

DOI: 10.24850/j-tyca-2021-04-07

Artículos

Diseño de concreto permeable para absorción de metales pesados en carreteras sustentables

Permeable concrete design for heavy metal absorption in sustainable roads

Juan F. Silva-Juarez¹, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5668-681X>

Omar Chavez-Alegria², ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4474-0206>

J. Ramon Gaxiola-Camacho³, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9230-8111>

Jesus R. Millan-Almaraz⁴, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3800-3712>

¹Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México, franciscosiju@gmail.com

²Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México, omar.chavez@uaq.mx

³Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Sinaloa, Sinaloa, México, jrgaxiola@uas.edu.mx

⁴Facultad de Ciencias Físico Matemáticas, Universidad Autónoma de Sinaloa, Sinaloa, México, jmillan@uas.edu.mx

Autor para correspondencia: Jesus R. Millan-Almaraz,
jrmillan@uas.edu.mx

Resumen

Actualmente existe una gran cantidad de metales pesados en carreteras y estacionamientos. Por ejemplo, algunos de estos metales pesados son generados principalmente por factores como fugas de combustibles y lubricantes, oxidación de vehículos y emisiones de carbono. Debido a lo anterior y otros factores ocurre contaminación de aguas debido al escurrimiento superficial. En este artículo se presenta la aplicación de rocas basálticas naturales como aditivo para mezclas de concretos permeables. Durante este proceso, el método de adsorción por lotes se utilizó para determinar la efectividad del material propuesto, a fin de eliminar arsénico (As), zinc (Zn) y cadmio (Cd) típicamente encontrados en carreteras de bajo tráfico e infraestructura hidráulica. La prueba de adsorción se llevó a cabo sumergiendo cilindros de concreto permeable de 50 mm x 100 mm en vasos de precipitado de un litro por un periodo de 96 horas usando reactivos estándares de As, Zn y Cd en concentraciones de 10, 30 50 y 90 mg/l, respectivamente. Los resultados demostraron que las eficiencias de retención disminuyeron cuando las concentraciones de As y Zn se incrementaron. Sin embargo, se presentó una mejor eliminación de Cd a un nivel de 90 mg/l, donde los resultados determinaron una eliminación de Cd de hasta 89 %, 98 % para As y 75 % para Zn. Finalmente, con base en los resultados, se propone una nueva metodología para clasificación y caracterización de rocas basálticas para diseñar materiales de concreto permeable usando espectrometría de

fluorescencia de rayos X como base para determinar adsorción de metales pesados en concretos permeables. El presente proyecto contribuirá a la mejora de condiciones ambientales previas al proceso de tratamiento de aguas.

Palabras clave: prueba de adsorción, ingeniería ambiental, concreto permeable, adsorción de metales pesados.

Abstract

Nowadays, there is a great amount of heavy metals on highways and parking lots. For example, some of such heavy metals are generated mainly by factors as fuel and lubricants leakages, vehicles rust, and carbon emissions. Because of this and some other factors, water pollution occurs due to superficial slurring. In this paper, the application of natural basaltic rocks as additive for permeable concrete mixtures is presented. During this process, the batch adsorption method is used to determine the effectiveness of the proposed material in removing arsenic (As), zinc (Zn) and cadmium (Cd) concentrations that are typically found in low transit highways and other hydraulic infrastructure. The adsorption test was carried out by immersing 50 mm x 100mm permeable concrete cylinders in 1 l beakers for 96 h using standard As, Zn and Cd reagents with 10, 30, 50, and 90 mg/l concentrations, respectively. Results demonstrated that the retention efficiencies were decreased when As and Zn concentrations were increased. However, Cd presented better elimination levels at 90 mg/l concentration where results determined a Cd elimination up to 89 %, 98 % for As, and 75 % for Zn. Finally, based on the results, it is proposed a new methodology for classification and

characterization of basaltic rocks, such a methodology represents a novel process to design permeable concrete material using X-ray fluorescence spectrometry as the base to determine heavy metal absorption on concrete materials. The presented approach will contribute to the improvement of environmental conditions before water treatment processes.

Keywords: Adsorption test, environmental engineering, permeable concrete, heavy metal adsorption.

Recibido: 15/06/2020

Aceptado: 10/09/2020

Introducción

En la literatura (Li, Zhang, Liu, & Peng, 2017) se documenta que diversos problemas ambientales, como inundaciones, contaminación del agua, fenómenos climáticos urbanos como islas de calor, etcétera, son causados principalmente por la falta de sistemas de drenaje sustentables que tengan la capacidad adecuada para mitigarlos. En este sentido, Uma-Maguesvari *et al.* (2013), y Starke, Wallmeyer, Rölver, Göbel y Coldewey (2011) reportaron que las secciones de pavimentos permeables pueden

purificar de cierta forma el agua de lluvia, y dichos pavimentos pueden ser conceptualizados como túneles para el intercambio de calor entre la humedad del ambiente y el pavimento. Lo anterior produce efectos ambientales positivos, como mantener el equilibrio natural de acuíferos, y el mejoramiento de los efectos del fenómeno de islas de calor en las ciudades.

Además de lo mencionado en el párrafo anterior, la infraestructura impermeable puede transportar contaminantes a canales e incluso a acuíferos (Javadi, Abdollahian, Zhao, Ghavami, & Rockaway, 2016). También, algunos investigadores como Sandahl Baldwin, Jenkins y Scholz (2007), y Haselbach, Poor y Tilson (2014) reportaron que las superficies que transportan agua contienen una gran cantidad de metales pesados como Zn y Cu, dichos metales pesados representan un peligro si son descargados directamente a canales, ríos o depósitos almacenadores de agua. La presencia de estos contaminantes en aguas superficiales ha llegado a ser un problema serio de contaminación, principalmente porque los metales pesados no son biodegradables y pueden llegar a estar presentes en la cadena alimenticia y, por lo tanto, representan un problema importante de salud pública para los seres humanos (Ammar, Ismail, & El-Shafey, 2016). A la par con los problemas documentados anteriormente, en carreteras y estacionamientos se han encontrado complicaciones relacionadas con la presencia de metales pesados, lo cual se debe sobre todo a fugas de automotores, oxidación de partes metálicas, desperdicios de llantas, frenos y emisiones de dióxido provocadas por los autos de los usuarios de dicha infraestructura (Turer, 2005; Mangani, Berloni, Bellucci, Tatàno, & Maione, 2005). En este sentido, Birch y Scollen (2003) encontraron que las concentraciones más

significativas de metales pesados en canales se debían principalmente al viento provocado por los vehículos transitando a grandes velocidades en carreteras cercanas a dichos canales.

En investigaciones recientes (Sounthararajah, Loganathan, Kandasamy, & Vigneswaran, 2017) se ha estudiado el uso y la aplicación de concretos permeables, en particular con lo relacionado con el tratamiento de aguas. En dichos estudios se observó que la combinación de zeolita y basalto en el filtrado de agua, en diferentes concentraciones, generaba agua de buena calidad de acuerdo con estándares ambientales marinos, eliminando metales pesados, los cuales son producidos por diversos agentes contaminantes y transportados hacia los océanos por corrientes de agua y acuíferos mediante infiltración. Otro aspecto importante en el uso de concreto permeable diseñado es el tipo de agregado (piedra) utilizado para la composición de la mezcla (Weiss Kayhanian, Gulliver, & Khaza, 2017). De manera paralela a las investigaciones anteriores, con el objetivo de determinar qué material tenía las mejores propiedades para la adsorción de metales pesados como Pb y Zn, Zhao y Zhao (2014) estudiaron asfalto poroso mediante tres modelos de pavimento: el primero con la implementación de basalto, el segundo con caliza y el tercero usando una combinación basalto-caliza. Con base en sus resultados, Zhao y Zhao (2014) demostraron que se producía una reducción considerable en el total de plomo y zinc de los primeros filtrados, presentando, en promedio, una reducción del 90 %, y 80.5 % de plomo y zinc, respectivamente. En tal sentido, es importante recalcar que los basaltos y zeolitas son materiales de bajo costo para el tratamiento de aguas en escurrimientos y aguas residuales. Por lo tanto, dichos materiales tienen una capacidad elevada de intercambio de

caciones, lo cual es favorable debido a que estos materiales presentan un buen desempeño en la adsorción de metales contaminantes que se pueden encontrar durante la infiltración de agua en pavimentos permeables (Wang & Pang, 2010).

Como ya se mencionó, el concreto permeable es una estructura con la habilidad de reducir el volumen de agua en superficies de escurrimiento a través de su porosidad. Además, el concreto permeable mejora la calidad del agua y ayuda a mitigar los efectos relacionados con el fenómeno de isla de calor, el cual es provocado sobre todo por el crecimiento de áreas urbanas (Haselbach, Boyer, Kevern, & Schaefer, 2011). En investigaciones recientes (ACI, 2010; Delatte, Mrkajic, Miller, 2009) se ha demostrado que el uso de concreto permeable permite la adsorción de metales pesados provenientes de superficies de escurrimiento; en dichas investigaciones se estudiaron pavimentos completamente permeables que consistían en particular de mezclas de cemento Portland como el material aglutinante, agregado grueso, agregado fino y agua (ACI, 2010; Delatte *et al.*, 2009).

Diversas características, como la distribución, tamaño y redondez de la piedra de los agregados pueden ser modificados en un concreto permeable. Así, se presenta una filtración de contaminantes en dicho material, proveyendo del tiempo necesario al agua para interactuar con el pH [mayor que 12.00 unidades estándar (S/U)] de la mezcla de concreto permeable (Komastka, Kerkhoff, & Panarese, 2003). Se han desarrollado múltiples técnicas, como adsorción, oxidación química, precipitación, extracción de solvente, intercambio de iones, procesos de membrana y osmosis inversa, para remover iones de metales de soluciones de agua (Eloussaief & Benzina, 2010). Entre ellas, la técnica

de adsorción es una de las más prometedoras para remover metales pesados y tóxicos de aguas residuales industriales y naturales con la selección de un adsorbente adecuado (Potgieter, Potgieter-Vermaak, & Kalibantonga, 2006; Aydin, Bulut, & Yerlikaya, 2008). De acuerdo con la investigación anterior, el concreto permeable puede llegar a poseer grandes capacidades de absorción de metales pesados, con lo cual se mejora considerablemente la calidad del agua que escurre a través de éste. Por lo tanto, el uso de concreto permeable puede prevenir en gran medida que desechos tóxicos y contaminantes presentes en superficies pavimentadas sean transportados a corrientes o cuerpos de agua.

En resumen, la contribución de esta investigación se justifica por el desarrollo de una metodología detallada para la implementación de basalto natural con un tamaño máximo de 9.5 mm en mezclas de concreto permeable. El método de adsorción de lote es usado para determinar la eficiencia de eliminación de metales pesados como As, Cd, y Zn, mediante simulaciones de metales pesados encontrados por diversos autores en sedimentos acumulados en infraestructura hidráulica cercana a carreteras de tráfico lento pertenecientes a autopistas.

Materiales y métodos

Caracterización de Roca Basáltica

La caracterización de roca basáltica se encuentra reportada ampliamente en la literatura. Por ejemplo, Borazjani, Ghiasi-Freez y Hatampour (2016) reportaron que el uso de secciones petrográficas de dicho material es el primer paso para entender las características de una roca. En este sentido, Paulsen *et al.* (2013) establecieron que las capas delgadas son usadas sobre todo para la identificación de minerales y aspectos característicos como fracturas, zonificación de minerales y texturas en roca, así como para identificar la formación de rocas y su clasificación. En esta investigación se utilizaron muestras de roca basáltica reducidas a un espesor de 30 microns (μm), con superficies pulidas, para las cuales se determinó que fueran usadas como agregados en la mezcla de concreto permeable. Las capas delgadas se observaron a través de un microscopio petrográfico Modelo MOTIC BA310; dichas muestras se analizaron usando una luz transmitida en el material para determinar el contenido de mineral, la textura de la roca y posibles alteraciones. De manera general, se observó que el basalto está compuesto principalmente de piroxenos y plagioclasa con un gran contenido de Ca, su textura es afanítica y su estructura es vesicular como se ilustra en la Figura 1.



Figura 1. Sección delgada microscópica de roca basáltica en una escala de 0.5 mm.

Especímenes de concreto permeable

El método usado para suministrar la dosis adecuada se basó en el volumen de la pasta requerida para mezclar los agregados de manera correcta y mantener el diseño de contenido de vacíos de acuerdo con la recomendación del Instituto Americano del Concreto (ACI, 2010). En este sentido, los cilindros de concreto se prepararon usando una mezcla de CEMEX CP30, la cual se compone de cemento Portland, agregados de tamaño máximo nominal de 9.5 mm (obtenidos del banco de materiales La Cañada, ubicado en la ciudad de Querétaro, México) y agua. La Tabla

1 resume las proporciones utilizadas de los materiales descritos con anterioridad para 1 m³ de mezcla. Es importante mencionar también que todos los materiales de la mezcla fueron mezclados y colados en recipientes cilíndricos.

Tabla 1. Proporciones de los materiales de la mezcla de concreto permeable.

Material	Cantidad	Unidades
Cemento	320.57	kg/m ³
Agregado grueso	1 679.153	kg/m ³
Agua	128.08	kg/m ³

Una vez mezclados y antes de ser estudiadas las capacidades de adsorción de la mezcla, los cilindros de concreto permeable se cubrieron y se curaron por siete días en una cámara de ambiente controlado con 50 % de humedad a 23 °C. Las dimensiones de los cilindros fueron 50 x 100 mm. Los ensayos se hicieron para determinar la resistencia a la compresión de los especímenes cilíndricos del concreto permeable de acuerdo con la norma ASTM C39, como se muestra en la Figura 2, y se resumen también más tarde en la Tabla 5 (ASTM, 2015). Con el fin de evitar variabilidad en el proceso de experimentación, cada cilindro se preparó con el mismo lote de mezcla de concreto usando las mismas cantidades de cemento y agregados. El proceso de experimentación se diseñó con el objetivo de determinar si el concreto permeable podía ser capaz de adsorber el contenido de metales pesados; lo anterior, midiendo

el nivel de retención que el concreto podía tener para diferentes concentraciones iniciales de As, Cd, y Zn.



Figura 2. Cilindro de concreto permeable sometido a compresión.

Método de adsorción por lotes

En esta investigación se prepararon tres soluciones con reactivos estándar de As, Cd y Zn (ASTM 2015). Las soluciones estándares tenían una concentración de 1 000 mg l⁻¹. De cada solución estándar se realizaron diluciones para obtener concentraciones uniformes de Cd y Zn de 10, 30, 50, y 90 mg/l, respectivamente, para cada contaminante. Este experimento por lotes se llevó a cabo sumergiendo los cilindros de concreto en un contenedor con una capacidad de un litro, el cual contenía soluciones de As, Cd, y Zn. Los cilindros permanecieron ahí por 96 h. Todos los contenedores fueron lavados con ácido para una concentración de 5 % de ácido nítrico durante 12 h y después fueron enjuagados con agua destilada antes de someterse a la prueba de carga (ver Figura 3).



Figura 3. Disposición de precipitación de metales pesados en el lote reactivo.

Después de 96 h, los cilindros de concreto se removieron de la solución, se secaron, se cubrieron con un cobertor celuloso a base de plástico y finalmente se sometieron a la cámara de temperatura constante con una humedad del 50 % a 23 °C. Para evitar el agrietamiento y conservar las reacciones de la superficie, los análisis se desarrollaron de manera subsecuente en un espectrómetro de fluorescencia con base en rayos-X totales (TXRF).

Fluorescencia total reflectora de rayos X (TXRF)

En esta investigación se utiliza un espectrómetro TRFX de tipo S2 PICOFOX, "Baker" AXS Microanalysis GmbH. La calibración de dicho instrumento fue mejorada con concentraciones estándares de elementos químicos usados en esta investigación como As, Cr, Cd, y Zn de 1 mg/l. El tiempo para la adquisición de datos de cada espécimen durante el proceso de calibración fue de 1 000 s. Cada espectro se analizó. El instrumento utilizado consta de un tubo metálico de cerámica con lentes de molibdeno, el cual es de bajo poder, trabajando a una máxima capacidad eléctrica de 50 W. También el dispositivo usado cuenta con un detector de desplazamiento de silicón (SDD) sin liquido de nitrógeno con el instrumento compacto S2 PICOFOX TXRF (Bruker, 2007). Las

especificaciones técnicas de acuerdo con el proveedor de dicho instrumento se resumen en la Tabla 2.

Tabla 2. Especificaciones técnicas del S2 PICOFOX.

Especificación técnica	Unidad
Tubo de rayos X	50 W (50 kV, 1 mA), Objetivo Mo
Óptica	Monocromador multicapa, 17.5 KeV
Detector de área	10 mm ² , ~ 140 eV @ Ka-Mn
Portador de cuarzo	30 mm de diámetro
Tamaño y peso	590 × 450 × 300 mm, 37 kg

Preparación de los especímenes para el análisis de rayos-X de reflectometría fluorescente total

Los discos pulidos (sintéticos) de cuarzo tienen 30.0 mm de diámetro y 3.0 mm de espesor y se usaron para preparar los especímenes. En este sentido, antes de comenzar las pruebas, se siguió un protocolo de limpieza, que comprendió de diversas etapas. Primero se utilizó una solución de agua ultra-pura RBS 50TM (SigmaTM, Germany) 5:50. Después se aplicó ácido nítrico en solución a un 10 % bajo condiciones de calor, esparcido con agua ultra-pura, secado en un horno a 80 °C.

Finalmente, la siliconización de la superficie se desarrolló con una solución de silicón en isopropanol (Serva™, Germany) para que la superficie de los especímenes se volviera hidrofóbica y causara con esto una evaporación pequeña. La remoción exitosa del espécimen anterior se verificó llevando a cabo pruebas de mediciones de vacíos, ausencia de elementos picos, aparte del silicón (Si), cuarzo y molibdeno (Mo) que se observaron de las fuentes respectivas. La Figura 4 ilustra el proceso de preparación de muestras (especímenes) para análisis TXRF. De manera particular, la Figura 4(a) muestra cómo se lleva a cabo la aplicación de silicón en isopropanol. Por otro lado, la Figura 4(b) ilustra la preparación de la muestra incluyendo la solución de 10 μl de la muestra de concreto expuesta a arsénico, zinc y cadmio para los análisis de TXRF.

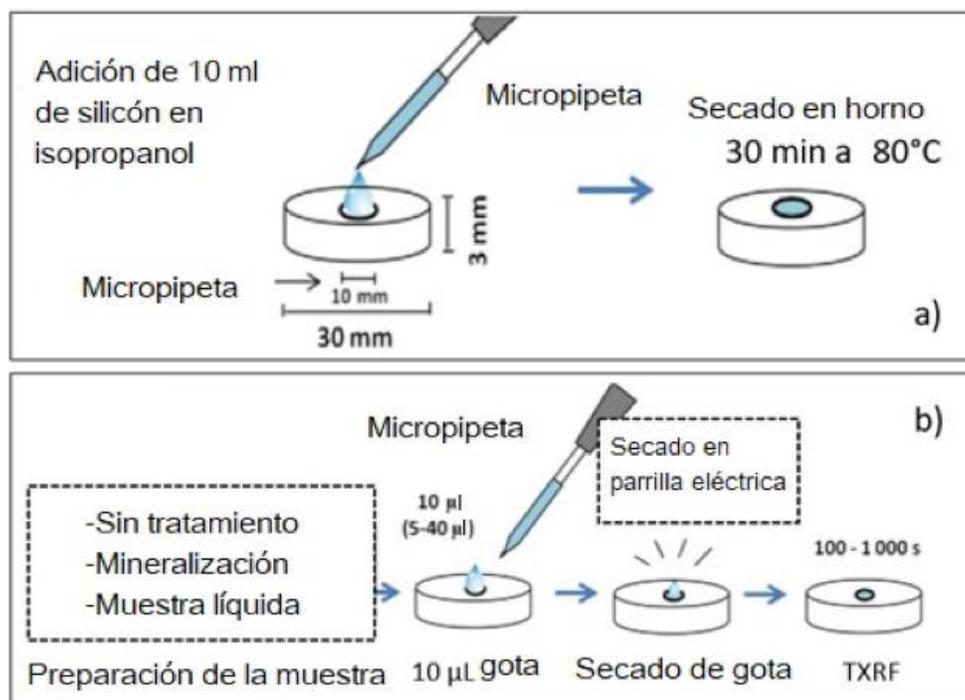


Figura 4. Preparación de las muestras para los análisis S2 PICOFOX: (a) adición de silicón en isopropanol y (b) preparación de la muestra para el análisis TXRF (De-La-Calle, Cabaleiro, Romero, Lavilla, & Bendicho, 2013).

Finalmente, el análisis cuantitativo se hizo mediante estandarizaciones de las muestras. Se seleccionó el galio como el estándar interno debido a su abundancia baja en el tipo de muestras estudiadas y buena sensibilidad en la determinación del TXRF.

Mediciones de reflectometría total de fluorescencia

La calibración del instrumento se llevó a cabo con una concentración estándar de multielementos como Ar, Cr, Cd, Zn y Mr de 1 mg/l (Bruker, 2011). El tiempo requerido para la medición y adquisición de datos fue de 1 000 s (tiempo en vivo). Los espectros se procesaron con el *software PicofoxTM* (Bruker, 2011). De manera secuencial, las líneas de los elementos que se buscaba encontrar en el espectro de respuesta se identificaron para verificar cuáles elementos estaban en la muestra que se analizó. Por último, la concentración de los elementos se calculó con la ayuda de la Ecuación (1) usando las intensidades y sensibilidades relativas de los elementos que se analizaron, los cuales fueron valores

adimensionales que indicaron las intensidades máximas de los elementos respectivos en relación con la cantidad de la muestra (Bruker, 2011).

$$C_i = \frac{C_{IS} * N_i * S_{IS}}{N_{IS} * S_i} \quad (1)$$

Donde C_i es la concentración del elemento a ser analizado; C_{IS} , la concentración interna estándar; N_i , el número del pulso neto dentro de las mediciones del espectro del elemento analizado; N_{IS} , el número del pulso neto dentro de las mediciones del espectro del elemento interno estándar; S_i , la sensibilidad relativa del elemento i , y S_{IS} es la sensibilidad relativa del elemento estándar interno.

Dispersión de energía de fluorescencia de rayos-X (EDXRF)

En el presente estudio se utilizó un espectrómetro de escritorio tipo EDXRF (S2 PUMA Carousel, Bruker AXS, MbH, Germany). Este instrumento está equipado con un tubo Pd target t X-ray (max. Power 50 W) y un detector de desplazamientos basado en silicón tipo XFLASH LE. Entre las características de dicho equipo destaca una ventana de berilia súper delgada (0.3 μm de espesor) con una resolución menor que 129 eV con

una línea Mn-K α para una adquisición de datos de 100 000 registros por segundo. La configuración LE de detectores SDD de intensidad para Na K- α y Mg K- α es cercana a 8 y 4 veces más alta, respectivamente, que la intensidad adquirida con detectores SDD convencionales. El instrumento se encuentra también equipado con nueve filtros primarios que pueden usarse enfrente del tubo antes de que la viga que irradia los rayos-X afecte la superficie, lo anterior mejora las condiciones de la medición para los elementos de interés y se puede operar bajo condiciones al vacío. Las especificaciones técnicas de acuerdo con el proveedor del instrumento S2 PUMA EDXRF se resumen en la Tabla 3.

Tabla 3. Especificaciones técnicas del instrumento S2PUMA EDXRF.

Especificaciones técnicas	Unidad
Rango de los elementos	Sodio-uranio (Na-U)
Rango de concentración	De mg l ⁻¹ al 100 %
Tubo de rayo-X ánodo	Pd; potencia máxima de 50; voltaje máximo de 50 kV
Filtro primario	10 mm ² , ~ 140 eV @ K α -Mn
Tamaño de la muestra	Muestras de 32.40 o 51.5 mm \varnothing (1.26, 1.56 o 2.03 pulgadas) Muestras grandes: ancho máximo de 457 mm (18.00 pulgadas)
Cargador de muestra	EasyLoad™ Bandeja de muestra Carousel, 12 posiciones, removible

Tamaño	66 x 70 x 56 cm; 127 kg 26 x 27.6 x 22.0 pulgadas; 278 libras
Tipo de muestras	Polvos sueltos, gránulos, sólidos, esferas prensadas, perlas fundidas y líquidos de hasta 50 ml

El *software* usado para controlar el instrumento y/o equipo para construir las calibraciones y para desarrollar el tratamiento de los datos fue el programa *SPECTRA EDX* (Bruker AXS, GmbH, Germany). Dicho *software* puede llevar a cabo ajustes de líneas de perfiles completos, deconvoluciones cuando las líneas de las capas se traslapan, correcciones de intensidad para elementos interiores y rutinas completamente cuantitativas.

Adsorción de arsénico de lotes con concreto permeable y medición de concentración con espectrometría

La preparación de los especímenes de concreto y basalto siguieron una metodología similar a la que se siguió para la petrografía de capas delgadas. Primero se llevó a cabo la realización de los cubos de concreto con la proporción de la mezcla de diseño para el concreto permeable sin incluir la piedra de basalto; esto, para llevar a cabo el análisis de manera

separada del concreto y el basalto, respectivamente. Después se utilizó un cortador MK-500 para darles una forma regular a las muestras. Una vez que se preparó la solución con una concentración de 90 mg l⁻¹ en agua, se suspendieron en ésta las muestras de concreto de 5 x 5 cm de ancho con un espesor de 5 mm. Las muestras de basalto respectivas de 3 x 2 cm se estudiaron en tubos centrífugos Falcon, con una capacidad de 10 ml de solución. El tiempo de la prueba fue de ocho días, teniendo los especímenes bajo regímenes de temperatura constante de 25 °C en un horno especial para dicha tarea. Después de ocho días, las muestras se removieron de la solución, para después hacer el análisis en el espectrómetro S2 PUMA con la técnica EDXFR. El muestreo se llevó a cabo los días 2, 4, 6 y 8 de la prueba, respectivamente, para ambas muestras: basalto líquido y concreto. Las muestras sólidas se secaron en un horno a una temperatura de 25 °C durante 24 h antes de tomar sus mediciones. Para las muestras líquidas, el proceso fue diferente debido a que su preparación en copas plásticas se usó para guardar 7.0 g de líquido que ya estaba contaminado con As; también, al fondo del vidrio transparente, se utilizó una membrana Mylar. Después de ocho días de tomar y preparar las muestras, todas las muestras (especímenes) se midieron. Para esto, se usó un dispositivo tipo Bruker S2 PUMA para medir hasta 11 muestras. También se colocaron copas plásticas con las muestras líquidas en el carrusel del dispositivo. Una vez que todas las muestras se montaron en el dispositivo S2 PUMA, se seleccionó el tipo de muestra (sólida o líquida) y las características de la muestra. También se marcaron con identificadores las muestras; después, el diámetro de 3.5 cm de la copa plástica, con una membrana tipo Myler con un espesor de 3.6 microns (µm), para después llevar a cabo la cuantificación del equipo con una

duración de cinco minutos por muestra o espécimen. El espectro de respuesta del equipo se muestra en la Figura 5.

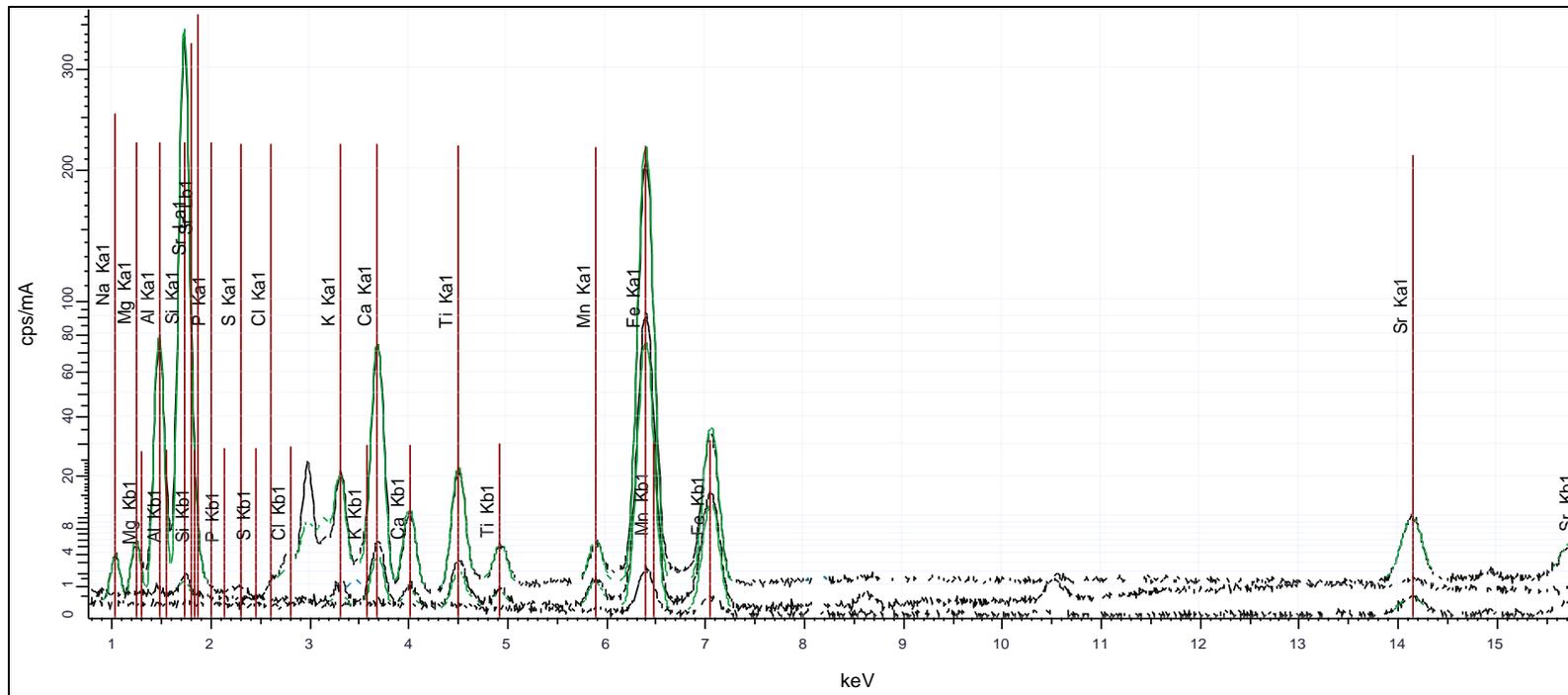


Figura 5. Espectro de respuesta para una solución de As de 90 mg l-1.

Resultados y discusión

Diseño de mezcla de concreto permeable para para prueba de absorción de contaminante

Se usó una combinación de concreto permeable simple con agregado de cuarzo de roca basáltica, cemento Portland y agua para el experimento presentado en esta sección. El tamaño máximo nominal del agregado fue de 9.5 mm (3/8"). La gravedad específica del agregado fue de 2.90 y la absorción de 1.5 % (ASTM 2015). Todas las mezclas se diseñaron para tener un espacio libre de 20 % y se produjeron con una relación agua-cemento de 0.40. La Tabla 4 resume las propiedades mecánicas del basalto usado en las mezclas de concreto permeable.

Tabla 4. Propiedades mecánicas del basalto.

Propiedades mecánicas del basalto (kg/m³)	Cantidad
Masa compacta volumétrica seca	1.44
Masa suelta volumétrica seca	1.53
Peso específico aparente	2.81
Peso específico aparente (S.S.S)	2.85
Peso específico nominal	2.94
% de absorción	1.58

En la Tabla 5 se presenta diversa información adicional acerca de la resistencia de las muestras (especímenes) usados en esta investigación.

Tabla 5. Valores de compresión simple de los cilindros de concreto.

Edad (días)	Resistencia cilindro 1 (kg)	Resistencia cilindro 2 (kg)	Resistencia cilindro 3 (kg)	Resistencia promedio (kg/cm ²)
7	108.68	107.52	109.68	108.63
14	126.89	125.68	127.63	126.73
21	153.48	151.36	154.87	153.24
28	177.69	178.69	181.65	179.34

Los resultados obtenidos están dentro de los rangos esperados de 140 y 180 kg/cm² después de 28 días de haber sido colados (ACI-522R.6, 2006), lo cual es apropiado para su uso como concreto permeable para infraestructura de drenaje en tierra, o en carreteras o caminos de tráfico ligero.

Retención de metales pesados en concreto permeable

Este estudio se llevó a cabo para determinar la eficiencia del concreto permeable en la remoción de metales pesados como As, Zn, y Cd, los cuales se encontraban presentes en soluciones sintéticas acuosas de concreto permeable con rocas basálticas. Para los experimentos de los lotes de especímenes de concreto, las eficiencias de remoción de metales

pesados fueron las siguientes: As, 55-81 %; Zn, 75-96 %, y Cd, 50-89 %. Conforme las concentraciones de metales aumentaban, la eficiencia de retención disminuía, a excepción del Cd, el cual tuvo mejores niveles de disposición para concentraciones más grandes. El porcentaje de remoción de metales pesados individuales para cada solución se muestra en la Figura 6. Por otro lado, la Figura 7 y Figura 8 se agrupan dependiendo la concentración inicial, concentración final y porcentaje de eficiencia. En general, todos los especímenes mostraron grandes porcentajes de capacidad de remoción de metales pesados. Para concentraciones menores que 10 mg/l de As y Zn, se observó una eficiencia mayor de absorción, y para concentraciones mayores que 10 mg/l de Cd, se notaron mayores niveles de retención de metales pesados.

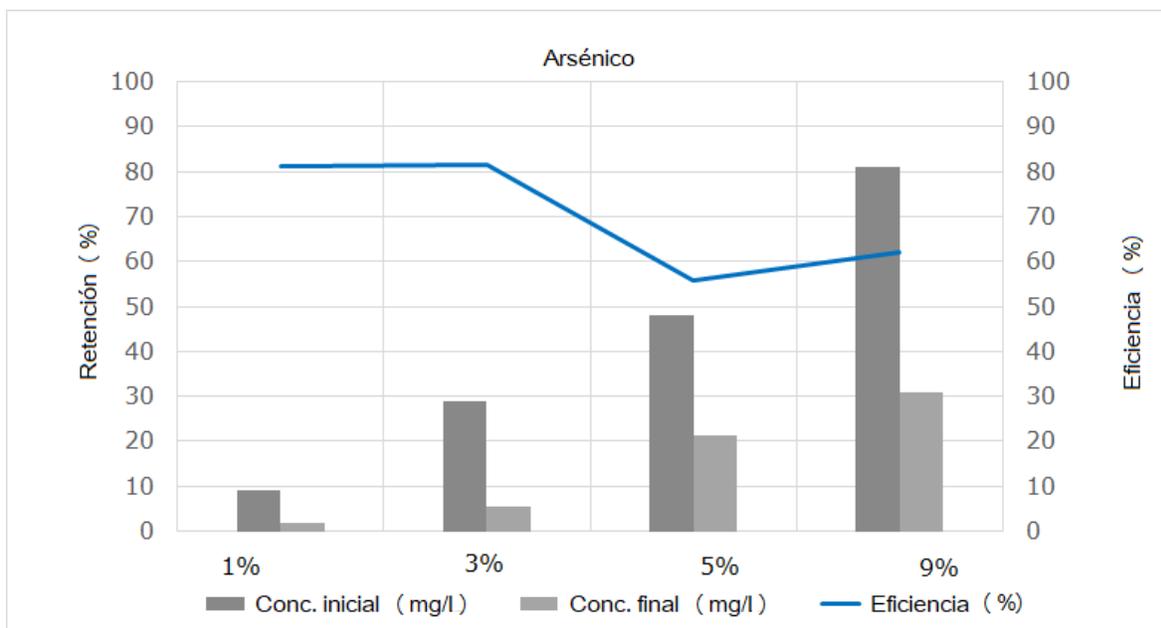


Figura 6. Eficiencia en retención de arsénico con el uso de concreto permeable.

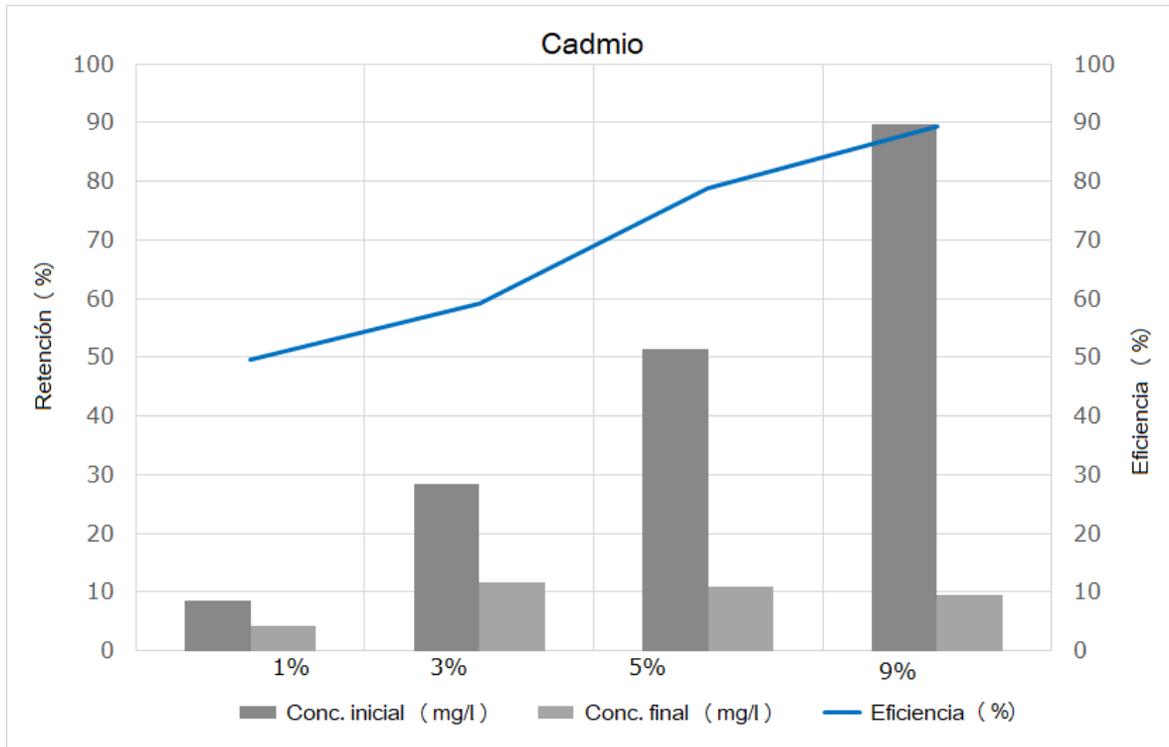


Figura 7. Eficiencia en retención de cadmio con el uso de concreto permeable.

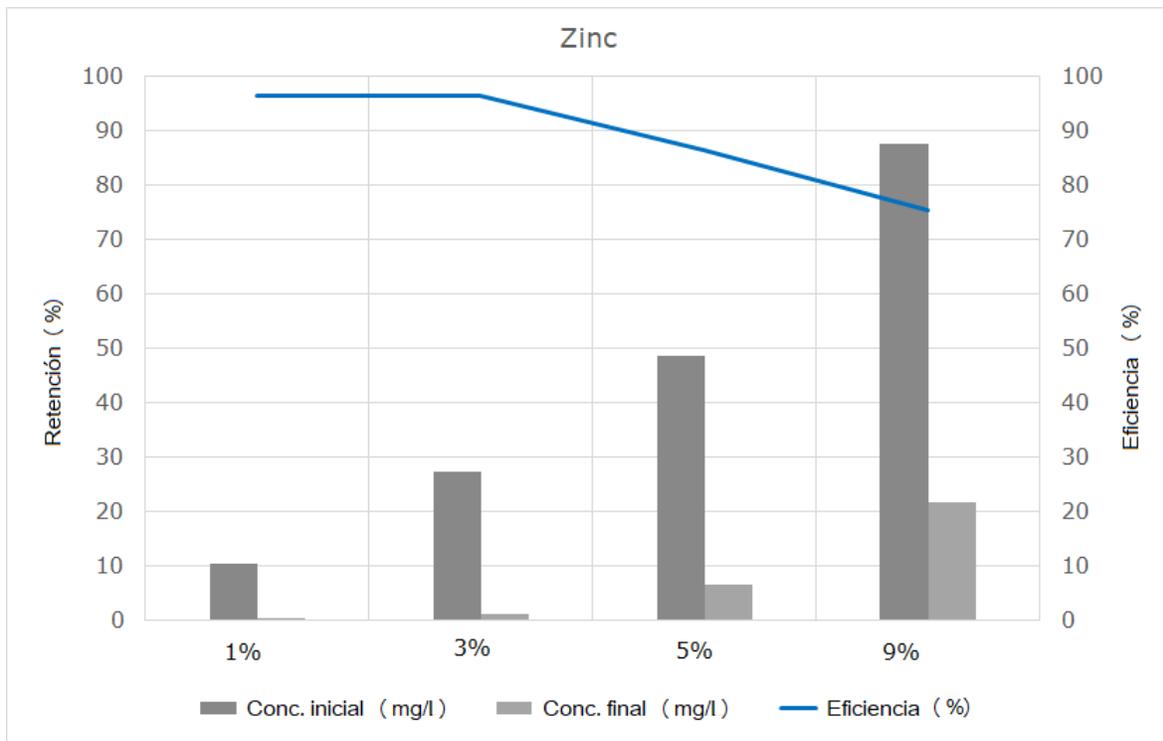


Figura 8. Eficiencia en retención de zinc con el uso de concreto permeable.

Otros elementos que se encontraron en las mediciones de las soluciones con el método de reflexiones de fluorescencia de rayos-X y el equipo S2 PICOFOX se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6. Concentraciones iniciales y finales de otros elementos encontrados en las soluciones.

Elemento	Concentración S2PICOFOX (mg/l)							
	Inicial (1 %)	Final (1 %)	Inicial (3 %)	Final (3 %)	Inicial (5 %)	Final (5 %)	Inicial (9 %)	Final (9 %)

Arsé- nico	Fósforo (P)	58.75	72.20	76.17	135.93	84.38	94.13	79.76	90.96
	Potasio (K)	11.34	38.25	12.97	22.99	12.79	45.00	11.56	35.38
	Calcio (Ca)	50.90	120.05	57.17	189.59	58.32	599.20	51.50	1020.80
Zinc	Cloro (Cl)	72.77	25.350	70.54	64.31	103.12	165.28	327.80	409.82
	Potasio (K)	52.45	12.817	9.15	51.78	11.04	37.63	18.95	30.48
	Calcio (Ca)	60.64	56.710	62.01	83.66	53.25	147.18	90.35	303.41
Cad- mio	Fósforo (P)	46.55	67.450	61.32	60.02	46.53	62.63	46.53	72.59
	Potasio (K)	9.74	58.290	10.82	41.34	10.95	34.80	10.95	32.89
	Calcio (Ca)	46.38	199.590	55.06	93.72	52.16	228.60	52.16	348.46

Con base en los resultados presentados con anterioridad, es importante resaltar que Zn, As y Cd son atraídos por el potasio, calcio y fosforo, lo que causa un intercambio iónico entre estos elementos. También se pudo observar que había un proceso de descalcificación del concreto permeable causado por la presencia de As, Zn y Cd en la solución, lo cual dejó al basalto expuesto en algunas áreas del cilindro. De esta forma, la Figura 9 ilustra este fenómeno, después de exponer el cilindro de concreto por 96 h a los metales pesados.



Figura 9. Descalcificación del concreto permeable expuesto a As, Cd y Zn.

De manera subsecuente, cuando se analizan cada uno de los contaminantes, respectivamente, se preparó una mezcla general con Cd, As y Zn, con los porcentajes con la eficiencia de retención más alta para cada uno de ellos. La Tabla 7 muestra las concentraciones iniciales y finales de los elementos encontrados en la mezcla completa de todos los contaminantes.

Tabla 7. Concentraciones iniciales y finales de absorción de Cd, Zn y As.

Elemento químico	Inicial	Final
K	9.16	373.90
Ca	47.19	3 439.92
Zn	8.41	4.19
Ga (IS)	10.00	10.00
As	23.25	5.98
Cd	79.20	33.34

Además de lo documentado por Zhao y Zhao (2014), donde desarrollaron un análisis de la eficiencia del basalto y la caliza en la remoción de plomo y zinc, está reportado que el basalto puede retener hasta un 80.5 % de zinc; esta investigación demostró que puede llegar hasta un 96 %; por lo tanto, con lo desarrollado en este artículo se puede incrementar la retención del zinc hasta en un 15.5 %.

Absorción de arsénico de mezclas de concreto y basalto con concentraciones de mediciones mediante espectrometría (EDXRF)

Después de ocho días de probar la exposición del material a la solución con As para el caso de concreto y basalto, y después de llevar a cabo las mediciones con el equipo S2 PUMA, se verificó que el cálculo de la solución de 90 mg l-1 de As fue correcto. Por lo tanto, también se efectuaron actividades correctas para obtener la concentración inicial con la que se hizo la referencia para saber la eficiencia de cada uno de los materiales. Las concentraciones medidas para cada uno de los días de los experimentos se ilustran en la Figura 10.

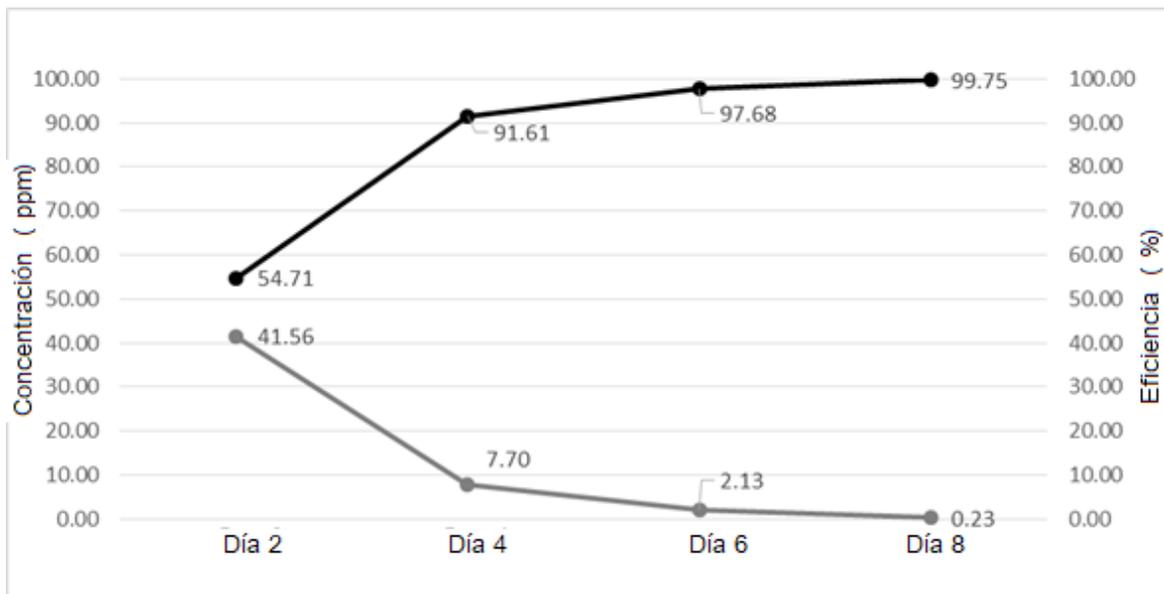


Figura 10. Mediciones de concentración de arsénico (línea inferior) y eficiencia de retención (línea superior) con concreto.

Como se ilustró en la Figura 10, el concreto, después de haber estado expuesto a la solución de As durante ocho días fue capaz de lograr

el 99.75 % de retención, lo cual prueba que este material posee excelentes características para la retención de As disuelto en agua. Las mediciones de las concentraciones para el basalto se muestran en la Figura 11.

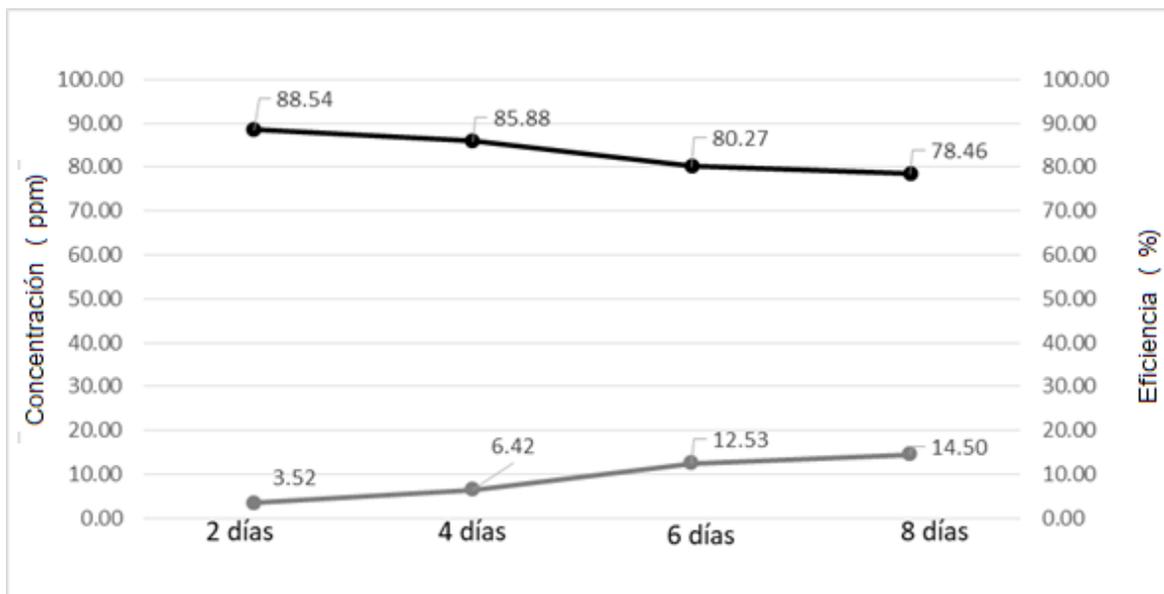


Figura 11. Mediciones de concentración de arsénico (línea inferior) y eficiencia de retención (línea superior) con basalto.

Se puede observar en la Figura 10 y Figura 11 que el basalto tiene un porcentaje más pequeño de retención de As con respecto al concreto; en resumen, el basalto tiene 14.50 % y el concreto 99.75 %. Por lo tanto, se puede verificar que el material que tiene las mayores capacidades de retención es el concreto.

Concreto y basalto intercambiador de iones

De acuerdo con las normas de construcción documentadas por Cemex (Cemex, 2015), la composición para la manufactura de cemento consiste principalmente en caliza, arcilla y yeso en diferentes proporciones. Con los resultados obtenidos del análisis mediante la técnica EDXRF fue posible extraer la composición química del cemento y el basalto antes de ser expuestos al As por ocho días. La Tabla 8 muestra la composición química del cemento y basalto; estos datos se obtuvieron con el equipo S2 PUMA Bruker.

Tabla 8. Composición química del cemento y basalto usados.

Composición	Concreto	Basalto
Na ₂ O	0.17 %	2.94 %
MgO	0.85 %	2.68 %
Al ₂ O ₃	2.66 %	19.77 %
SiO ₂	15.55 %	53.18 %
SO ₄	1.18 %	0.16 %
Cl	17.2002 mg l-1	90.9707 mg l-1
K	1.54 %	1.08 %

CaO	73.66 %	7.16 %
MnO	0.16 %	0.18 %
Fe ₂ O ₃	3.92 %	10.64 %
Gravedad específica	3.15	2.81

Como se resume en la Tabla 8, el concreto y basalto contienen algunos elementos químicos similares. Sin embargo, algunos compuestos químicos, como el óxido de calcio (el más liberado durante los experimentos TXRF), se presentan en mayores cantidades en el basalto. Además, estos materiales son muy similares a los compuestos químicos que contienen zeolitas y han sido más estudiados para usarse en filtros de purificación de agua debido a su gran capacidad de intercambiar iones.

En algunas otras investigaciones, como la conducida por Ponce-Lira *et al.* (2017), se demostró que los materiales que contienen óxido de aluminio (Al₂O₃), óxido férrico (Fe₂O₃), óxido de manganeso (MnO) y óxido de silicón (SiO₂), así como fosfatos y silicatos, tienen propiedades que les permiten intercambiar iones. Dichos elementos constituyentes del concreto y basalto permiten llevar a cabo la remoción de As, Cd y Zn, los cuales se usan en esta investigación.

La presencia de óxido de calcio (CaO) en el cemento interfiere con la remoción de iones de metales; este elemento directamente tiene influencia en la remoción de As en las concentraciones usadas en las pruebas de los lotes de absorción desarrollados en este artículo. En la Tabla 9 y Tabla 10 se resumen los porcentajes obtenidos de los compuestos químicos para los especímenes sólidos de concreto y basalto.

Tabla 9. Composición química del concreto cuando se expone por ocho días a arsénico en agua.

Composición química	Referencia	Día 2	Día 4	Día 6	Día 8
	Concentración (%)				
Na ₂ O	0.17 %	0.85 %	0.78 %	0.54 %	0.47 %
MgO	0.85 %	3.65 %	3.42 %	2.55 %	2.32 %
Al ₂ O ₃	2.66 %	6.27 %	5.31 %	4.66 %	5.01 %
SiO ₂	15.55 %	26.59 %	25.61 %	23.60 %	22.71 %
SO ₄	1.18 %	0.70 %	0.88 %	0.96 %	1.78 %
Cl	17.2002 mg l-1	0.0000 mg l-1	0.0000 mg l-1	0.0000 mg l-1	0.0000 mg l-1
K	1.54 %	1.33 %	1.33 %	0.93 %	1.00 %
CaO	73.66 %	55.47 %	57.61 %	61.43 %	61.68 %
MnO	0.16 %	0.14 %	0.14 %	0.14 %	0.15 %
Fe ₂ O ₃	3.92 %	4.06 %	3.88 %	3.97 %	3.96 %
ZnO	0.16 %	0.17 %	0.18 %	0.21 %	0.17 %
As	-	0.66 %	0.74 %	0.88 %	0.63 %

Tabla 10. Composición química del basalto cuando se expone por ocho días a arsénico en agua.

	Referencia	Día 2	Día 4	Día 6	Día 8
--	------------	-------	-------	-------	-------

Composición química	Concentración (%)				
Na ₂ O	2.94 %	2.87 %	2.74 %	2.82 %	2.99 %
MgO	2.68 %	2.36 %	2.64 %	2.43 %	2.75 %
Al ₂ O ₃	19.77 %	19.91 %	20.06 %	20.28 %	19.90 %
SiO ₂	53.18 %	54.13 %	54.51 %	53.62 %	53.79 %
P ₂ O ₅	0.28 %	66.8332 mg l-1	0.02 %	0.05 %	0.06 %
SO ₄	0.001590 4	0.000466 69	0.0000 mg l-1	0.0000 mg l-1	0.0000 mg l-1
Cl	90.9707 mg l-1	0.0000 mg l-1	0.0000 mg l-1	0.0000 mg l-1	0.0000 mg l-1
K	1.08 %	1.14 %	1.06 %	0.011581	1.05 %
CaO	7.16 %	6.27 %	6.33 %	6.66 %	6.43 %
TiO ₂	1.81 %	1.96 %	1.89 %	1.94 %	1.88 %
MnO	0.18 %	0.18 %	0.21 %	0.24 %	0.24 %
As	-	-	-	10.69 %	10.78 %
Fe ₂ O ₃	10.64 %	11.02 %	10.44 %	0.03 %	0.04 %

Las mediciones de las composiciones químicas obtenidas antes y después de la contaminación con As de los especímenes para basalto y concreto mediante el uso de la técnica EDXRF revelaron que dicho metal pesado es retenido en la parte sólida de los especímenes. Lo anterior,

debido al intercambio de iones que existe a través de los elementos que están relacionados con As. Estos resultados no podrían haber sido obtenidos sin la ayuda de la técnica TXRF.

Conclusiones

Con base en los resultados presentados en esta investigación, los autores llegaron a las siguientes conclusiones.

La contaminación de los metales pesados de las zonas urbanas e industriales es un problema que ha provocado diversos problemas. La investigación presentada en este artículo documenta el desarrollo de un concreto permeable, el cual se compone de basalto, como el agregado de la mezcla para la retención de metales pesados contenidos en sistemas acuosos. Los resultados demuestran que la retención de cadmio, zinc y arsénico de la mezcla propuesta son comparables o mejores que los que presentan sistemas convencionales usados para dicho fin. Para concentraciones bajas, la adsorción fue el principal mecanismo de remoción. Sin embargo, la precipitación predomina para concentraciones altas. Además, la migración de metales a los agregados de carbonato incrementa la capacidad de remoción. La exposición del concreto permeable al zinc, cadmio y arsénico causa un decremento en la solidificación del concreto alrededor del basalto en el concreto permeable;

esto tiene influencia de manera directa en la disminución de la resistencia del concreto cuando se expone a estos contaminantes. La exposición del concreto permeable con agregados basálticos naturales en soluciones de 1, 3, 5, y 9 % de Zn, Cd, y As causa un decremento en la adherencia que es necesaria para envolver al basalto en el concreto permeable. Lo anterior afecta directamente el decremento de la resistencia del concreto cuando se expone a estos contaminantes. Compuestos químicos como el óxido de aluminio (Al_2O_3), óxido férrico (Fe_2O_3), óxido de magnesio (MnO) y óxido de silicón (SiO_2), que se encuentran en el basalto y cemento contribuyen en la retención de As, Cd, y Zn, siendo el As el más retenido por las capacidades anteriores, lo cual significa una mayor eficiencia para retener As.

La reflexión fluorescente de rayos-X (TXRF) y la energía dispersiva fluorescente de rayos-X (EDXRF) exhibe diversas ventajas por encima de las técnicas usadas por lo común para este tipo de análisis, concentrándose dichas ventajas en costos de operación y compra, facilidad de muestreo y manejo de equipo, velocidad de los análisis y recuperación de muestras analizadas. Lo anterior es posible porque dicha técnica permite mantener intactas las muestras para análisis futuros.

La implementación del concreto permeable como un filtro para purificar el agua que contiene metales pesados puede ser de costo bajo con respecto al uso de zeolita debido a que los materiales cementantes y los agregados (basalto) lo hacen ser un producto de bajo costo.

En resumen, este artículo presentó resultados generales y análisis más específicos acerca de la retención y el tratamiento de metales pesados mediante el uso de concreto permeable en pavimentos; también

se analizaron la aplicación y los procesos necesarios para demostrar la utilidad del sistema y su impacto en el medio ambiente mediante su exposición a agentes químicos residuales presentes en dichos procesos. También se estudió el mecanismo responsable de remover los metales pesados por medio del uso de basalto con concentraciones específicas, como reportaron Zhao y Zhao (2014), y Sounthararajah *et al.* (2017).

Agradecimientos

Este trabajo fue patrocinado por la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ) y la Universidad Autónoma de Sinaloa (UAS).

Referencias

- ACI, American Concrete Institute. (2010). *Report on pervious concrete*. Farmington Hills, USA: American Concrete Institute.
- ACI-522R.6. (2006). *Pervious concrete*. Washington, DC, USA: American Concrete Institute.
- Ammar, N. S., Ismail, A. I., & El-Shafey, O. I. (2016). Engineering behavior influence of basaltic rocks on the adsorption of heavy metal ions. *Desalination and Water Treatment*, 57(11), 5089-5099. Recuperado de <https://doi.org/10.1080/19443994.2014.1003101>
- ASTM, American Society for Testing and Materials. (2015). Standard test method for relative density (specific gravity) and absorption of coarse aggregate (ASTM C127-15). West Conshohocken, USA: American Society for Testing and Materials.

- Aydın, H., Bulut, Y., & Yerlikaya, Ç. (2008). Removal of copper (II) from aqueous solution by adsorption onto low-cost adsorbents. *Journal of Environmental Management*, 87(1), 37-45. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.01.005>
- Birch, G., & Scollen, A. (2003). Heavy metals in road dust, gully pots and parkland soils in a highly urbanized subcatchment of Port Jackson, Australia, *Australian Journal of Soil Research*, 41, 1329-1342.
- Borazjani, O., Ghiasi-Freez, J., & Hatampour, A. (2016). Two intelligent pattern recognition models for automatic identification of textural and pore space characteristics of the carbonate reservoir rocks using thin section images. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 35,944-955.
- Bruker. (2011). *S2 PICOFOX™, TXRF Spectrometer for element analysis, User Manual*. Berlin, Germany: Bruker Nano GmbH.
- Bruker. (2007). *S2 PICOFOX Total Reflection X-ray Fluorescence Spectroscopy—Working Principles. Lab Report. Bruker AXS Microanalysis GmbH, Berlin, Germany (ReportNo. XRF 426)*. Billerica, USA: Bruker.
- Delatte, N., Mrkajic, A., & Miller, D. I. (2009). Field and laboratory evaluation of pervious concrete pavements. *Transportation Research Record*, 2113(1), 132-139. Recuperado de <https://doi.org/10.3141/2113-16>
- De-La-Calle, I., Cabaleiro, N., Romero, V., Lavilla, I., & Bendicho, C. (2013). Sample pretreatment strategies for total reflection X-ray fluorescence analysis: A tutorial review. *Spectrochimica Acta Part*

- B: Atomic Spectroscopy*, 90, 23-54. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.sab.2013.10.001>
- Eloussaief, M., & Benzina, M. (2010). Efficiency of natural and acid-activated clays in the removal of Pb (II) from aqueous solutions. *Journal of Hazardous Materials*, 178(1-3), 753-757. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.02.004>
- Haselbach, L., Poor, C., & Tilson, J. (2014). Dissolved zinc and copper retention from stormwater runoff in ordinary portland cement pervious concrete. *Construction and Building Materials*, 53, 652-657. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.013>
- Haselbach, L., Boyer, M., Kevern, J. T., & Schaefer, V. R. (2011). Cyclic heat island impacts on traditional *versus* pervious concrete pavement systems. *Transportation Research Record*, 2240, 107-115.
- Javadi, S., Abdollahian, S., Zhao, Q., Ghavami, M., & Rockaway, T. (2016). Effectiveness of heavy metal removal in urban permeable pavement systems. In: *Geo-Chicago 2016* (pp. 22-31). Recuperado de <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/9780784480168.003>
- Komastka, S. H., Kerkhoff, B., & Panarese, W. C. (2003). *Design and control of concrete mixtures*. Skokie, USA: Portland Cement Association.
- Li, J., Zhang, Y., Liu, G., & Peng, X. (2017). Preparation and performance evaluation of an innovative pervious concrete pavement. *Construction and Building Materials*, 138, 479-485.

- Mangani, G., Berloni, A., Bellucci, F., Tatàno, F., & Maione, M. (2005). Evaluation of the pollutant content in road runoff first flush waters. *Water, Air, and Soil Pollution*, 160(1-4), 213-228. Recuperado de <https://doi.org/10.1007/s11270-005-2887-9>
- Paulsen, G. Zacny, K., Dreyer, C. B., Szucsc, A., Szczesiak, M., Santoro, C., Craft, J., Hedlund, M., & Skok, J. (2013). Robotic instrument for grinding rocks into thin sections (GRITS). *Advances in Space Research*, 51(11), 2181-2193.
- Ponce-Lira, B., Otazo-Sánchez, E. M., Reguera, E., Acevedo-Sandoval, O. A., Prieto-García, F., & González-Ramírez, C. A. (2017). Lead removal from aqueous solution by basaltic scoria: Adsorption equilibrium and kinetics. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 14, 1181-1196. Recuperado de <https://doi.org/10.1007/s13762-016-1234-6>.
- Potgieter, J. H., Potgieter-Vermaak, S. S., & Kalibantonga, P. D. (2006). Heavy metals removal from solution by palygorskite clay. *Minerals Engineering*, 19(5), 463-470. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2005.07.004>
- Sandahl, J. F., Baldwin, D. H., Jenkins, J. J., & Scholz, N. L. (2007). A sensory system at the interface between urban storm-water runoff and salmon survival. *Environmental Science & Technology*, 41(8), 2998-3004. Recovered from <https://doi.org/10.1021/es062287r>
- Sounthararajah, D. P., Loganathan, P., Kandasamy, J., & Vigneswaran, S. (2017). Removing heavy metals using permeable pavement system with a titanate nano-fibrous adsorbent column as a post

- treatment. *Chemosphere*, 168, 467-473. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.11.045>
- Starke, P., Wallmeyer, C., Rölver, S., Göbel, P., & Coldewey, W. G., (2011). Development of a new laboratory evaporation measurement device as decision support for evaporation optimized building, *Building and Environment*, 46, 2552-2561.
- Turer, D. (2005). Effect of non-vehicular sources on heavy metal concentrations of roadside soils. *Water, Air, and Soil Pollution*, 166(1-4), 251-264. Recuperado de <https://doi.org/10.1007/s11270-005-7378-5>
- Uma-Maguesvari, M., & Narasimha V. L. (2013). Studies on characterization of pervious concrete for pavement applications. *Social and Behavioral Sciences*, 104, 198-207.
- Wang, S., & Pang, Y. (2010). Natural zeolites as effective adsorbents in water and wastewater treatment. *Chemical Engineering Journal*, 156, 11-24.
- Weiss, P. T., Kayhanian, M., Gulliver, J. S., & Khazanovich, L. (2017). Permeable pavement in northern North American urban areas: research review and knowledge gaps, *International Journal of Pavement Engineering*, 234, 345-354.
- Zhao, Y., & Zhao, C. (2014). Lead and zinc removal with storage period in porous asphalt pavement. *Water SA*, 40(1), 65-72. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.4314/wsa.v40i1.8>