

Desempeño de residuos de la construcción y la demolición en soluciones basadas en la naturaleza para el tratamiento de aguas grises ligeras

Estefanía Aguirre-Álvarez ^{1,*}, Liliana Lizárraga-Mendiola ², Claudia Coronel-Olivares ¹, Jesús Andrés Tavizón-Pozos ¹ y Gabriela A. Vázquez-Rodríguez ^{1,*}

¹ Área Académica de Química, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Carretera Pachuca-Tulancingo Km. 4.5, Col. Carboneras, 42084 Mineral de la Reforma, Hgo., México.

² Área Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

* Autora de correspondencia: ag472659@uaeh.edu.mx

Contaminación de Agua, Suelo y Aire. Ponencia Virtual.

Recibido: 16 de junio de 2023

Aceptado: 5 de septiembre de 2023

Publicado: 23 de noviembre de 2023

Resumen: El presente estudio tuvo como objetivo evaluar el desempeño de residuos de la construcción y demolición (RCD) para la remoción de contaminantes presentes en aguas grises ligeras (AGL) mediante una solución basada en la naturaleza (SbN). Se empacaron macetas de un litro con uno de los siguientes RCD: concreto reciclado, pavimento permeable, ladrillo y azulejo, cada uno de los cuales se sembraron con plantas ornamentales (*Portulaca grandiflora*, *Chrysopogon zizanioides*, *Tradescantia pallida* o *Nephrolepis obliterata*). Se prepararon también controles desprovistos de plantas para cada RCD. Las macetas se alimentaron semanalmente (durante ocho semanas) con 500 mL de AGL, y se recolectó el agua infiltrada para el análisis de turbidez, conductividad eléctrica, pH, nitrógeno amoniacal, fosfatos y DQO. Los RCD permitieron remover significativamente los contaminantes analizados, con en el siguiente orden de eficiencia: concreto reciclado > pavimento permeable > ladrillo > azulejo. Además, la calidad de los efluentes tratados mejoró con la adición de la cubierta vegetal. Específicamente, la combinación de concreto reciclado con *C. zizanioides* permitió cumplir con los límites máximos permisibles establecidos por la normatividad mexicana para descargas de aguas residuales en cuerpos receptores. De esta manera, se confirma la factibilidad del reuso de RCD en SbN destinadas al tratamiento de aguas grises, lo que podría impulsar una economía circular del agua a nivel domiciliario y, además, propiciar soluciones alternativas para gestionar y controlar este tipo de desechos de manera económica eficiente y ambientalmente segura.

Palabras clave: aguas grises domésticas; materiales filtrantes; sistema de tratamiento descentralizado; calidad del agua; fitorremediación.

Performance of construction and demolition waste in nature-based solutions for light greywater treatment

Abstract: The present study evaluated the performance of construction and demolition waste (CDW) for the removal of contaminants present in light greywater (LWG) using a nature-based solution (NBS). One-liter pots were packed with one CDW (recycled concrete, permeable pavement, bricks, or tiles) and a soil layer. Each pot was planted with one ornamental species (*Portulaca grandiflora*, *Chrysopogon zizanioides*, *Tradescantia pallida*, or *Nephrolepis obliterata*). Controls without plants were also prepared for each CDW. Pots were fed weekly (for eight weeks) with 500 mL of LWG, and infiltrated water was collected to analyze turbidity, electrical conductivity, pH, ammonia nitrogen, phosphate, and COD. CDW significantly removed the pollutants analyzed, with the following order of efficiency: recycled concrete > permeable pavement > bricks > tiles. In addition, the treated effluent quality improved with the addition of the plants. Specifically, combining recycled concrete with *C. zizanioides* allowed compliance with the maximum permissible limits established by Mexican regulations for wastewater discharges into receiving bodies. This result confirms the feasibility of the CDW reuse in NBS for greywater treatment, which could promote a circular water economy at the household level and, in addition, provide alternative solutions to manage and control this waste in an economically efficient and environmentally safe manner.

Keywords: domestic greywater; filter materials; decentralized treatment system; water quality; phytoremediation.

Introducción

Los residuos de construcción y demolición (RCD) son objeto de una preocupación creciente, debido a la gran cantidad en la que se generan, y a que suele disponérseles de modo inadecuado (Elgizawy, 2016; Pacheco *et al.*, 2017). La Norma Ambiental para la Ciudad de México NACDMX-007-RNAT-2019 (SEDEMA, 2019) los define como “aquellos materiales que se generan en las actividades de la industria de la construcción, tales como la remodelación, mantenimiento, instalación, demolición y producto de la excavación, que haya propiciado la alteración de condiciones físicas, químicas y biológicas generales”. Se caracterizan por su alta densidad, y pueden estar constituidos por ladrillos, concreto, suelo,

mampostería, yeso, acero, cemento, arena, mortero, cerámica, madera, plásticos, cartón y papel (Bossink y Brouwers, 1996; Oyenuga y Bhamidiarri, 2007). Se estima que representan alrededor del 30% del total de residuos sólidos en todo el mundo (Ginga *et al.*, 2020); solo en México, en 2018 se generaron alrededor de 10.15 millones de toneladas de RCD (SEMARNAT, 2020). En el diagnóstico del Programa de Gestión Integral de los Residuos Sólidos 2021-2025 para la Ciudad de México, se publicó que en el año 2019 se produjeron aproximadamente 14 mil toneladas de RCD provenientes de obras públicas (IRS, 2019). En esta ciudad sólo existe un sitio autorizado para su disposición final, que diariamente recibe 382 toneladas; el resto se deposita en tiraderos clandestinos como lotes baldíos, caminos y carreteras, lo que perjudica los ecosistemas, así como la seguridad y la salud de los habitantes (SEMARNAT, 2002). Debido a esto, el flujo de RCD debe tratarse como una prioridad respecto a la escasez de espacio en los pocos vertederos oficiales de cada localidad (Fatta *et al.*, 2003), pues constituyen una fuente considerable en términos de volumen y peso (Kartam, 2004). En la actualidad, diferentes países han tomado medidas para una gestión eficaz de los RCD, debido a que no sólo son un problema local, sino global, en el que se involucran mejores prácticas de manejo de residuos, su reincorporación en procesos constructivos, o bien su reúso y aprovechamiento, para lo cual existen diferentes estrategias (Del Río *et al.*, 2009).

Las soluciones basadas en la naturaleza (SbN) se definen como "acciones para proteger, gestionar de manera sostenible y restaurar ecosistemas naturales o modificados, que aborden los desafíos sociales de manera eficaz y adaptativa, proporcionando al mismo tiempo beneficios para el bienestar humano y la biodiversidad" (UICN, 2016). Las SbN son técnicas que imitan los procesos de la naturaleza en paisajes urbanos, y que prestan servicios ecosistémicos con bajos insumos de energía y productos químicos (Boano *et al.*, 2020). Entre los servicios ecosistémicos que pueden brindar las SbN se encuentran la purificación del aire, la mitigación de eventos climáticos extremos, o el tratamiento del agua. Este último servicio se basa en gran medida en la acción de plantas que, al absorber nutrientes y remover contaminantes orgánicos e inorgánicos del agua que reciben, mejoran su calidad. Además, en una SbN se incorporan suelo y materiales filtrantes que ejercen una acción depuradora por mecanismos tales como la sedimentación, filtración, adsorción, precipitación o el intercambio catiónico (Flores, 2018; Winston *et al.*, 2016).

La incorporación de RCD a SbN dedicadas al tratamiento del agua aumentaría el repertorio de servicios ambientales que prestan. Lo anterior se fundamenta en que ya se han publicado estudios que reportan el uso de RCD como adsorbentes de varios contaminantes acuáticos (Dos Reis *et al.*, 2021). Asimismo, se ha evaluado su eficiencia en un sistema de filtración multicapas para el tratamiento de aguas grises domésticas hacia la remoción de sólidos suspendidos totales (SST) y turbidez (Patil *et al.*, 2022). En otro estudio, se han evaluado diferentes RCD, como cemento hidratado, desechos de mármol, y ladrillo triturado, para el tratamiento de agua subterránea y la remoción de arsénico y fluoruro (Bibi *et al.*, 2015). Se tiene también el antecedente de que el concreto reciclado triturado es un adsorbente eficaz de metales pesados (Cu^{2+} , Zn^{2+} y Pb^{2+}) en medios acuosos (Coleman *et al.*, 2005).

Las aguas grises ligeras (AGL) son aquellas que se producen en las actividades diarias del hogar, como el lavado de ropa y la higiene personal en duchas y lavamanos, pero que excluyen las descargas del inodoro y la cocina (Boyjoo *et al.*, 2013). Estas aguas podrían tratarse en una SbN en la que se utilicen RCD en conjunción con especies vegetales, lo que podría ser una alternativa que favorezca la remoción de contaminantes y que permita el reúso del agua tratada en actividades domésticas que no requieran calidad de agua potable, tales como el lavado de patios y el automóvil, el riego de jardines o la descarga de inodoros. Así, reconocer las AGL tratadas como una fuente de abastecimiento de agua y nutrientes representa una oportunidad importante para la gestión sostenible de los recursos hídricos, y la reducción de la demanda doméstica de agua potable. Esto, además, propiciaría el aprovechamiento de los RCD, involucrando prácticas preferibles a su disposición final. Por tal motivo, en el presente estudio se realizaron pruebas a escala laboratorio con varios RCD y una cobertura vegetal previamente seleccionada, con el objetivo de evaluar el desempeño de estas SbN en el tratamiento de AGL.

Materiales y Métodos

Materiales filtrantes

Los medios filtrantes empleados en las pruebas a escala laboratorio se colocaron por capas en contenedores de plástico de 1 L (con 93.3 cm² de área transversal). En la parte inferior (2/3) se incorporó un tipo de RCD (concreto reciclado,

pavimento permeable reciclado, ladrillos o azulejos cerámicos) y en la capa superior (1/3), el suelo, como se presenta en la Figura 1.

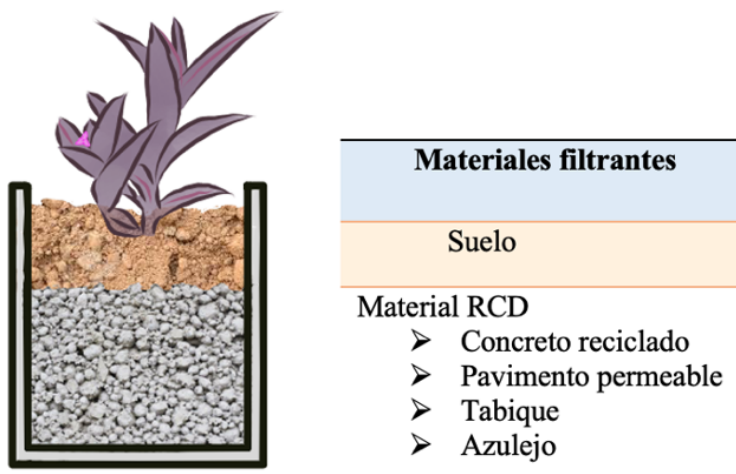


Figura 1. Representación gráfica de los contenedores empacados con los diferentes materiales RCD.

La Tabla 1 presenta algunas propiedades químicas y mecánicas de los materiales utilizados. El suelo tenía un pH moderadamente alcalino (7.52), textura franco arcillo arenosa (con proporciones de arena, limo y arcilla de 70%, 10% y 20%, respectivamente)

Tabla 1. Propiedades químicas y mecánicas de los medios filtrantes empleados en las pruebas a escala laboratorio.

Propiedades químicas y mecánicas					
Materiales filtrantes					
	pH	Capacidad de intercambio catiónico (CIC) (meq/100 g)	Densidad aparente (g/cm ³)	Densidad relativa (g/cm ³)	Porosidad (%)
Suelo	7.52	25.7	1.012	1.264	20
Concreto reciclado	8.8	17.5	0.975	1.013	3.76
Pavimento permeable	8.9	14.3	0.908	0.908	0.037
Tabique	8.33	12.5	0.870	1.11	22.05
Azulejo	8.4	9.37	0.988	1.086	9.01

Pruebas a escala laboratorio

El sistema propuesto para las pruebas a escala laboratorio se implementó en un invernadero ubicado en la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (Mineral de la Reforma, Hidalgo, México). Se evaluaron los cuatro RCD ya mencionados: concreto reciclado, pavimento permeable, tabiques y azulejos, que fueron proporcionados por el Área Académica de Ingeniería y Arquitectura de la UAEH. Una vez recuperados, se trituraron y tamizaron a través de una malla de 1.7 mm. Luego, en contenedores de plástico de 1 L, se empacó cada uno de estos RCD con suelo y con una de las siguientes plantas vasculares: *Chrysopogon zizanioides* (vetiver), *Portulaca grandiflora*, *Tradescantia pallida* y *Nephrolepis obliterated* (helecho reina). Estas plantas se seleccionaron a partir de un estudio realizado previamente por Aguirre-Álvarez et al. (2023), quienes evaluaron una paleta vegetal apta para el tratamiento de AGL en una SbN en la que se utilizaron materiales filtrantes convencionales (carbón activado granular, zeolita, arena y grava). El estudio mostró que estas *C. zizanioides* (vetiver), *P. grandiflora*, *T. pallida* y *N. obliterated* se adaptaron con facilidad a las condiciones experimentales y al riego con AGL. Cada una de estas configuraciones, que se denominaron unidades de tratamiento individual, se preparó por duplicado. Además, se montaron macetas testigo, empacadas con los diferentes RCD y suelo en la misma proporción que la mostrada en la Figura 1, pero a las que no se introdujeron plantas, para apreciar el efecto de éstas en la descontaminación del AGL. En la Figura 2 se presenta cómo se prepararon las unidades de tratamiento individual.

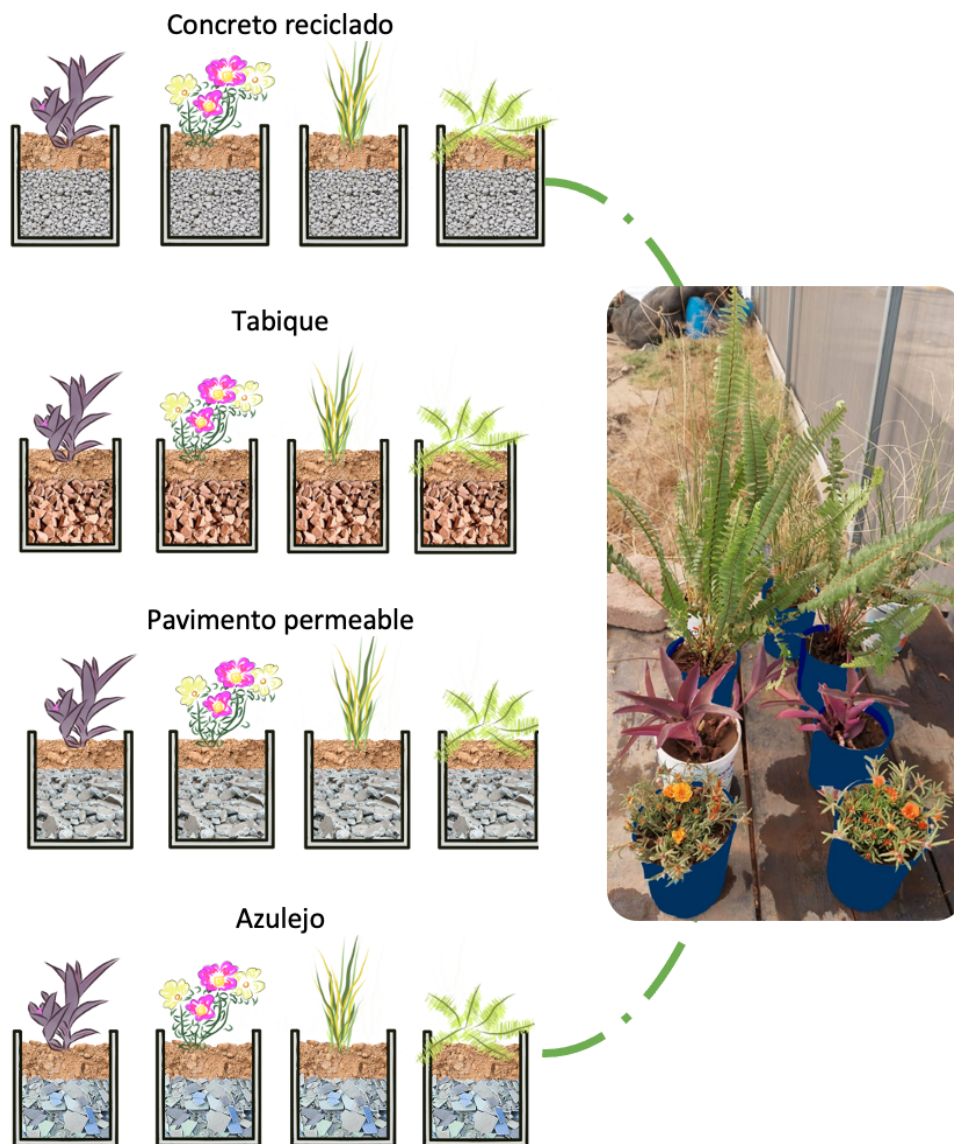


Figura 2. Visualización y representación de las unidades de tratamiento individual.

Tanto las unidades de tratamiento individual como los testigos se regaron semanalmente con 500 mL de AGL provenientes del ciclo de una máquina de lavado de ropa de una casa habitación; se empleó un tiempo de retención de dos minutos y una carga hidráulica superficial de $77.18 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{d}$. Se realizaron ocho riegos en total. En cada riego se reunieron muestras del agua de alimentación y del agua infiltrada, que se llevaron inmediatamente al laboratorio del Área Académica de Química de la UAEH para determinar su turbidez, conductividad eléctrica (CE), pH, nitrógeno amoniacal (N-NH_4^+), ortofosfatos disueltos (PO_4^{3-}) y demanda química de oxígeno (DQO). Para la medición de turbidez, se evaluó la absorbancia a 600 nm (A_{600}) en un espectrofotómetro Genesys 10 UV-Visible (Thermo Scientific, Waltham, EE. UU.). Para la determinación de CE, se usó un conductímetro Corning (modelo 441, Quebec, Canadá). El pH se determinó con un potenciómetro HANNA Instruments (pH210, Woonsocket, EE. UU.) El N-NH_4^+ , los ortofosfatos disueltos y la DQO se analizaron mediante los métodos estándar 4500-P F, 4500-PE y 5220 D, respectivamente (APHA, 2012). Estos parámetros de calidad de las muestras se determinaron por triplicado, y se expresaron como promedios; a su vez, se calcularon las remociones promedio de cada uno de estos parámetros como porcentajes, tanto en las unidades de tratamiento individual como en los testigos.

Análisis estadísticos

La normalidad de los datos obtenidos, es decir, los valores de las remociones medias de los contaminantes, se determinó con la prueba de Shapiro-Wilks en PAST v. 4.5 (Oslo, Noruega; Hammer et al., 2001). Posteriormente, se efectuó un análisis de varianza con la prueba de medias de Tukey ($\alpha = 0.05$) usando el software Minitab v.18 (LLC, State College, Pensilvania, EE. UU.) como comparador múltiple. De esta manera, se identificaron las diferencias significativas entre las remociones ejercidas por cada uno de los testigos, es decir, cada RCD combinado con suelo pero desprovisto de plantas. Asimismo, se identificaron las diferencias significativas entre las remociones presentadas por las unidades de tratamiento individual (cada uno de los RCD en combinación con las diferentes plantas) con respecto a su testigo. En el supuesto de que los datos no cumplieran con el criterio de la normalidad, se llevó a cabo la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis, además de pruebas pareadas de Mann-Whitney ($\alpha = 0.05$) en PAST v. 4.5.

Resultados y Discusión

Eficiencias de remoción de contaminantes en las pruebas a escala laboratorio

En la Figura 3 se presentan los porcentajes promedio de remoción de turbidez (A_{600}) del AGL alcanzados durante los ocho ciclos de evaluación en las unidades de tratamiento individual y los testigos.

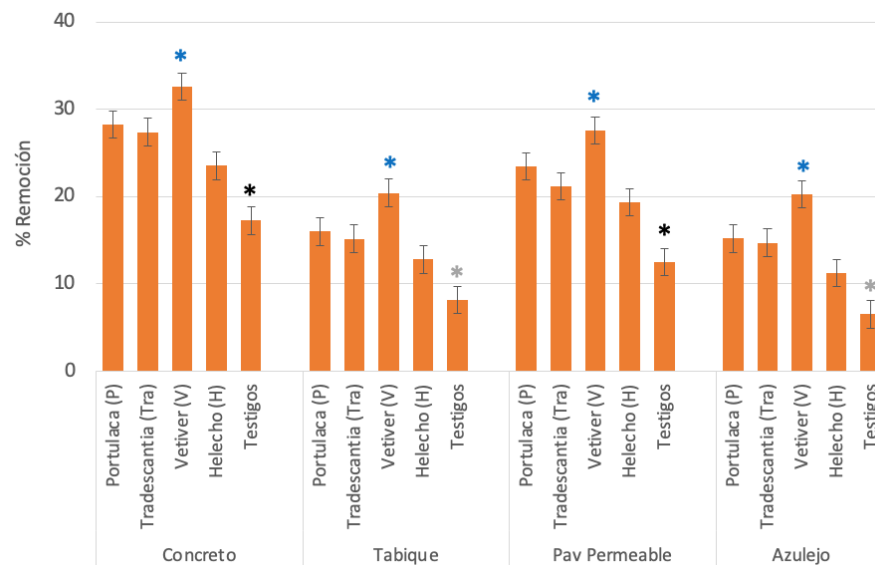


Figura 3. Remoción de turbidez de las AGL en las unidades de tratamiento individual y los testigos. Los valores de cada barra y las marcas de error representan los promedios y las desviaciones estándar, respectivamente, de las remociones determinadas en los ocho ciclos de alimentación. El análisis de varianza se realizó con la prueba de medias de Tukey ($p < 0.05$). Los asteriscos de color negro (*) y gris (*) señalan dos grupos de testigos significativamente diferentes ($p < 0.05$) entre sí. Los asteriscos de color azul (*) indican las unidades de tratamiento individual con remociones medias significativamente diferentes ($p < 0.05$) a las demostradas por el testigo correspondiente.

Se puede observar que los testigos, es decir, las unidades que contenían únicamente RCD y suelo, eliminaron materia en suspensión y contribuyeron al tratamiento del AGL disminuyendo su turbidez (A_{600}), en promedio en 10%. En un estudio llevado a cabo por Patil *et al.* (2022), se utilizaron diversos RCD, entre ellos, arena fina, guijarro, grava, astillas de madera y ladrillos de cenizas volátiles, en un sistema de filtración con diversas capas filtrantes para el tratamiento aguas grises procedentes de un hogar en la India; consiguieron remover 94% de SST y 78% de turbidez. Ahora bien, en nuestro caso, en presencia de cualquiera de las especies vegetales se eliminó más turbidez de cada riego. Particularmente, *C. zizanioides* (vetiver) mostró una remoción promedio del 25% en los ocho ciclos, con lo que es la más eficiente hacia este contaminante. Asimismo, como se puede apreciar en la Figura 3, la mayor eficiencia en la eliminación de turbidez es por parte del concreto reciclado en combinación con dicha planta. Esto coincide con un estudio de Rahman *et al.* (2015), en el que se reportó la reducción de SST en un 40% por parte de materiales reciclados

como el ladrillo triturado, el concreto reciclado y el pavimento de asfalto recuperado en combinación con geotextil no tejido, en el tratamiento de agua gris sintética mediante pavimentos permeables. Además, Ramírez (2018) sembró *C. zizanioides* (vetiver) en humedales artificiales para tratar agua residual sintética, y reportó una alta tasa de remoción de SST (91%). Al concreto reciclado le siguen en eficiencia el pavimento permeable, el azulejo y finalmente el tabique. Galvão et al. (2022) estudiaron una pared verde, en la que se probaron dos tipos de materiales reciclados, tejas cerámicas trituradas y fibra de coco, como medios de relleno combinados con dos especies de plantas, *Adiantum fragrans* y *Davallia tyermanii*. Esta combinación presentó un gran desempeño, exhibiendo en promedio eficiencias de remoción de turbidez mayores al 60%. Con respecto a las plantas, el orden decreciente para la remoción de turbidez fue: *C. zizanioides* > *P. grandiflora* > *T. pallida* > *N. obliterata* (helecho reina).

Con respecto a la CE, ninguna unidad de tratamiento individual o testigo pudo removerla, sino exportarla. La Figura 4 presenta el porcentaje de exportación de CE de las unidades de tratamiento individual y de los testigos. Los testigos exportaron más CE, en promedio 15%. Esto puede deberse a que los compuestos que integran los materiales filtrantes se fueron liberando en cada uno de los riegos de AGL. Sin embargo, el concreto reciclado fue el que menos exportó este contaminante, seguido del pavimento permeable, luego el azulejo y, al final, el tabique. Ahora bien, la cobertura vegetal disminuye la exportación de CE hacia los efluentes tratados. Principalmente, la especie *C. zizanioides* (vetiver), que exportó en promedio el 8% de CE. Lo anterior concuerda con los resultados del estudio de Higuera (2017), quien implementó a vetiver en el tratamiento del efluente de una planta de tratamiento de aguas residuales y detectó una ligera reducción de conductividad eléctrica (20%). Las especies *P. grandiflora*, *T. pallida* y *N. obliterata* (helecho reina) presentaron similitud en los niveles de exportación de CE.

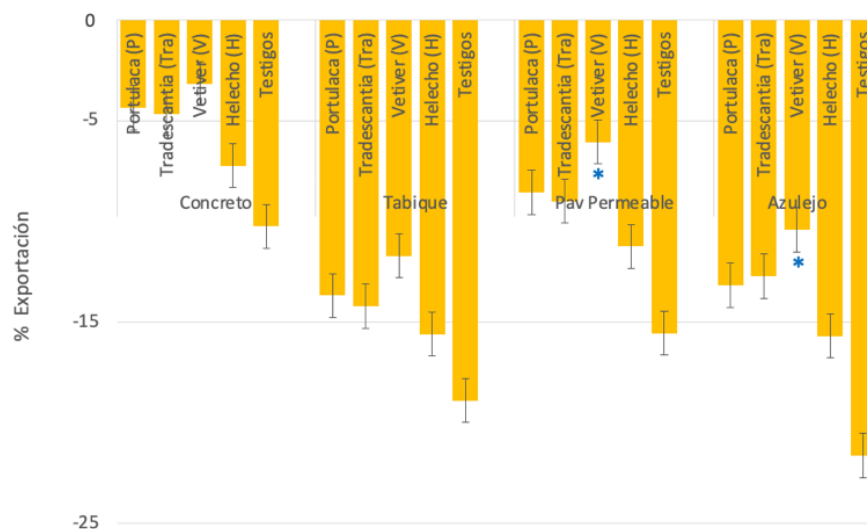


Figura 4. Exportación de conductividad eléctrica de las AGL en las unidades de tratamiento individual y los testigos. Los valores de cada barra y las marcas de error representan los promedios y las desviaciones estándar, respectivamente, de las exportaciones determinadas en los ocho ciclos de alimentación. El análisis de varianza se realizó con la prueba de medias de Tukey ($p < 0.05$).

Los asteriscos de color azul (*) indican las unidades de tratamiento individual con remociones medias significativamente diferentes ($p < 0.05$) a las demostradas por el testigo correspondiente.

En la Figura 5 se observan los promedios de pH del AGL de entrada y de las AGL tratadas mediante las unidades de tratamiento individuales y los testigos.

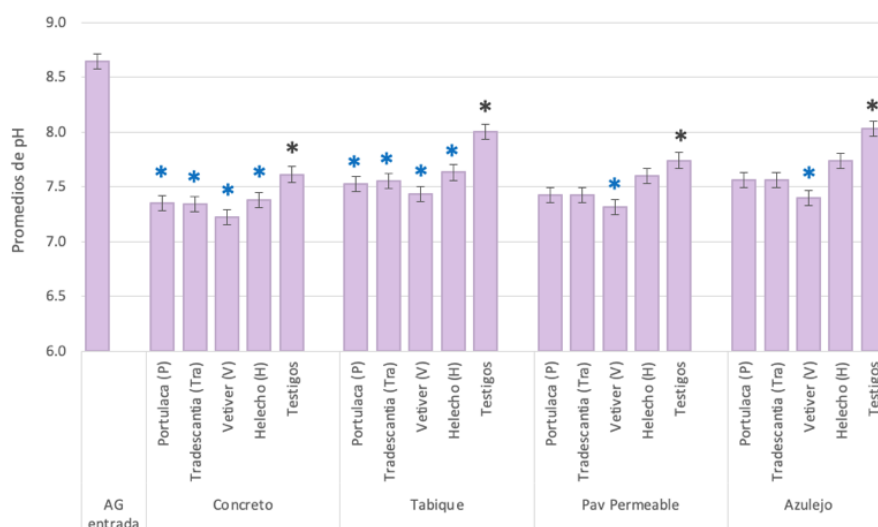


Figura 5. Valores promedio del pH de las aguas grises ligeras antes y después de su paso por las unidades de tratamiento individual y los testigos. Los valores de cada barra y las marcas de error representan los promedios y las desviaciones estándar, respectivamente, de las remociones determinadas en los ocho ciclos de alimentación. El análisis de varianza se realizó con la prueba de medias de Tukey ($p < 0.05$). Los asteriscos color negro (*) señalan a los valores medios significativamente diferentes ($p < 0.05$) a los medidos en el agua de entrada. Los asteriscos de color azul (*) indican las unidades de tratamiento individual con valores medios significativamente diferentes ($p < 0.05$) a los medidos en el testigo correspondiente y respecto también de los valores medios del agua gris de entrada.

Los valores promedio de pH de AGL de entrada fueron alcalinos, en promedio equivalentes a 8.5. Al hacer pasar el AGL por los testigos y las unidades de tratamiento, el pH disminuyó a valores cercanos a la neutralidad (7-8). La norma oficial mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021 indica que el pH de aguas residuales que se descarguen ríos, arroyos, canales, drenes o se destinen a riego debe encontrarse en un rango de 6 a 9 (SEMARNAT, 2022), y todos los efluentes la cumplen. Se observó que los testigos disminuyen ligeramente el pH del AGL, de 8.5 a 7.9. El RCD que más disminuyó este parámetro fue el concreto reciclado, seguido del pavimento permeable, luego el tabique y al final el azulejo. Por su parte, la implementación de la cobertura vegetal contribuye con una mayor disminución de pH. Particularmente, *C. zizanioides* (vetiver) ofrece la mayor disminución promedio del pH (hasta 7.4). Esto coincide con Higuera (2017), quien trató el efluente de una PTAR de Colombia con la misma especie vegetal, *C. zizanioides* (vetiver), y reportó una disminución de pH de 8 a 7.3. Después de *C. zizanioides*, la planta que más disminuyó el pH fue *P. grandiflora*, seguida de *T. pallida* y finalmente, *N. obliterata* (helecho reina). El rango de pH recomendado para el crecimiento de las plantas, y también para la eliminación de nitrógeno, es de 6.5 a 7.5 (Ramírez, 2018).

En la Figura 6 se exponen los porcentajes de remoción de nitrógeno amoniacal en las unidades de tratamiento individual y en los testigos. Los testigos registraron un promedio de 12% de remoción de nitrógeno amoniacal. Como se puede apreciar en la Figura 6, el concreto reciclado fue el RCD que más removió este contaminante, con una eficiencia del 22%, seguido del pavimento permeable, con eficiencia del 17%; luego el tabique, con remoción del 13%, y finalmente el azulejo, con remoción del 9%. No obstante, la adición de las plantas ornamentales incrementó la remoción del nitrógeno amoniacal que alcanzaron los testigos. La mayor eficiencia fue por parte de *C. zizanioides* (vetiver), con una eliminación promedio del 25%, seguido de *P. grandiflora* con un 22% en promedio; este último valor fue similar al de *T. pallida* y, en último lugar, *N. obliterata* (helecho reina). La capacidad de adsorción de este contaminante por parte del concreto reciclado fue confirmada por Yang et al., (2012), quienes implementaron este material y cenizas de carbón como materiales filtrantes junto con *Typha angustifolia* en un humedal artificial de cuatro etapas para el tratamiento de aguas residuales domésticas, con el cual eliminaron el 90% del nitrógeno amoniacal. El nitrógeno amoniacal es absorbido por las plantas como nutriente a través de su raíz (Núñez et al., 2004), lo que se sumaría al intercambio catiónico que, según algunos autores, puede ocurrir entre el NH_4^+ y otros cationes monovalentes como el Na^+ y el K^+ , que son muy comunes en materiales de construcción (Li et al., 2017).

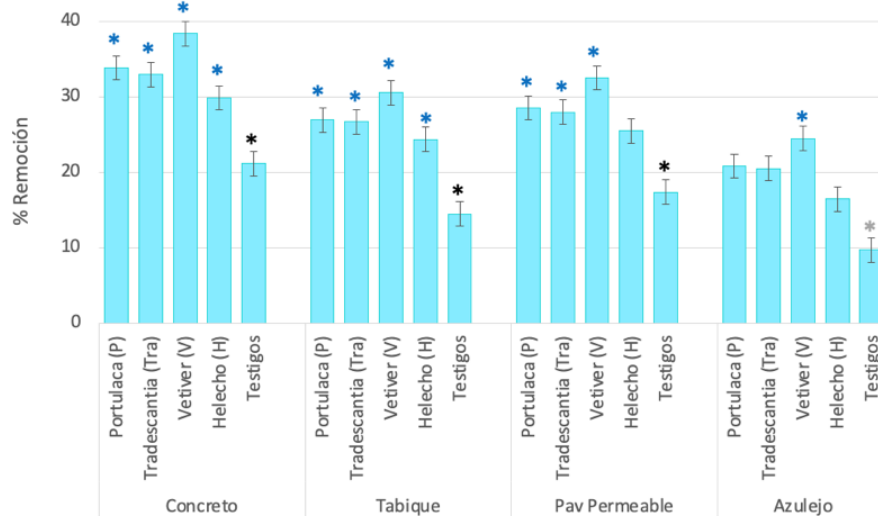


Figura 6. Remoción de nitrógeno amoniacal ($N-NH_4^+$) de las AGL en las unidades de tratamiento individual y los testigos. Los valores de cada barra y las marcas de error representan los promedios y las desviaciones estándar, respectivamente, de las remociones determinadas en los ocho ciclos de alimentación. El análisis de varianza se realizó con la prueba de medias de Tukey ($p < 0.05$). Los asteriscos de color negro y gris (*, *) señalan dos grupos de testigos significativamente diferentes ($p < 0.05$) entre sí. Los asteriscos de color azul (*) indican las unidades de tratamiento individual con remociones medias significativamente diferentes ($p < 0.05$) a las demostradas por el testigo correspondiente.

En la Figura 7 se muestran los porcentajes de remoción de fosfatos por parte de las unidades de tratamiento y los testigos.

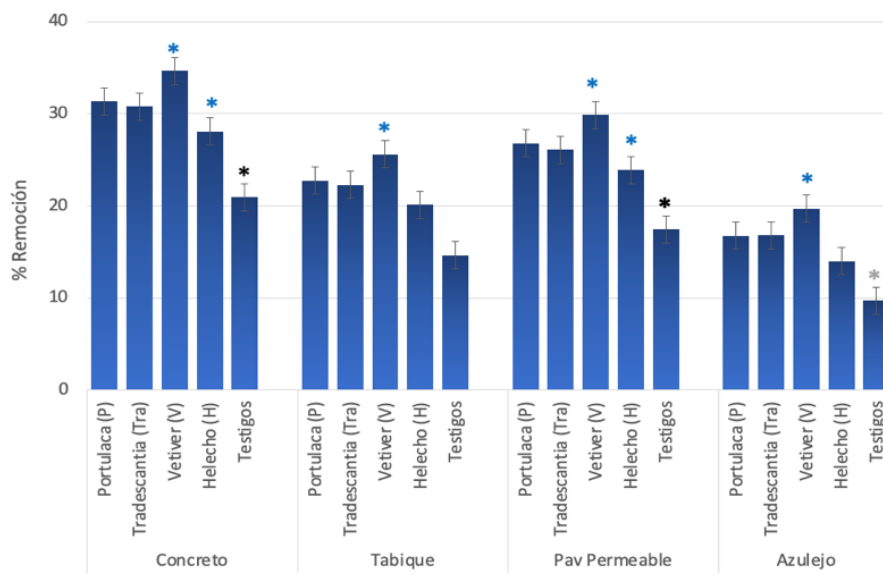


Figura 7. Remoción de fosfatos (PO_4^{3-}) de las AGL en las unidades de tratamiento individual y los testigos. Los valores de cada barra y las marcas de error representan los promedios y las desviaciones estándar, respectivamente, de las remociones determinadas en los ocho ciclos de alimentación. El análisis de varianza se realizó con la prueba de medias de Tukey ($p < 0.05$). Los asteriscos color negro y gris (*, *) señalan remociones medias significativamente diferentes ($p < 0.05$) demostradas por parte de los testigos (o diferentes RCD). Los asteriscos de color azul (*) indican las remociones medias significativamente diferentes ($p < 0.05$) demostradas por las unidades de tratamiento individual y el control correspondiente.

Los testigos disminuyeron en promedio 13% la concentración de iones fosfato. Nuevamente, la mayor eficiencia para remover fosfatos fue por parte del concreto reciclado. Esto concuerda con un estudio realizado por Li *et al.* (2021) en el que se evaluó la eficiencia de agregados reciclados para el tratamiento de aguas residuales sintéticas; se estudiaron

columnas empacadas con tres agregados reciclados: ladrillo, concreto, y mezclas de concreto y ladrillo, y el concreto fue el material con el más alto desempeño en la remoción de este contaminante (51%). Otro estudio mostró que el concreto triturado elimina el 50% de fósforo de aguas residuales (Deng y Wheatley 2018). Asimismo, DosReis *et al.* (2020) investigaron la eliminación de fosfatos de efluentes acuosos por parte de desechos de cemento (residuo de una planta de reciclaje de RCD de Francia), y reportaron la adsorción del 70% de los fosfatos.

Sin embargo, con la presencia de las plantas, la eficiencia para la remoción del contaminante se incrementó. Al igual que con los contaminantes ya presentados, *C. zizanioides* (vetiver) presentó mayor eliminación de fosfatos (en promedio 26%) durante los riegos. Yang *et al.* (2012) reportaron que el uso de RCD a base de concreto reciclado y de cenizas de carbón como sustrato, junto con la planta *Typha angustifolia*, en un humedal artificial para el tratamiento de aguas residuales domésticas resulta ser de gran potencial, debido a que presenta un amplio rendimiento en la eliminación de fósforo (90%). Posteriormente, los materiales RCD que ofrecieron buena eficiencia fueron el pavimento permeable, seguido del ladrillo y después, el azulejo. En cuanto a las plantas, las que mejor removieron este contaminante, después de *C. zizanioides* (vetiver), fueron *P. grandiflora*, seguida de *T. pallida* y de *N. oblitterata* (helecho reina).

Con respecto a las remociones de DQO, estas se condensan en la Figura 8. Se puede observar que los testigos, es decir aquellas macetas que únicamente contienen los RCD filtrantes y suelo, actúan en el proceso de remoción de la demanda química de oxígeno, con un promedio del 13%. El RCD que presentó mayor eficiencia en la remoción de este parámetro fue el concreto reciclado, después el pavimento permeable, seguido del tabique y por último el azulejo. Patil *et al.* (2022), quienes investigaron algunos materiales provenientes de la demolición y construcción, como arena fina, guijarro, grava, astillas de madera y ladrillos de cenizas volátiles, en un sistema de filtración de aguas grises en la India, reportaron una remoción de DQO del 85.9%. Asimismo, Li *et al.* (2021) evaluaron un sistema de tratamiento sin plantas para el tratamiento de aguas residuales sintéticas, en el que incorporaron ladrillo triturado con concreto reciclado, y reportaron remoción de DQO del 58%.

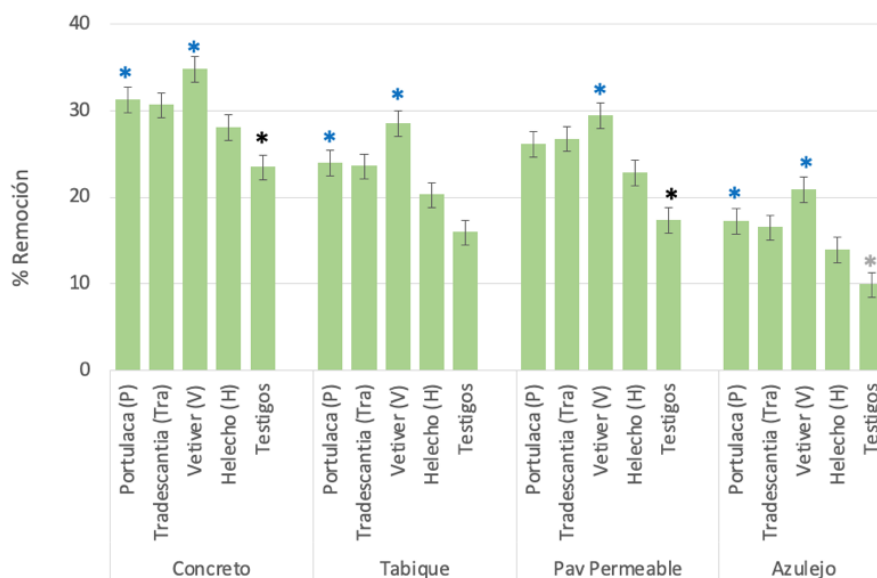


Figura 8. Remoción de DQO de las AGL en las unidades de tratamiento individual y los testigos. Los valores dentro de cada barra y las marcas de error representan los promedios y las desviaciones estándar, respectivamente, de las remociones determinadas en los ocho ciclos de alimentación. El análisis de varianza se realizó con la prueba de medias de Tukey ($p < 0.05$). Los asteriscos de color negro (*) y gris (*) aluden a dos grupos de testigos significativamente diferentes ($p < 0.05$) entre sí. Los asteriscos de color azul (*) indican las unidades de tratamiento individual con remociones medias significativamente diferentes ($p < 0.05$) a las demostradas por sus testigos correspondientes.

Sin embargo, al incorporar las plantas ornamentales en la configuración de las unidades de tratamiento, se registró una mayor remoción de DQO. En primer lugar, la mayor eficiencia fue por parte de la planta *C. zizanioides* (vetiver), con un

promedio del 25%, seguida por *P. grandiflora*, *T. pallida* y finalmente, *N. obliterated* (helecho reina). Algunos autores han reportado los beneficios de implementar materiales RCD como materiales filtrantes en SbN. Es el caso de Galvão *et al.* (2022), quienes utilizaron tejas cerámicas trituradas y fibra de coco como medios filtrantes y dos plantas, *Adiantum fragans* y *Davallia tyermanii*, en la evaluación de una pared verde, y encontraron eficiencias de remoción de DQO de 59%. En otro estudio, Yang *et al.* (2012) reportaron el uso de RCD como materiales filtrantes en un humedal artificial, en combinación de la planta *Typha angustifolia*, para el tratamiento de aguas residuales domésticas, y midieron una eficiencia del 80% de eliminación de DQO.

Análisis estadísticos

Primeramente, se realizaron los análisis estadísticos de las remociones ejercidas por parte de los testigos. Respecto al parámetro de turbidez, se encontró que las remociones por parte del concreto reciclado y el pavimento permeable son significativamente diferentes a las obtenidas con el ladrillo y al azulejo. En cuanto a la CE, los valores de exportación promedio no presentaron diferencias significativas.

Se comparó el pH del AGL de entrada y del agua infiltrada a través de los testigos, y se encontraron diferencias significativas entre el AGL de entrada y el agua tratada por parte de todos los testigos. Respecto a las remociones de nitrógeno amoniacal, los valores aportados por los testigos a base del concreto reciclado, el pavimento permeable y el ladrillo son significativamente diferentes a los que produjo el testigo a base de azulejo. En cuanto a las remociones de fosfatos y de DQO, los controles de concreto reciclado y de pavimento permeable generaron valores significativamente diferentes a los producidos por el azulejo.

Posteriormente, se realizaron los análisis estadísticos de las remociones llevadas a cabo con cada uno de los RCD en combinación con las plantas y en comparación con los testigos. El análisis de las remociones de turbidez efectuadas por el concreto reciclado en combinación con las distintas especies ornamentales y contra el testigo correspondiente sólo mostró diferencias significativas entre la especie *C. zizanioides* (vetiver) y el testigo. En cuanto a la exportación de CE, no se presentaron diferencias significativas entre las unidades de tratamiento individual y los testigos a base de concreto reciclado y ladrillo. En cambio, se encontraron diferencias significativas entre las unidades de tratamiento individual sembradas con *C. zizanioides* (vetiver) y los testigos a base de pavimento permeable y azulejo. Luego, se comparó el pH del AGL de entrada y el del agua infiltrada a través de las unidades de tratamiento. Se encontró que las unidades de tratamiento individual con concreto reciclado y tabique, y sus respectivos testigos, disminuyeron este parámetro con una diferencia significativa al del AG de entrada. Y que, aquellas unidades con pavimento permeable y azulejo, se detectaron diferencias significativas entre el AGL de entrada, los testigos y las unidades de tratamiento individual con *C. zizanioides* (vetiver). Respecto al $N-NH_4^+$, las unidades de tratamiento individual a base de concreto reciclado, el ladrillo presentaron diferencias significativas entre todas las especies vegetales y el testigo, mientras que, al analizar las unidades de tratamiento individual a base de pavimento permeable, se demostraron diferencias significativas entre *C. zizanioides* (vetiver), *P. grandiflora* y *T. pallida*, y los testigos. Asimismo, las unidades de tratamiento empacadas con azulejo, señalaron diferencias significativas entre *C. zizanioides* (vetiver) y su testigo correspondiente. Acerca de las remociones de fosfatos, y respecto al uso del ladrillo y el azulejo, se detectaron diferencias significativas entre las unidades sembradas con *C. zizanioides* (vetiver) y los testigos correspondientes, mientras que, al usar concreto reciclado y pavimento permeable, se encontraron diferencias significativas entre las unidades sembradas con *C. zizanioides* (vetiver) y *N. obliterated* (helecho reina) con respecto a los testigos. Por último, con respecto a las remociones de DQO, las unidades a base de concreto, ladrillo y azulejo con plantas mostraron diferencias significativas con respecto a los testigos si estaban sembradas con *C. zizanioides* (vetiver) y *P. grandiflora*, mientras que, la implementación del pavimento permeable en combinación con *C. zizanioides* (vetiver), fue la única que produjo una diferencia significativa con respecto a los testigos correspondientes.

Factibilidad del reúso del agua tratada

La Tabla 2 condensa los parámetros de la calidad del agua de entrada y salida de las unidades de tratamiento individual y los testigos, los rangos de los porcentajes de remoción obtenidos. Igualmente, se presentan como referencia los límites máximos permisibles de contaminantes que establece normatividad mexicana (NOM-001-SEMARNAT-2021) para las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores nacionales, específicamente en ríos, arroyos, canales,

drenes, indicados como valores instantáneos; así como también, para la infiltración de aguas residuales en suelos, infiltración y otros riegos (SEMARNAT, 2022).

Cabe destacar que las unidades de tratamiento empacadas con el concreto y en combinación con la planta *C. zizanioides* fueron en general, las que demostraron una mayor eficiencia para la remoción de los contaminantes presentes en el AGL, con remoción de turbidez del 25.2 %, fosfatos el 27.5%, nitrógeno amoniacal del 31.5% y DQO el 29%; sin embargo, produjeron un incremento de CE de 7.8%. Las concentraciones de los contaminantes o parámetros analizados en tratamiento de AGL por parte de esta configuración previamente mencionada, fue para turbidez (A_{600}) de 0.189, de CE de 1489 $\mu\text{S}/\text{cm}$, de fosfatos disueltos (PO_4^{3-}) de 6.67 mg/L, de nitrógeno amoniacal (N-NH_4^+) de 1.46 mg/L, y una DQO de 391 mg/L. Por lo tanto, concluimos que estos valores cumplen con la normatividad mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021 en términos de pH, nutrientes y DQO. Esto coincide parcialmente con el estudio de Aguirre-Álvarez *et al.* (2023), en el que se reportó que una SbN a base de *C. zizanioides* y una combinación de materiales convencionales como el carbon activado granular, zeolita, arena y grava, tiene un gran potencial para remover contaminantes presentes en AGL, ya que elimina 65% de turbidez, 25% la CE, 63% los fosfatos disueltos, 76% el nitrógeno amoniacal, y 74% la DQO.

Tabla 2. Parámetros promedio de calidad del agua gris ligera (AGL) a la entrada y después de su infiltración por las unidades de tratamiento individual y en los testigos.

Parámetros	AGL	Agua infiltrada en unidades de tratamiento individual	Agua infiltrada en testigos	NOM-001*	
	Valores medios	Valores medios	Valores medios	Riego de áreas verdes ^A	Infiltración y otros riegos ^B
Turbidez (A_{600})	0.250	0.199	0.221	–	–
CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	1385	1519	1608	–	–
pH	8.7	7.45	7.84	6 – 9	6 – 9
N-NH_4^+ (mg/L)	2.09	1.54	1.76	–	–
PO_4^{3-} (mg/L)	9.22	6.9	7.70	–	–
DQO (mg/L)	549	412	455	84	210

* Límites máximos permisibles establecidos por la NOM-001-SEMARNAT-2021 como valores instantáneos para riego de áreas verdes^A e infiltración y otros riegos^B (SEMARNAT, 2022).
 CE: Conductividad eléctrica.

Conclusiones

En el presente trabajo se evaluaron cuatro RCD como medios filtrantes en una SBN para el tratamiento de AGL en pruebas a escala laboratorio. Las macetas testigo, es decir, los lechos filtrantes carentes de vegetación, disminuyeron los contaminantes presentes en las AGL. No obstante, al integrar vegetación, esta remoción mejoró. Los resultados evidenciaron que los cuatro RCD empleados contribuyen positivamente en la calidad del agua, removiendo significativamente la mayoría de los contaminantes analizados, con el siguiente orden de eficiencia: concreto reciclado > pavimento permeable > ladrillo > azulejo. De acuerdo con los resultados obtenidos, se identificó que, en general, la configuración del concreto reciclado en combinación con la especie *C. zizanioides* es la más prometedora para el tratamiento de aguas grises ligeras. Además, se encontró que la calidad del agua gris tratada por parte de las unidades de tratamiento individual que contenían concreto reciclado y la especie *C. zizanioides* cumplió con la normatividad mexicana (NOM-001-SEMARNAT-2021) en términos de pH, fosfatos y nitrógeno. De igual manera, se observó que todas las plantas implementadas se adaptaron con éxito a las aguas grises.

Los resultados presentados en el estudio muestran que las unidades de tratamiento individual diseñadas y construidas a escala laboratorio deben optimizarse para que se incremente la remoción de DQO. Además, propiciar el aprovechamiento de los RCD en una SbN de tipo muro verde que trate las aguas grises ligeras domiciliarias permitiría que éstas constituyeran una fuente secundaria de abastecimiento para actividades que no exijan calidad de agua potable, tales como el lavado de patios y automóviles, la limpieza del hogar, riego de áreas verdes o la descarga de

inodoros. Lo anterior también ofrece una alternativa para el reúso de los RCD, así como un impulso a la economía circular a nivel domiciliario.

Agradecimientos y financiamiento: Estefanía Aguirre Álvarez agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT-México) la beca para realizar su posgrado. Los autores agradecen el apoyo brindado por el Proyecto PAO-2022-1389 (UAEH) y por la profesoras investigadoras María del Refugio González Sandoval (Área Académica de Ingeniería y Arquitectura, UAEH), quienes facilitaron el uso de instalaciones y equipos varios.

Bibliografía

- Aguirre-Álvarez, E., Lizárraga-Mendiola, L., Coronel-Olivares, C., Tavizón-Pozos, J. A., & Vázquez-Rodríguez, G. A. (2023). Evaluación de una paleta vegetal apta para el tratamiento de aguas grises ligeras en soluciones basadas en la naturaleza. Tratamiento de aguas grises ligeras en una solución basada en la naturaleza. *Ingeniería del agua*, 27(3), 183–196. <https://doi.org/10.4995/ia.2023.19554>.
- Bibi, S. Farooqi, A., Hussain, K., & Haider, N. (2015). Evaluation of industrial based adsorbents for simultaneous removal of arsenic and fluoride from drinking water. *Cleaner Production*, 87, 882–896. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.09.030>.
- Boano, F., Caruso, A., Costamagna, E., Ridolfi, L., Fiore, S., Demichelis, F., Galvão, A., Piseiro, J., Rizzo, A., & Masi, F. (2020). A review of nature-based solutions for greywater treatment: Applications, hydraulic design, and environmental benefits. *Science of the Total Environment*, 711, 134731. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134731>.
- Bossink, B. & Brouwers, H.J.H. (1996). Construction Waste: Quantification and Source Evaluation. *Construction Engineering & Management*, 122 (1). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(1996\)122:1\(55\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(1996)122:1(55)).
- Boyjoo, Y.; Pareek, V. K. & Ang, M. A. (2013). Review of Greywater Characteristics and Treatment Processes. *Water Science & Technology*, 67 (7), 1403–1424. <https://doi.org/10.2166/wst.2013.675>.
- Coleman, N. J., Lee, W. & Slipper, I. J. (2005). Interactions of aqueous Cu²⁺, Zn²⁺ and Pb²⁺ ions with crushed concrete fines. *Journal of Hazardous Materials*, 121 (1-3), 203–213. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.02.009>.
- Del Río, M.M., García, P. I. & Weis, I. S. (2009). Sustainable construction: Construction and demolition waste reconsidered. Waste management & research. *International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA*. 28 (2), 118–29. <https://doi.org/10.1177/0734242X09103841>.
- Deng, Y. & Wheatley, A. (2018). Mechanisms of Phosphorus Removal by Recycled Crushed Concrete. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15 (2), 357. <https://doi.org/10.3390/ijerph15020357>.
- Dos Reis, S., Cazacliu, B. G., Correa, R. C., Ovsyannikova, E., Kruse, A., Sampaio, C. H., Lima, E. C. & Dotto, G. L. (2020). Adsorption and recovery of phosphate from aqueous solution by the construction and demolition wastes sludge and its potential use as phosphate-based fertiliser. *Environmental Chemical Engineering*, 8 (1), 103605. <https://doi.org/10.1016/j.iece.2019.103605>.
- Dos Reis, S. G., Quattrone, M., Ambrós, W. M., Cazacliu, B. G. & Sampaio, C. H. (2021). Current Applications of Recycled Aggregates from Construction and Demolition: A Review. *Materials*, 14 (7), 1700. <https://doi.org/10.3390/ma14071700>.
- Elgizawy, S., El-Haggar, S. & Nassar, K. (2016). Approaching Sustainability of Construction and Demolition Waste Using Zero Waste Concept. *Low Carbon Economy*, 7, (1)11. <https://doi.org/10.4236/lce.2016.71001>.
- Fatta, D. A. P., E. Avramikos, E., Sgourou, K. Moustakas, F. K.; Mentzis, A. & Loizidou, M. (2003). Generation and management of construction and demolition waste in Greece an existing challenge. *Resources, Conservation and Recycling*, 40(1), 81–91. [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(03\)00035-1](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(03)00035-1).
- Flores, J. (2018). Sistemas innovadores, jardinería y horticultura vertical en el IMTA. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Coordinación de Riego y Drenaje, Subcoordinación de Ingeniería de Riego, México.
- Galvão, A., Martins, D., Rodrigues, A. Manso, M., Ferreira, J. & Matos, C.S. (2022). Green walls with recycled filling media to treat greywater. *Science of The Total Environment*, 842, 156748. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156748>.
- Ginga, P.C., Ongpeng, C. J.M. & Daly, M.K. (2020). Materials Circular Economy on Construction and Demolition Waste: A Literature Review on Material Recovery and Production. *Materials*, 13, (13), 2970. <https://doi.org/10.3390/ma13132970>.
- Higuera, S.H (2107). Biofiltro con cascarilla de arroz y pasto vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) para el tratamiento del efluente de la PTAR del INPEC. Yopal, Casanare, Colombia. *Investigación Agraria y Ambiental*, 8 (1), 108–114. <https://doi.org/10.22490/21456453.1842>.
- IRS (2019). Inventario de Residuos Sólidos de la Ciudad de México 2019. Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno de la Ciudad de México. https://www.sedema.cdmx.gob.mx/storage/app/media/DGCPCA/InventarioDeResiduosSolidosDeLaCiudadDeMexico_2019.pdf.
- Kartam, N.; Al-Mutairi, N., Al-Ghusain, I. & Al-Humoud, J. (2004). Environmental management of construction and demolition waste in Kuwait. *Waste Management*, 24, 1049–59. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2004.06.003>.
- Li, H., Zhang, Y., Wu, L., Jin, Y., Gong, Y., Li, A. Li, J., & Li, F. (2021). Recycled aggregates from construction and demolition waste as wetland substrates for pollutant removal. *Journal of Cleaner Production*, 311, 127766. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127766>.
- Oyenuga, A. & Bhamidimarri, R. (2015). Sustainable Approach to Managing Construction and Demolition Waste: An Opportunity or a New Challenge? *International Journal of Innovative Science, Engineering and Technology*, 4, 11, 3297.
- Pacheco B, C. A., Pumarejo, F, L. G., Sánchez Cotte, É. H., & Rondón, Q. H. A. (2017). Residuos de construcción y demolición (RCD), una perspectiva de aprovechamiento para la ciudad de Barranquilla desde su modelo de gestión. *Ingeniería y Desarrollo*, 35(2), 533–555.
- Patil, D. P., Bhange, V. P., Shende, S. S. & Ghorpade, P. S. (2022). Greywater characterization of an Indian household and potential treatment for reuse. *Water-Energy Nexus*, 5, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.wen.2021.12.001>.
- Rahman, M.A., Imteaz, M. A., Arulrajah a., Piratheepan, J. & Disfani, M.M. (2015). Recycled Construction and Demolition Materials in Permeable Pavement Systems: Geotechnical and Hydraulic Characteristics. *Journal of Cleaner Production*, 90(1), 183–194. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.11.042>.

- Ramírez, J.D. (2018). Evaluación del vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) y la elefanta (*Pennisetum purpureum*) en la caracterización de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales domésticas. *Revista Científica en Ciencias Ambientales y Sostenibilidad* 4, 1-15.
- SEDEMA (2019). Norma ambiental para la Ciudad de México NACDMX-007-RNAT-2019. Clasificación y especificaciones de manejo integral para los residuos de la construcción y demolición de la Ciudad de México. Dra. Marina Robles García, Secretaria del Medio Ambiente de la Ciudad de México y Presidenta del Comité de Normalización Ambiental de la Ciudad de México. Gaceta oficial de la ciudad de México, 20 de julio de 2021. Recuperado de: http://data.sedema.cdmx.gob.mx/sitios/conadf/documentos/proyectos-normas/NACDMX_007_RNAT_2019.pdf
- SEDEMA (2021). Programa de Gestión Integral de los Residuos Sólidos para la Ciudad de México - PGIR 2021-2025. Coordinación de Proyectos de Manejo de Residuos. Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno de la Ciudad de México.
- SEMARNAT (2002). Estudio de análisis, evaluación y definición de estrategias de solución de la corriente de residuos generada por las actividades de construcción en México. Sistemas de Ingeniería y control ambiental. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México.
- SEMARNAT (2020). Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México.
- SEMARNAT (2022). Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Diario Oficial de la Federación, 11 de marzo. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México.
- UICN (2016). Estándar Global de Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN). Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza, Gland, Suiza.
- Winston, R.J, Dorsey, J.D., Hunt, W.F. (2016). Quantifying volume reduction and peak flow mitigation for three bioretention cells in clay soils in northeast Ohio. *Science of The Total Environment*, 553, (15), 83-95, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.02.081>.
- Yang, Y., Wang, Z. M., Liu C. & Guo, X. C. (2012). Enhanced P, N and C removal from domestic wastewater using constructed wetland employing construction solid waste (CSW) as main substrate. *Water Science and Technology*, 66, (5):1022-8, <https://doi.org/10.2166/wst.2012.277>.