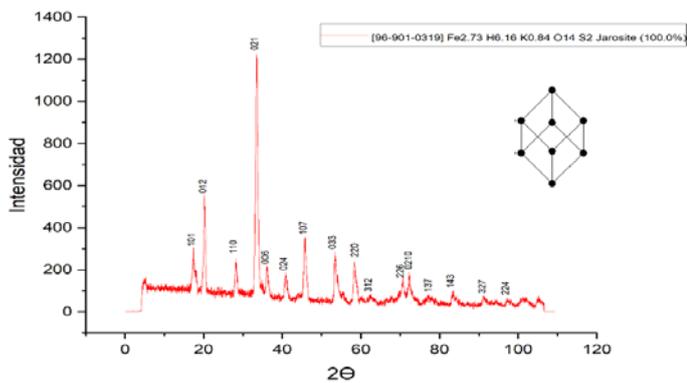


Figura 5. Espectro de Difracción de Rayos X de la muestra de jarosita de potasio.

### 3.4. Espectrometría infrarroja con transformada de Fourier.

Por otro lado, se realizó espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier, obteniendo un espectro con las bandas características de una jarosita de potasio (figura 6), destacando los modos vibracionales en la región de los alcoholes (-OH) en el 3300 y la zona de los sulfatos de hierro y potasio (-SO, SOFe y K) que se encuentra alrededor de 1100 a 1200 y del 680 al 600. Corroborando los datos obtenidos con DRX.

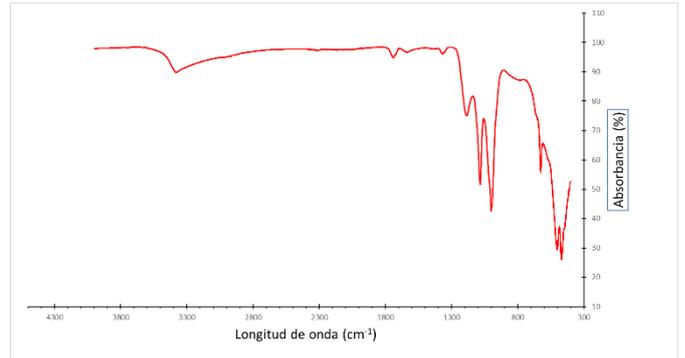


Figura 6. Espectro FTIR obtenido de la muestra de jarosita de potasio.

### 3.5. Ensayo mecánico: resistencia a la compresión.

Los resultados del ensayo de resistencia a la compresión de los especímenes de Concreto Normal (CN) y Concreto con Jarosita (CJ) se presentan en la figura 7. Se observa que la resistencia a la compresión de los especímenes de CN, medida a los 28 días, alcanza un valor de 135 kg/cm<sup>2</sup>. En comparación, los especímenes que incorporan jarosita como aditivo mostraron una resistencia ligeramente superior, alcanzando 136 kg/cm<sup>2</sup>, como se ilustra en la figura. Estos datos sugieren que la adición de jarosita no compromete la resistencia estructural del concreto.

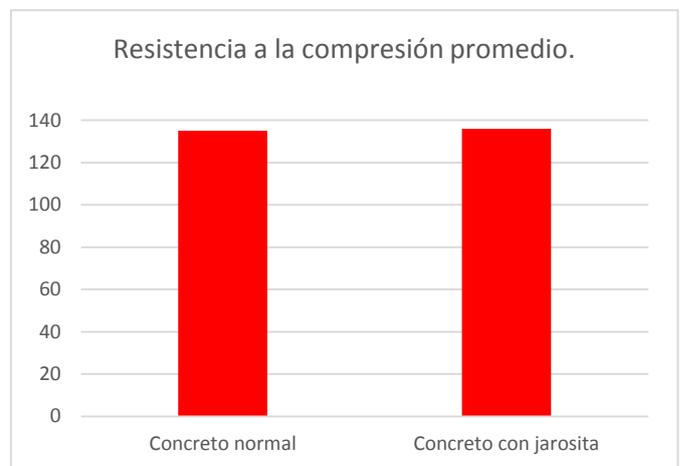


Figura 7. Resistencia a la compresión promedio de ambos tipos de cilindros.

#### 3.5.1. Tipos de fallas presentadas.

De acuerdo con la norma ASTM C39, existen seis tipos de fallas que dependen de diversos factores, tales como la formación de conos, el confinamiento de las partículas y la nivelación de los cabezales, entre otros. La figura 8 ilustra los tipos de fallas observadas durante los ensayos.

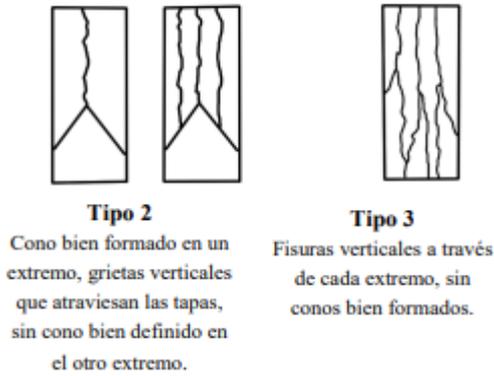


Figura 8. Esquema de los patrones típicos de fractura. (ASTM C39).

Al realizar el ensayo de compresión se obtuvieron los siguientes tipos de fallas que se describen en la tabla 1. Los resultados indican que la falla predominante es de tipo 3, caracterizada por un agrietamiento vertical. Esto se debe a la uniformidad de los agregados en el molde del cilindro; al no contener agregado fino, el cilindro depende principalmente del agregado grueso y la pasta de cemento, lo que complica el proceso de compactación y formación del cilindro.

Tabla 1. Tipos de fallas en el concreto.

Tipo de concreto permeable	Tipo de material	Edad (Días)	Tipo de falla
CN 1	Agregado 3/8"	28	3
CN 2	Agregado 3/8"	28	2
CN 3	Agregado 3/8"	28	3
CJ 1	Agregado 3/8"	28	2
CJ 2	Agregado 3/8"	28	3
CJ 3	Agregado 3/8"	28	3

De manera similar, la falla de tipo 2 también genera grietas verticales en el cilindro, ya que los conos no se forman adecuadamente debido a la uniformidad de los agregados. La homogeneidad del concreto poroso se vuelve más difícil de lograr a medida que aumenta el tamaño nominal del agregado. La figura 9 muestra tanto las fallas de tipo 2 en el concreto poroso como las fallas de tipo 3.

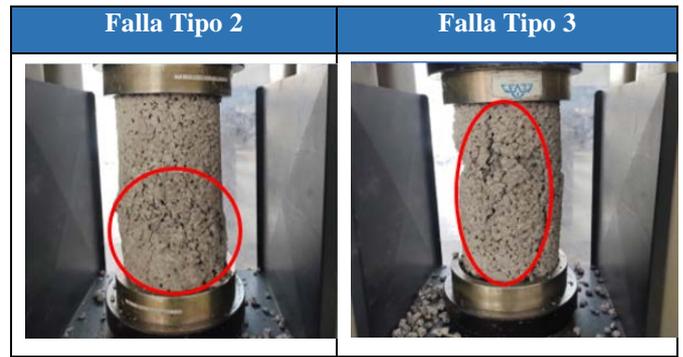


Figura 9. Fallas presentadas en los cilindros de concreto permeable (Concreto Normal CN y Concreto con Jarosita CJ) durante el ensayo.

### 3.6. Análisis químico del agua.

Los resultados del análisis químico del agua se muestran en la tabla 2, donde se aprecian los parámetros que se analizaron. Se puede apreciar que la presencia de metales como cobre y manganeso tuvieron una ligera disminución en su concentración (6.5 y 7% respectivamente) de acuerdo con la cantidad de agua filtrada en presencia del filtro de jarosita. Esto puede interpretarse a que cierta cantidad de estos metales está siendo retenida por la estructura de la jarosita, debido a que solo hubo cambio en el filtro FJ (Filtro con Jarosita) mientras que en el FC (Filtro con Concreto) no hubo ningún cambio.

Asimismo, el hierro fue el metal que disminuyó mayormente en el filtro con jarosita FJ. Debido a esto, se puede determinar que la aplicación de la jarosita por medio de la implementación de este diseño de filtro logró tener una retención de casi el 25% del total de mg/l sólo de Fe. En la figura 10 se muestra un esquema de la estructura atómica de la jarosita de potasio, donde podemos apreciar el proceso de intercambio y retención de iones. Por último, otro parámetro que sufrió cambio fue el pH del agua, la cual debido a la alcalinidad del concreto aumentó un poco, pero no demasiado como para considerarse un problema mayor.

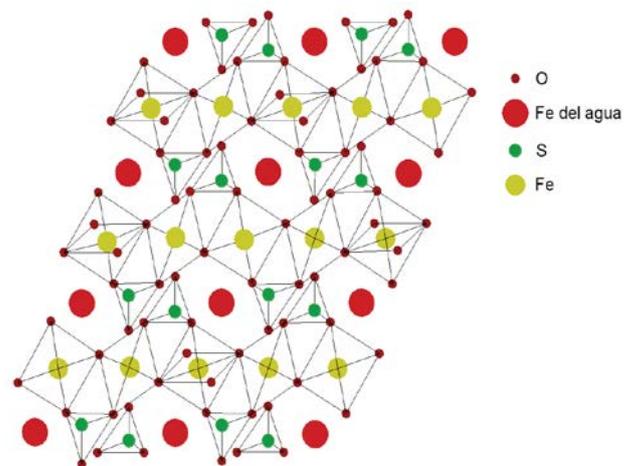


Figura 10. Estructura atómica de la jarosita de potasio.

Tabla 2. Análisis químico del agua. FC para el filtro de concreto; FJ para el filtro con jarosita.

Parámetro	Unidades	Límite permisible NOM-127-SSA1-2021	Agua antes de filtrarse por el filtro	Agua después de filtrarse por el filtro FC	Agua después de filtrarse por el filtro FJ
Cloro residual	Mg/l	0.2 A 1.5	0.03	0.03	0.03
Cloro total	Mg/l	0.2 A 1.5	0.0	0.0	0.0
SDT	Mg/l	1000	57.1	57.1	57.1
pH	...	6.5 a 8.5	7.37	7.41	7.39
Hierro	Mg/l	0.3	1.61	1.61	1.23
Nitratos	Mg/l	11.00	1.5	1.5	1.5
Nitritos	Mg/l	0.90	0.006	0.005	0.006
Dureza total	Mg/cm	500	44.44	44.44	44.44
Conductividad	μS/cm	...	36.3	36.1	36.7
Zinc	Mg/l	5	0.0	0.0	0.0
Plomo	Mg/l	0.01	0.0	0.0	0.0
Fluoruros	Mg/l	1.50	0.20	0.20	0.20
Cloruros	Mg/l	250	3.6	3.6	3.4
Arsénico	Mg/l	0.20	0.0001	0.0001	0.0001
Cobre	Mg/l	2.00	0.31	0.31	0.29
Bario	Mg/l	1.3	0.0	0.0	0.0
Cianuros	Mg/l	0.07	0.002	0.002	0.002
Manganeso	Mg/l	0.15	0.3	0.31	0.28
Sulfatos	Mg/l	400	5	5	5
C. totales	...		PRESENCIA	PRESENCIA	PRESENCIA
E. coli	NMP/100 mL	<1.1 o No detectable	No detectable	No detectable	No detectable
Temperatura	°C		15.7°C	15.7°C	15.7°C

#### 4. Conclusiones

Se concluye que el uso de la jarosita de potasio como filtro para remover hierro del agua es factible, dada su capacidad para retener los iones de hierro en su estructura y hacerlos inertes. La jarosita de potasio adicionada en el concreto no presenta ningún tipo de modificación en cuanto a la resistencia a la compresión. Sin embargo, se necesitan estudios adicionales para determinar si mantiene su forma o se descompone debido al ambiente alcalino del concreto.

El uso de la jarosita de potasio no solo se limita al concreto permeable, sino que también puede emplearse como recubrimiento en elementos estructurales utilizados en el tratamiento de aguas en embalses y canales. Se pretende ampliar su uso para la remoción de otros tipos de metales pesados (Pb, Cd, etc.) y elementos tóxicos como el arsénico, con el fin de aumentar su viabilidad y optimizar su aplicación en estos tratamientos, reduciendo costos.

#### Agradecimientos

La grandeza no se mide por la apariencia, sino por los actos y el impacto que dejamos. Gracias a mis padres por su fe inquebrantable y a mi tutor de investigación por su apoyo, por demostrarme que los trabajos en conjunto son mas que la suma de sus partes.

#### Referencias

- Aguilar-Carrillo, J., Villalobos, M., Pi-Puig, T., Escobar-Quiroz, I. N., & Romero, F. M. (2017). Synergistic arsenic(v) and lead(ii) retention on synthetic jarosite. I. Simultaneous structural incorporation behavior and mechanism. *Environmental Science Processes & Impacts*, 20(2), 354–369. <https://doi.org/10.1039/c7em00426e>
- American Concrete Institute. (2006). ACI 522R-06: Report on pervious concrete. Farmington Hills, MI: Author.
- Arbizú, Y. S. C. (2023). Evaluación de la calidad del agua a través de variables físicas-químicas e indicadores de eutrofización en el Embalse Hidroeléctrico Apanás - Asturias, (RAMSAR No. 1137), Jinotega. *Revista Torreón Universitario*, 12(33), 143–156. <https://doi.org/10.5377/rtu.v12i33.15897>
- Bosso, S. T., & Enzweiler, J. (2002). Evaluation of heavy metal removal from aqueous solution onto scolecite. *Water Research*, 36(19), 4795–4800. [https://doi.org/10.1016/s0043-1354\(02\)00208-7](https://doi.org/10.1016/s0043-1354(02)00208-7)
- Dilpazeer, F., Munir, M., Baloch, M. Y. J., Shafiq, I., Iqbal, J., Saeed, M., Mujtaba, M., Shafique, S., Aziz, K. H. H., Mustafa, A., & Mahboob, I. (2023). A comprehensive review of the latest advancements in controlling arsenic contaminants in groundwater. *Water (Basel)*, 15(3), 478. <https://doi.org/10.3390/w15030478>

- Elzwayie, A., Afan, H. A., Allawi, M. F., & El-Shafie, A. (2017). Heavy metal monitoring, analysis and prediction in lakes and rivers: state of the art. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(13), 12104–12117. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8715-0>
- Fan, Y., Chen, X., Chen, Z., Zhou, X., Lu, X., & Liu, J. (2022). Pollution characteristics and source analysis of heavy metals in surface sediments of Luoyuan Bay, Fujian. *Environmental Research*, 203, 111911. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111911>
- Fassman, E. A., y Blackbourn, S. (2010). Urban runoff mitigation by a permeable pavement system over impermeable soil. *Journal of hydrologic engineering*, 15(6), 475–485.
- Gao, Y., Wang, R., Li, Y., Ding, X., Jiang, Y., Feng, J., & Zhu, L. (2021). Trophic transfer of heavy metals in the marine food web based on tissue residuals. *Science of the total environment*, 772, 145064.
- Hernández-Lazcano, E., Cerecedo-Sáenz, E., Hernández-Ávila, J., Toro, N., Karthik, T. V. K., Mendoza-Anaya, D., ... & Salinas-Rodríguez, E. (2021). Synthesis of hydronium-potassium jarosites: the effect of pH and aging time on their structural, morphological, and electrical properties. *Minerals*, 11(1), 80.
- Huizar-Álvarez, R. (1997). Hydrochemistry of the aquifers in the Rio las Avenidas basin, Pachuca, Hidalgo, Mexico, Mexico. *Water Air Soil Pollut*, 96 (1–4), 185–201. <https://doi.org/10.1007/bf02407204>
- Jabar, M. F. A. (2020). Synthesis and characterisation of zinc oxide catalyst and its composite with polymer additives. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 870(1), 012023. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/870/1/012023>
- Márquez-Pacheco, H., Leyva-Morales, J. B., Davizón-Castillo, Y. A., Ontiveros-García, L. A., & Amillano-Cisneros, J. M. (2023). Análisis de tendencia de parámetros indicadores de la calidad del agua en un embalse tropical. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 10(2). <https://doi.org/10.19136/era.a10n2.3562>
- Paul D. Tennis, Michael L. Leming, and David J. Akers (2004) “Pervious Concrete Pavements
- Pinto, M., Carrasco, C., & Caballero, K. (2018). Estudio experimental del concreto poroso con la incorporación de distintas granulometrías. *I+D Tecnológico*, 14(2), 57-65. <https://doi.org/10.33412/idt.v14.2.2074>
- Reyes, Y. C., Vergara, I., Torres, O., Díaz, M., & González, E. (2016). CONTAMINACIÓN POR METALES PESADOS: IMPLICACIONES EN SALUD, AMBIENTE y SEGURIDAD ALIMENTARIA. *Ingeniería Investigación Y Desarrollo*, 16(2). <https://doi.org/10.19053/1900771x.v16.n2.2016.5447>
- Rodríguez Cruz, G. O. (2022). Calidad del agua para consumo humano y protección de la vida acuática en el embalse Los Laureles de Tegucigalpa (2002-2016). *Revista de ciencias ambientales*, 56(1), 138–156. <https://doi.org/10.15359/rca.56-1.7>
- Rubén, S. L. J. (2023, May 8). Síntesis de compuestos tipo jarosita para posibles aplicaciones en Ingeniería tisular ósea. <http://dgsa.uaeh.edu.mx:8080/jspui/handle/231104/3158>
- Urviola, F. B. S., Guzmán, P. G., Villagómez, G. F., González-Sánchez, J., & Torres, L. a. B. (2020b). PREDICCIÓN DE DRENAJE ÁCIDO DE MINA, JALES DE LA MINA LA PRIETA, CHIHUAHUA, MÉXICO. *Revista Internacional De Contaminación Ambiental*, 36. <https://doi.org/10.20937/rica.53523>
- Yaashikaa, P., Priyanka, B., Kumar, P., Karishma, S., Jeevanantham, S., & Indraganti, S. (2022). A review on recent advancements in recovery of valuable and toxic metals from e-waste using bioleaching approach. *Chemosphere*, 287, 132230. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132230>
- Yuan, P., Wu, X., Xia, Y., Peng, C., Tong, H., Liu, J., Jiang, L., & Wang, X. (2020). Spatial and seasonal variations and risk assessment for heavy metals in surface sediments of the largest river-embedded reservoir in China. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(28), 35556–35566. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09868-w>.