

AGUAS GRISES: APORTES DE CEDEUS SOBRE TECNOLOGÍAS DE TRATAMIENTO, PERCEPCIÓN SOCIAL Y DESARROLLO DE NORMATIVAS EN CHILE

PARTE 1

AGUAS GRISES: APORTES DE CEDEUS SOBRE
TECNOLOGÍAS DE TRATAMIENTO, PERCEPCIÓN SOCIAL
Y DESARROLLO DE NORMATIVAS EN CHILE
PARTE 1

© Centro de Desarrollo
Urbano Sustentable
CEDEUS

Autores

Carlos Gallardo, Ignacio Vargas, Jorge Gironás, María
Molinos, Rodolfo Bertoli

Diseño

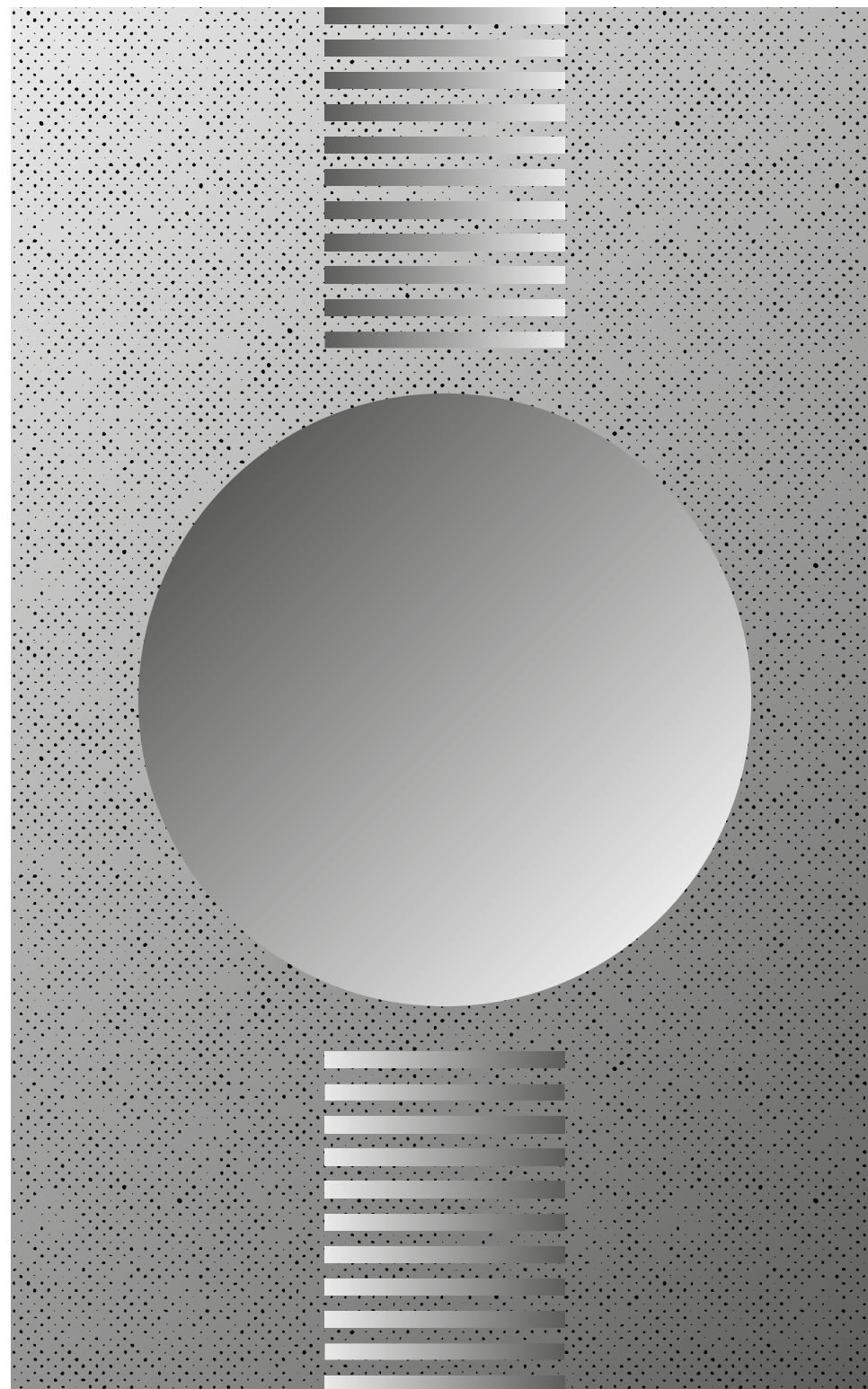
Nicolás Gutiérrez

Cómo citar este documento:

Gallardo, C., Vargas, I., Gironás, J., Molinos, M., Bertoli, R., (2024). *Aguas grises: aportes de CEDEUS sobre tecnologías de tratamiento, percepción social y desarrollo de normativas en Chile. Parte 1.* Síntesis de Investigación N°26. Centro de Desarrollo Urbano Sustentable, Santiago. <https://doi.org/10.7764/cedeus.si.26>



Atribución-NoComercial 4.0
Internacional (CC BY-NC 4.0)
Primera edición
Octubre 2024 / N°26



INTRODUCCIÓN

Como un recurso crítico para el desarrollo de comunidades y ciudades, el agua debe ser preservada y utilizada eficientemente. A nivel internacional, UNICEF¹ estima que aproximadamente cuatro mil millones de personas experimentan escasez severa de agua durante al menos un mes cada año. En el caso de Chile, desde la zona central hasta el extremo norte del país, donde vive el 65% de la población nacional, existe un déficit hídrico (Aitken *et al.*, 2016) y, por lo tanto, una posible propensión a condiciones de escasez. Gran parte de esta población (aproximadamente un 87% a escala nacional) vive en áreas urbanas, esperándose que esta tasa aumente a un 93% para el 2050 (MINVU, 2016; United Nations, 2019; Villamar *et al.*, 2018). Estos dos factores, escasez de recurso y crecimiento urbano, significan una fuerte presión sobre el agua en el futuro; por otra parte, se hace evidente lo primordial que es definir acciones orientadas a un uso más eficiente del agua en ambientes urbanos.

Actualmente en Chile el ciclo urbano del agua se basa principalmente en sistemas convencionales centralizados de suministro y tratamiento de agua. Uno de los principales desafíos para las ciudades chilenas es implementar el uso de fuentes alternativas de agua. Un ejemplo de lo anterior es el reúso de aguas grises² recuperadas a través de sistemas de tratamientos descentralizados energéticamente sustentables. Dado que las aguas grises corresponden aproximadamente a

un 60% de las aguas usadas en un hogar (Edwin *et al.*, 2014), su tratamiento y reúso seguro emergen como una oportunidad relevante para el desarrollo sustentable de las ciudades chilenas.

El Centro de Desarrollo Urbano Sustentable (CEDEUS) financiado por la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID) a través de su programa FONDAP, busca aportar, mediante investigaciones y proyectos interdisciplinarios vinculados al territorio, al desarrollo sustentable de las ciudades de nuestro país, siendo el recurso hídrico uno de los ejes críticos de estudio. Con esta misión, el presente documento sintetiza una serie de investigaciones realizadas por CEDEUS en el contexto de reutilización de aguas residuales urbanas, en relación con el desarrollo de tecnologías de tratamiento de aguas grises y la descentralización de alternativas para el reúso seguro de este recurso.

TECNOLOGÍAS DE TRATAMIENTO Y REÚSO DE AGUAS GRISES DOMICILIARIAS

Tecnologías para el tratamiento

Dependiendo del uso que se le quiera dar, los estándares de calidad que el agua gris tratada debe cumplir varían según las normas establecidas en diferentes países. Actualmente en Chile, se cuenta con la Ley N° 21.075, mientras que su reglamento, aún en tramitación, considera usos ornamentales, recreativos y urbanos, en orden creciente de exigencia de calidad. Los parámetros utilizados para medir la calidad del agua gris tratada en este reglamento son la demanda bioquímica de oxígeno al quinto día (DBO₅), los sólidos suspendidos totales (SST), los coloides fecales (CF), la turbiedad y el cloro libre residual. Mientras que los SST y los CFs son eliminados con tratamiento primario y desinfección respectivamente, la DBO₅ y la turbiedad, se encuentran asociadas a la materia orgánica disuelta presente en el agua gris, por lo que deben pasar por un tratamiento secundario (generalmente biológico). Considerando que los tratamientos biológicos convencionales tales como los lodos activados y la digestión anaeróbica utilizan una gran cantidad de espacio, son energéticamente intensivos y de compleja operación, en CEDEUS desde el año 2017 se estudian nuevas tecnologías escalables para el tratamiento de aguas grises, destinadas al uso residencial, de bajo consumo energético y de fácil operación. En particular, se ha estudiado la implementación de sistemas bioelectroquímicos (BES por sus siglas en inglés) como alternativa sustentable al tratamiento biológico de aguas grises, dadas sus capacidades de tratar la materia orgánica a la vez de recuperar electrones asociados a la energía química de los contaminantes. En

un BES, la reacción de oxidación de materia orgánica es catalizada mediante microorganismos electroquímicamente activos que respiran de un electrodo (ánodo), el cual se encuentra conectado a un segundo electrodo (cátodo) donde ocurre la reducción de un aceptor final de electrones (e.g., oxígeno disuelto). Los electrodos se conectan mediante un circuito externo, generando electricidad (Logan and Rabaey, 2012). A continuación, se exponen las investigaciones que CEDEUS ha desarrollado en torno a tecnologías para el tratamiento de aguas grises.

Humedales construidos acoplados a BES

Los humedales construidos (CW por sus siglas en inglés) son tecnologías de tratamiento basadas en la naturaleza, que aprovechan la interacción entre suelo, microorganismos y vegetación para ofrecer un tratamiento de agua biológico pasivo. Este tratamiento se produce gracias a los procesos de filtración, adsorción y la degradación aeróbica/anaeróbica generada por los microorganismos que habitan en los sistemas de humedales (Kadlec and Wallace, 2008). Dado el bajo costo de inversión y operación de esta tecnología, se ha considerado como una buena alternativa para tratamientos descentralizados donde exista la superficie apropiada para su implementación. El gradiente REDOX (zonas aeróbicas y anaeróbicas) generado en un humedal provee las condiciones ideales para su acoplamiento con un BES. De esta manera, en la zona anaeróbica (zona anódica), los microorganismos degradan la materia orgánica, traspasando los electrones recuperados a través de un circuito externo hacia la zona aeróbica donde se reduce el oxígeno presente (zona catódica). De esta manera, se produce el tratamiento del agua y se recupera energía eléctrica.

¹ <https://www.unicef.org/wash/water-scarcity>

² Aguas domésticas residuales provenientes de las tinas de baño, duchas, lavaderos, lavatorios, cocinas y otros, excluyendo las aguas negras (provenientes del excusado).

En el estudio de Araneda et al. (2018), sobre el mejoramiento en la remoción de materia orgánica de agua gris sintética en humedales construidos acoplados con un BES (CW-BES, por sus siglas en inglés) se implementaron cuatro columnas de humedales construidos de 10 L, utilizando zeolita como sustrato de la planta *Phragmites Australis*, gránulos de grafito como electrodos y gravilla como separador (Figura 1). Dos de estas columnas fueron utilizadas como controles, desconectando el circuito externo que conecta ambos electrodos (ánodo y cátodo).

Como principales resultados, se observó que no existen diferencias significativas entre la remoción de demanda química de oxígeno disuelta (DQOd) de un humedal construido sin acople de BES ($90 \pm 10\%$) y uno con acople de BES ($91,7 \pm 5,1\%$). Tampoco existe una diferencia significativa en la remoción de fosfato sin acople ($61,5 \pm 3,5$) y con acople ($56,3 \pm 4,4$), sin embargo, en la remoción de nitrato, los sistemas sin acople mostraron una mayor eficiencia de remoción ($99,5 \pm 1\%$), en comparación a los sistemas con acople ($86,5 \pm 7,1\%$). En términos de los SST, no se encontró diferencia significativa entre ambos tratamientos, alcanzando una remoción de $52,9 \pm 12,7\%$ en el sistema sin acople y una remoción de $78,4 \pm 5,5$ en el sistema con acople.

En términos de la corriente generada en los sistemas con acople, se reportaron potencias máximas de $33,52 \pm 7,87 \text{ mW/m}^3$ en la operación normal de las columnas, mientras que cuando el ánodo fue polarizado a un potencial de $-150 \text{ mV vs. Ag/AgCl}$, se reportó una potencia máxima de $719,57 \pm 67,67 \text{ mW/m}^3$. Dado este resultado, se sugiere que ese potencial de $-150 \text{ mV vs. Ag/AgCl}$ podría enriquecer el sistema con microorga-

nismos electroquímicamente activos que mejoren la recuperación de energía del sistema.

Así, los resultados demuestran experimentalmente que el acople de BES a los humedales construidos podría ser una tecnología sustentable que asegure el tratamiento de materia orgánica del agua gris, junto con una recuperación directa de energía química en electricidad para uso en dispositivos de bajo consumo. Esta prueba de concepto abre la posibilidad del desarrollo de tecnologías de reutilización híbridas que puedan integrarse en espacios naturales construidos y con bajos requerimientos energéticos. Todos estos son factores clave para el desarrollo de sistemas descentralizados de tratamiento y reúso de agua.

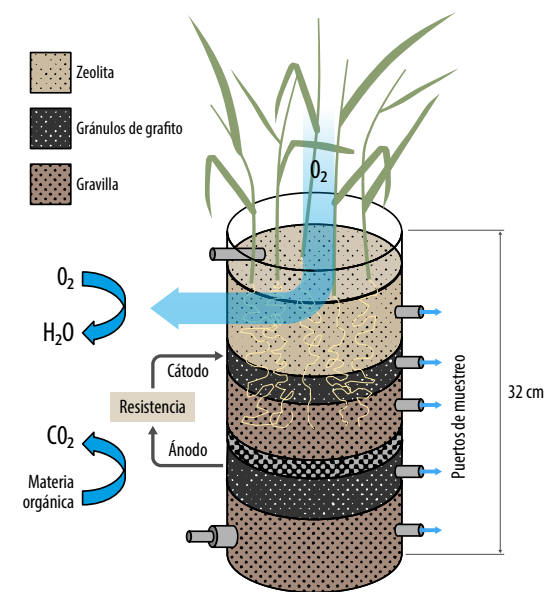


Figura 1: Humedales construidos acoplados a BES como alternativa al tratamiento descentralizado de aguas grises. Montaje experimental junto con esquematización de humedales construidos acoplados a BES (Araneda et al., 2018).

Cubiertas vegetales acopladas a BES

Las cubiertas vegetales están siendo cada vez más utilizadas debido a los múltiples beneficios que proporcionan, como la reducción de escorrentía, la mejora de la calidad del aire, el aislamiento térmico y acústico, y el aumento de la biodiversidad urbana (Nguyen et al., 2021). Además, estas cubiertas ofrecen un entorno adecuado para la eliminación de contaminantes presentes en el agua, gracias a la presencia de sustratos y plantas que actúan como medio de filtración y hábitat para el crecimiento de microorganismos (Figura 2a). Sin embargo, a pesar de los resultados prometedores reportados por estudios sobre la capacidad de los sustratos para eliminar contaminantes, se ha encontrado que la altura de la cubierta verde no puede superar los 20 cm sin afectar su eficiencia (Chowdhury and Abaya, 2018; Thomaidi et al., 2022).

En base a las propiedades de las cubiertas vegetales, y dentro del contexto de las nuevas tecnologías para el tratamiento, una posible alternativa para solucionar el problema de la eficiencia limitada de las cubiertas vegetales para el tratamiento de aguas grises, es la implementación de BES en el sustrato de estas. Incorporar un BES en las cubiertas vegetales, proporcionaría al medio un aceptor de electrones no natural, catalizando las reacciones de oxidación de materia orgánica y mejorando así la eficiencia del tratamiento de contaminantes. En este contexto, la implementación de un BES en una cubierta vegetal, permitiría que esta tuviera una nueva función como una tecnología sustentable y descentralizada para el tratamiento de aguas grises.

Como parte de la investigación doctoral en CEDEUS de Natalia Tapia, supervisada por el Dr. Ignacio Vargas, se

evaluó el tratamiento de agua gris sintética mediante la implementación de un BES tipo *soil microbial fuel cell* (soil-MFC) (Tapia, et al., 2024) en un sustrato utilizado en cubiertas vegetales como el ilustrado en la Figura 2a. Las soil-MFCs están compuestas de una mezcla de fibra de coco y perlita con una altura de 8 cm de profundidad. La Figura 2b presenta el montaje experimental de las soil-MFCs y un esquema de la composición del sustrato utilizado. En la primera parte de esta investigación, el sistema fue evaluado bajo tres configuraciones distintas: como circuito abierto (OCV, del inglés open circuit voltage), donde los electrodos fueron dejados sin conectar; como *microbial fuel cell* (MFC), donde los electrodos fueron conectados a una resistencia externa; y como *microbial electrolysis cell* (MEC) en donde el sistema fue conectado adicionalmente a una fuente de poder durante un periodo de tres meses. Este experimento fue realizado por un periodo de 400 días, durante el cual se tomaron muestras semanales del afluente de agua gris sintética y del efluente de cada reactor para evaluar el sistema de tratamiento. Los resultados obtenidos sugieren que el sistema permite la generación de un efluente con un nivel de materia orgánica que permitiría su reutilización para el riego de áreas verdes, ya que se obtienen valores a los cuatro meses de operación de la DQOd en el efluente de $53,67 \pm 3,06$ mg/L, $50 \pm 4,58$ mg/L, y $48,33 \pm 2,89$ mg/L para OCV, MFC y MEC respectivamente, lo que significa una remoción del 90% de la materia orgánica. Similarmente para los surfactantes (i.e., contaminantes asociados a productos de limpieza que reducen de la tensión superficial de un fluido, dañan membranas celulares y aumentan la hidrofobicidad en suelos), se obtienen remociones entre un 96-99% con valores inferiores a 2 mg/L en el efluente para las tres condiciones testeadas. Sin embargo, la turbidez alcanza valores de $22,58 \pm 9,81$

NTU (OCV), $27,68 \pm 9,19$ NTU (MFC) y $25,06 \pm 8,66$ NTU (MEC), los que superan los niveles recomendados según la normativa de aguas grises chilena.

Por otra parte, al comparar el sistema sin la soil-MFC se observó que la presencia del sistema bioelectroquímico permitiría un mejor desempeño en el tratamiento a largo plazo, ya que al final del periodo de evaluación el sistema sin MFC alcanza sólo un 65% de remoción de materia

orgánica, con valores de DQOd de $146,26 \pm 37,99$ mg/L comparado al sistema con MFC que mantiene un valor en torno al 83%, equivalente a $73,99 \pm 14,63$ mg/L en MFC y del 77% en MEC con $100,78 \pm 18,22$ mg/L DQOd.

Actualmente se encuentran en desarrollo experimentos para evaluar la capacidad de remoción de surfactantes en ausencia de otros compuestos orgánicos mediante BES.

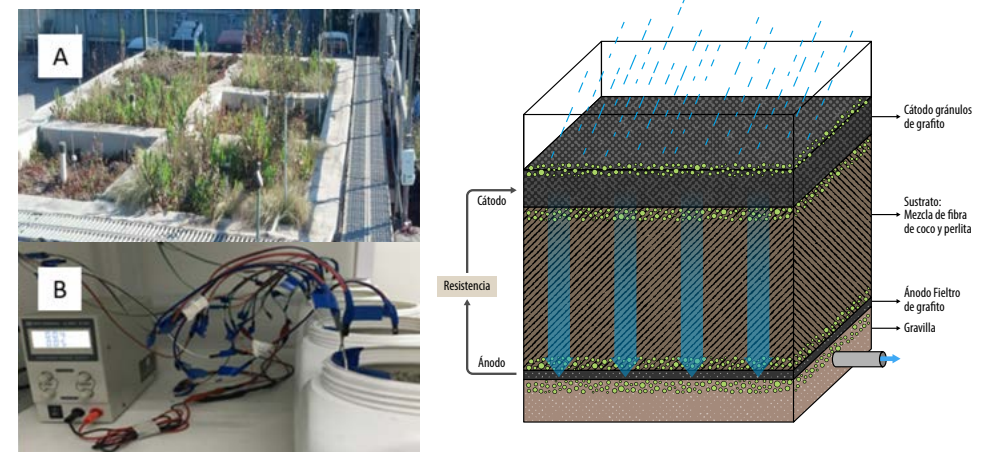


Figura 2: Cubiertas vegetales para el tratamiento de aguas. A) Techo verde del laboratorio LIVE UC (Tapia et al., 2017). B) Montaje experimental y esquema soil-MFC (Tapia, et al., 2024).

Biofiltros de carbón activado granular acoplados a BES

En la actualidad, los biofiltros de carbón activado se están empleando como una opción descentralizada y de bajo costo capital para tratar aguas grises, debido a su alta capacidad de adsorción (Çeçen and Aktaş, 2011; Khajvand et al., 2022). Sin embargo, desafíos operacionales como el consumo de energía por aireación, el biofouling (i.e., ensuciamiento de los sistemas ligado a la adhesión de microorganismos), o formación de bioincrustaciones asociado al crecimiento no deseado de exceso de biomasa y el costo de regenerar el carbón activado una vez saturado, limitan la sustentabilidad e implementación de estos biofiltros (Khajvand et al., 2022). Considerando las limitaciones en el escalamiento de los BES en relación con la cantidad de biomasa electroquímicamente activa, el uso de gránulos de carbón activado (GAC, del inglés *granular activated carbon*) como portador anódico presentaría ventajas para este fin, dada su alta área superficial y sus propiedades eléctricas (conductor y capacitivo) (Caizán-Juanarena et al., 2020). Al mismo tiempo, entregaría un tratamiento por adsorción robusto y un nuevo aceptor de electrones en áreas anaeróbicas, por lo que se disminuirían las tasas de aireación.

En el marco de la tesis de magíster CEDEUS de Carlos Gallardo (Gallardo-Bustos, 2023) supervisado por el Dr. Ignacio Vargas, se estudió el tratamiento de agua gris sintética y las ventajas operacionales con perspectivas hacia la descentralización de biofiltros de GAC acoplados a BES (Figura 3a). Para esto, se operó un biofiltro acoplado a BES (BF-B) con capacidad de tratamiento de 4 L y escalable, en duplicado (Figura 3b). Se comparó el rendimiento del BF-B con un biofiltro de GAC aireado equivalente (BF-A),

también en duplicado, midiendo el pH, la conductividad eléctrica, la turbidez y la DQOd de salida. Los reactores se operaron durante 503 días, midiendo la corriente generada por el BF-B y estudiando el desarrollo de biopelícula mediante microscopía electrónica de barrido y conteo celular con microscopía de epifluorescencia. Los BF-Bs y BF-As demostraron eficiencias de remoción de DQOd estadísticamente similares, superiores al 88%, con afluentes en el rango de 180 a 580 mg/L. Además, los BF-B presentaron niveles de turbiedad efluente estadísticamente similares a los de BF-As en un rango de $1,6 \pm 1,2$ a $4,1 \pm 1,2$ NTU. Los BF-Bs también tuvieron una mayor cantidad de microorganismos adheridos a los GAC en comparación con los BF-As. Al mismo tiempo, estos BF-Bs pudieron ser operados en periodos carga/descarga de electrones de los GAC (i.e., desconexión de la resistencia (carga de electrones) y reconexión de la resistencia (descarga de electrones)), aumentando un 16% su potencia máxima generada. Los BF-Bs fueron estables en la generación de corriente a pesar de no tener materia orgánica en el medio, sugiriendo que los microorganismos electroquímicamente activos adheridos a los GAC pueden aprovechar la materia orgánica adsorbida en los gránulos, obteniendo así una bio-regeneración sin costos adicionales.

En conclusión, el acoplamiento de un biofiltro de GAC con BES ofrece un tratamiento eficiente de aguas grises sintéticas con un consumo energético neto menor al de un biofiltro aireado convencional. Además, esta configuración permite operar de manera estable en el tiempo y resulta ser una opción sostenible para sistemas descentralizados dada la recuperación de energía directa, la señal eléctrica como monitoreo in-situ del sistema, y la disminución de costos gracias a la bio-regeneración.

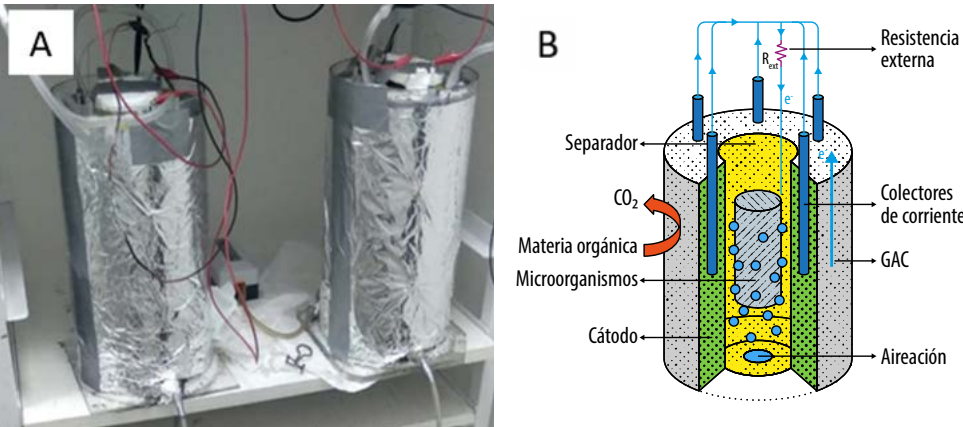


Figura 3: Biofiltros de GAC acoplados a BES para el tratamiento descentralizado de aguas grises. A) Montaje experimental biofiltros de GAC. B) Diseño escalable de biofiltro de GAC acoplado a BES.

Tabla 1: Parámetros de la calidad del agua requeridos por la normativa de aguas grises, y valores promedio de estos parámetros en efluentes de las tres tecnologías estudiadas a escala de laboratorio (Gallardo-Bustos et al., 2024).

Parámetro	Requerimientos establecidos por la normativa					Efluentes de las tecnologías		
	Usos urbanos	Riego superficial	Riego subsuperficial	Usos ornamentales	Usos silvoagropecuarios	CW-BES	soil-MFC	BF-B
DBO ₅ (mg/L)	10	30	50	70	70	82,8 ± 20,7*	50 ± 4,6*	5,5 ± 0,1*
SST (mg/L)	10	30	50	70	70	20,7 ± 5,3	-	-
Turbiedad (NTU)	5	10	-	30	-	29,5 ± 12,6	27,7 ± 9,2	1,6 ± 0,2

*Se reporta la DQOd como medida operacional de la ph_s.

En la Tabla 1 se comparan los requerimientos de calidad del agua gris tratada para su reutilización según el reglamento de la Ley N° 21.075, con los resultados de los efluentes de salida promedio en condiciones estables de operación de las tres tecnologías de tratamiento anteriormente presentadas: CW-BES (sección 2.2.1), soil-MFC (sección 2.2.2) y BF-B (sección 2.2.3), al momento de una operación estable.

Biofiltros Yaku como ejemplo de colaboración entre CEDEUS y la industria

Como parte del trabajo de investigación de CEDEUS, se ha colaborado con el emprendimiento de base científica y tecnológica Yaku SpA para el desarrollo de un sistema de biofiltración de aguas grises domiciliarias. Adaptando la tecnología de biofiltros de lecho móvil (MBBR, del inglés *moving bed biofilm reactor*), Yaku realizó experimentos de laboratorio y de terreno, en diferentes escalas usando agua gris sintética y agua gris real como afluente. También se testeó un piloto comercial conectado a una casa real, usando aguas provenientes de la lavadora, ducha y lavamanos del baño. El agua tratada se utilizó en el riego domiciliario (Figura 4).

Los experimentos de laboratorio con agua gris sintética para reactores de baja escala (0,25 L, 0,5 L y 1,0 L) mostraron, luego de 24 horas de tratamiento, una remoción de turbiedad y DQO elevada (98% y 95%, respectivamente) junto con concentraciones de nutrientes, pH y conductividad de efluente aceptables para riego. Estos resultados sirvieron para identificar la tasa de aireación óptima y el tiempo por ciclo óptimo para los reactores de mayor escala. Los experimentos en terreno con agua gris real y escalas mayores (20 L, 100 L y 1.000 L) mostraron reducciones en el nivel de turbiedad desde sobre 100 NTU a 30 NTU en 1 día de operación y hasta 5 NTU en 2 días de operación, valores permitidos por la norma chilena para riego ornamental y reúso interior, respectivamente. El piloto comercial mostró resultados similares, pudiendo bajar la turbiedad para reúso ornamental en 12 horas y para reúso interior en 1 y 3 días para agua gris de

la lavadora y agua gris de la ducha, respectivamente (Vargas et al., 2021).

Con estos resultados, se demostró que el biofiltro de 1 m³ desarrollado pudo cumplir con los requisitos de reutilización de agua en hogares convencionales y adicionalmente, ser utilizado tanto en áreas urbanas como rurales para descentralizar el tratamiento y así mejorar la gestión del agua. Así, esta experiencia constituye un ejemplo de cómo la investigación puede escalar desde el laboratorio hacia contextos reales, impactando en los territorios. Para tener éxito en este camino es clave una activa colaboración entre los sectores industriales, de innovación y emprendimiento y los centros científicos como CEDEUS.



Figura 4: Jardín regado con aguas grises tratadas por el biofiltro Yaku en una vivienda de la Región Metropolitana. El sistema de reutilización se encuentra enterrado bajo el jardín. Se observa el crecimiento de plantas luego de 3 meses de riego.

ALTERNATIVAS DE DESCENTRALIZACIÓN

La discusión sobre si el tratamiento de aguas grises urbanas debe ser centralizado o descentralizado ha sido materia de estudio reciente, existiendo varias aristas sobre los desafíos de ambos enfoques, así como consideraciones económicas, técnicas y sociales. Se han identificado ineficiencias económicas de los sistemas centralizados de tratamiento de aguas residuales basados en tratamientos convencionales, como por ejemplo los lodos activados, debido a la energía utilizada y la casi nula recuperación de recursos, como son los nutrientes, energía y la misma agua del agua residual (Guest et al., 2009). La investigadora de CEDEUS María Molinos estudió los aspectos económicos de la descentralización y la separación de efluentes considerando tres sistemas de tratamiento (Garrido-Baserba et al., 2018): (1) sistema centralizado, (2) sistema híbrido y (3) sistema descentralizado.

El sistema centralizado se basa en el tratamiento de agua servida en estaciones depuradoras de aguas residuales convencionales, típicamente alejadas del lugar de generación del agua servida, con tecnología de lodos activados. El sistema híbrido analizado considera el tratamiento centralizado de agua gris utilizando un tratamiento con filtro percolador, un tratamiento descentralizado de aguas negras mediante un sistema tipo *Up-flow anaerobic sludge blanket* (UASB), y la recuperación de nutrientes con dos opciones descentralizadas: remoción fisicoquímica por decapado-adsorción y tratamiento biológico por Oland/annamox. Por último, el sistema descentralizado considera el tratamiento íntegramente descentralizado de aguas grises con filtro percolador, del agua negra con UASB, y la remoción de nutrientes por

tratamiento biológico (Oland/annamox). Los sistemas híbrido y descentralizado consideran la utilización de inodoros de vacío para generar un ahorro de agua y permitir el tratamiento de aguas negras concentradas. Al mismo tiempo, el análisis económico consideró los beneficios generados por el ahorro de agua y la posible venta de nutrientes y biogás.

Para los tres sistemas, se reportó que los mayores costos están asociados al alcantarillado y al sistema de tuberías, tanto en lo referido a costos de capital (CAPEX) como de operación (OPEX), abarcando entre un 60 y 70% de los costos totales en cada sistema. La extensión de tuberías hacia instalaciones centralizadas es menos costosa que duplicar las tuberías en un sistema descentralizado, mientras que el sistema híbrido de extender y duplicar, representa la alternativa menos costo-efectiva. En términos del tratamiento, dada la complejidad del manejo de aguas negras en sistemas descentralizados, el costo de operación de las alternativas híbridas y descentralizadas aumenta con relación al sistema centralizado. Por otro lado, en relación al sistema completamente descentralizado, el costo del tratamiento de aguas grises aumenta en el sistema híbrido con tratamiento centralizado, principalmente por el aumento en la carga de contaminantes en el filtro percolador. Las siguientes tablas muestran el desglose de las contribuciones de los costos asociados a cada alternativa (sistema centralizado, sistema híbrido y sistema descentralizado), separando los costos asociados al tratamiento y a las tuberías.

Incluyendo los posibles beneficios asociados a la separación de tipos de agua servida, los sistemas descentralizados podrían ser un 5% más baratos que

el sistema centralizado de tratamiento con lodos activados. Mientras el sistema híbrido con remoción fisicoquímica recupera dos tipos de fertilizante (estruvita y sulfato de amonio) utilizando todo el biogás disponible del UASB en estos procesos, el sistema híbrido con tratamiento biológico y el sistema descentralizado, al poseer remoción de nutrientes por Oland/annamox, recupera una cantidad menor de estruvita sin utilizar todo el biogás disponible. En este último caso queda la opción de venta de este excedente. Considerando que esta recuperación de recursos (fertilizantes y biogás), únicamente representa entre un 3 y 5% de los posibles beneficios, es en el ahorro de agua donde realmente se reducen los costos en los sistemas descentralizados, al existir un precio del agua elevado (1.700 CLP/m³ en este estudio). Nótese que en un futuro donde se proyecta una mayor escasez de agua, este ahorro de agua podría implicar mayores beneficios.

En resumen, los sistemas completamente descentralizados podrían ser más costo-efectivos que los sistemas centralizados convencionales, si es que se considera la recuperación y revalorización de agua, nutrientes y biogás. Al mismo tiempo, se requeriría una inversión inicial elevada para la implementación de estos sistemas, principalmente en términos de la infraestructura necesaria en tuberías y alcantarillado. Los costos de operación de estos sistemas están asociados más a recursos humanos, ya que el manejo de aguas negras descentralizada requeriría un nivel experto por parte de los operadores para obtener el máximo provecho de la tecnología UASB y asegurar la salud pública disminuyendo los riesgos de los vectores contaminantes. Al mismo tiempo, el monitoreo del agua tratada también considera un costo de operación elevado. Por último,

otro factor relevante a tener presente es la “inercia tecnológica” que incentiva la utilización de tecnologías poco armonizadas con las escalas de la descentralización, por lo que nuevos avances tecnológicos con alta confiabilidad son necesarios para superar esta brecha.

A) Sistema centralizado

Costos de tratamiento	OPEX lodo activado	27,0%	
	Otros costos lodo activado	8,1%	
	Costo construcción lodo activado	5,7%	
	Columna del distrito	2,2%	
Costos de tuberías	Conexiones del vecindario	0,5%	
	Tuberías privadas	22,0%	
	Tuberías públicas	25,1%	
	Tuberías de distrito	3,2%	
	Tubería principal	1,3%	
	Estación de bombeo	2,1%	
	OPEX tuberías y bombeo	1,2%	

B) Sistema híbrido con remoción fisicoquímica

Costos de tratamiento	OPEX estruvita	4,6%	
	OPEX Oland	0,1%	
	OPEX UASB	6,3%	
	CAPEX Oland	0,2%	
	CAPEX estruvita	0,1%	
	Otros costos UASB	2,5%	
	Costos construcción UASB	7,8%	
	OPEX aguas grises	2,2%	
	Otros costos aguas grises	4,3%	
Costos de tuberías	Costos construcción aguas grises	4,3%	
	Columna del distrito	0,5%	
	Conexiones del vecindario	0,2%	
	Tuberías privadas	6,4%	
	Tuberías públicas	6,0%	
	Bombeo y conexiones	1,8%	
	OPEX aguas negras tuberías y bombeo	6,9%	
	Columna del distrito	1,7%	
	Conexiones del vecindario	0,4%	
	Tuberías privadas	17,3%	
	Tuberías públicas	19,6%	
	Tuberías del distrito	2,1%	
	Columna principal	0,9%	
	Estaciones de bombeo	1,2%	
	OPEX aguas grises tuberías y bombeo	2,0%	

C) Sistema híbrido con tratamiento biológico

Costos de tratamiento	OPEX estruvita	0,2%	
	OPEX Oland	3,5%	
	OPEX UASB	6,4%	
	CAPEX Oland	0,2%	
	CAPEX estruvita	0,1%	
	Otros costos UASB	2,5%	
	Costos construcción UASB	7,9%	
	OPEX aguas grises	2,2%	
	Otros costos aguas grises	4,4%	
	Costos construcción aguas grises	5,0%	
Costos de tuberías	Columna del distrito	0,5%	
	Conexiones del vecindario	0,1%	
	Tuberías privadas	6,5%	
	Tuberías públicas	6,0%	
	Bombeo y conexiones	1,7%	
	OPEX aguas negras tuberías y bombeo	6,9%	
	Columna del distrito	1,8%	
	Conexiones del vecindario	0,4%	
	Tuberías privadas	17,5%	
	Tuberías públicas	19,8%	
	Tuberías del distrito	2,1%	
	Columna principal	0,9%	
	Estaciones de bombeo	1,2%	
	OPEX aguas grises tuberías y bombeo	2,0%	

D) Sistema descentralizado

Costos de tratamiento	OPEX estruvita	0,2%	
	OPEX Oland	3,8%	
	OPEX UASB	6,8%	
	CAPEX Oland	0,2%	
	CAPEX estruvita	0,1%	
	Otros costos UASB	8,5%	
	Costos construcción UASB	2,7%	
	CAPEX aguas grises	4,6%	
	OPEX aguas grises	6,2%	
Costos de tuberías	Columna del distrito	0,6%	
	Conexiones del vecindario	0,2%	
	Tuberías privadas	7,0%	
	Tuberías públicas	6,5%	
	Bombeo	1,8%	
	OPEX aguas negras tuberías y bombeo	7,4%	
	Columna del distrito	1,9%	
	Conexiones del vecindario	0,4%	
	Tuberías privadas	18,8%	
	Tuberías públicas	21,3%	
	OPEX aguas grises tuberías y bombeo	1,2%	

Tablas A, B, C y D: Desglose de costos (CAPEX y OPEX) de los sistemas de tratamiento. A) Sistema centralizado. B) Sistema híbrido con remoción fisicoquímica. C) Sistema híbrido con tratamiento biológico. D) Sistema descentralizado. Modificado de Garrido-Baserba et al. (2018)

REFLEXIONES FINALES

El presente documento demuestra la efectividad de diferentes tecnologías bioelectroquímicas y biológicas en la remoción de contaminantes en aguas grises y cumplimiento de los requerimientos de la calidad del agua detallados por la normativa nacional. En adición, se presenta un análisis sobre distintas configuraciones para el tratamiento de aguas residuales domésticas, demostrando que los sistemas descentralizados podrían ser mejores en términos costo-efectivos que los tradicionales (i.e., plantas de tratamiento centralizadas).

Sin embargo, a pesar de los avances en el marco científico-tecnológico, un aspecto relevante tiene que ver con los diversos factores que involucran la aceptación pública del reúso y la existencia de un marco regulatorio que asegure la calidad y seguridad tanto para las personas como ecosistemas en contacto con las aguas tratadas. Estos aspectos se incluyen en la segunda parte de este documento titulado "Investigación en reúso de aguas grises: Aportes de CEDEUS sobre la percepción, aceptación social y desarrollo de normativas en Chile", en el que se resume el trabajo realizado por CEDEUS relacionado con la percepción pública sobre el reúso de aguas grises domiciliarias, así como también el aporte técnico sobre proyectos de normas en el área del reúso de aguas.

REFERENCIAS

- Aitken, D., Rivera, D., Godoy-Faúndez, A., & Holzapfel, E. (2016).** *Water scarcity and the impact of the mining and agricultural sectors in Chile.* Sustainability, 8(2), 128. <https://doi.org/10.3390/su8020128>
- Araneda, I., Tapia, N., Lizama Allende, K., Vargas, I., 2018.** *Constructed Wetland-Microbial Fuel Cells for Sustainable Greywater Treatment.* Water (Basel) 10, 940. <https://doi.org/10.3390/w10070940>
- Caizán-Juanarena, L., Sleutels, T., Borsje, C., & ter Heijne, A. (2020).** *Considerations for application of granular activated carbon as capacitive bioa-node in bioelectrochemical systems.* Renewable Energy, 157, 782–792. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.05.049>
- Çeçen, F., & Aktaş, Ö. (2011).** *Activated carbon for water and wastewater treatment.* Wiley. DOI:10.1002/9783527639441
- Chowdhury, R., & Abaya, J. S. (2018).** *An experimental study of greywater irrigated green roof systems in an arid climate.* Journal of Water Management Modeling. <https://doi.org/10.14796/JWMM.C437>
- Edwin, G. A., Gopalsamy, P., & Muthu, N. (2014).** *Characterization of domestic gray water from point source to determine the potential for urban residential reuse: a short review.* Applied Water Science, 4(1), 39–49. <https://doi.org/10.1007/s13201-013-0128-8>
- Gallardo-Bustos, C. (2023).** *Scalable microbial fuel cell coupled with granular activated carbon for decentralized greywater treatment.* [Tesis de Magister no publicada]. Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Gallardo-Bustos, C.; Tapia, N.; Vargas, I. T. (2024).** *Synthetic Greywater Treatment Using a Scalable Granular Activated Carbon Bioelectrochemical Reactor.* Bioelectrochemistry. <https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2024.108741>
- Garrido-Baserba, M., Vinardell, S., Molinos-Senante, M., Rosso, D., Poch, M., 2018.** *The Economics of Wastewater Treatment Decentralization: A Techno-economic Evaluation.* Environ Sci Technol 52, 8965–8976. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b01623>
- Guest, J. S., Skerlos, S. J., Barnard, J. L., Beck, M. B., Daigger, G. T., Hilger, H., Jackson, S. J., Karvazy, K., Kelly, L., Macpherson, L., Mihelcic, J. R., Pramanik, A., Raskin, L., Van Loosdrecht, M. C. M., Yeh, D., & Love, N. G. (2009).** *A new planning and design paradigm to achieve sustainable resource recovery from wastewater.* Environmental Science & Technology, 43(16), 6126–6130. <https://doi.org/10.1021/es9010515>
- Kadlec, R. H., & Wallace, S. (2008).** *Treatment wetlands.* CRC press. ISBN 9781566705264

Khajvand, M., Mostafazadeh, A.K., Drogui, P., Tyagi, R.D., 2022. *Management of greywater: environmental impact, treatment, resource recovery, water recycling, and decentralization.* Water Science and Technology 86, 909–937. <https://doi.org/10.2166/wst.2022.226>

Khajvand, M., Mostafazadeh, A. K., Drogui, P., Tyagi, R. D., & Brien, E. (2022). *Greywater characteristics, impacts, treatment, and reclamation using adsorption processes towards the circular economy.* Environmental Science and Pollution Research, 29(8), 10966–11003. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16480-z>

Logan, B. E., & Rabaey, K. (2012). *Conversion of wastes into bioelectricity and chemicals by using microbial electrochemical technologies.* Science, 337(6095), 686–690. <https://doi.org/10.1126/science.1217412>

Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU). 2016. *Chile Informe nacional HABITAT III.* Santiago.

Nguyen, C. N., Muttil, N., Tariq, M. A. U. R., & Ng, A. W. M. (2021). *Quantifying the benefits and ecosystem services provided by green roofs—A Review.* Water, 14(1), 68. <https://doi.org/10.3390/w14010068>

Tapia, N., Gallardo-Bustos, C., Rojas, C., Vargas, I. (2024). *Long-term evaluation of soil-based bioelectrochemical green roof systems for greywater treatment.* Journal of Environmental Management, Volume 370, 2024, 122643. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122643>

Thomaidi, V., Petousi, I., Kotsia, D., Kalogerakis, N., & Fountoulakis, M. S. (2022). *Use of green roofs for greywater treatment: Role of substrate, depth, plants, and recirculation.* Science of The Total Environment, 807, 151004. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151004>

United Nations (2019). *World urbanization prospects: the 2018 revision.* Disponible en: <https://population.un.org/wup/publications/Files/WUP2018-Report.pdf>

Vargas, I., Veloso, V., Cárdenas, C., Serrano, A., Silva, M. (2021). *Fighting the water crisis with biotechnology: Greywater biofiltration for more resilient and sustainable cities.* Conferencia Internacional Ciudades Resilientes Desde el Sur Global. Santiago, Chile, 30 de noviembre – 2 de diciembre de 2021.

Villamar, C.-A., Vera-Puerto, I., Rivera, D., & De la Hoz, F. (2018). *Reuse and recycling of livestock and municipal wastewater in Chilean agriculture: A preliminary assessment.* Water, 10(6), 817. <https://doi.org/10.3390/w10060817>



SÍNTESIS DE INVESTIGACIÓN