



CRHIAM

CENTRO DE RECURSOS HÍDRICOS PARA LA AGRICULTURA Y LA MINERÍA

ANID/FONDAP/15130015

ANID/FONDAP/1523A0001

LOS VERMIFILTROS, ¿SON UNA ALTERNATIVA PARA EL TRATAMIENTO NO CONVENCIONAL DE LAS AGUAS RESIDUALES?

Amanda Barrientos / Emilio Quezada / Víctor Gutiérrez / Gloria Gómez / Gladys Vidal



Universidad de Concepción

SERIE COMUNICACIONAL CRHIAM

Versión impresa ISSN 0718-6460

Versión en línea ISSN 0719-3009

Directora:

Gladys Vidal Sáez

Comité editorial:

Sujey Hormazábal Méndez

María Belén Bascur Ruiz

Serie:

Los vermifiltros, ¿son una alternativa para el tratamiento no convencional de las aguas residuales?

Amanda Barrientos, Emilio Quezada, Víctor Gutiérrez,

Gloria Gómez y Gladys Vidal.

Junio 2024.

Agradecimientos:

Centro de Recursos Hídricos
para la Agricultura y la Minería
(CRHIAM)

ANID/FONDAP/15130015

ANID/FONDAP/1523A0001

Victoria 1295, Barrio Universitario,

Concepción, Chile

Teléfono +56-41-2661570

www.crhiam.cl



Universidad de Concepción

LOS VERMIFILTROS, ¿SON UNA ALTERNATIVA PARA EL TRATAMIENTO NO CONVENCIONAL DE LAS AGUAS RESIDUALES?

Amanda Barrientos / Emilio Quezada / Víctor Gutiérrez / Gloria Gómez / Gladys Vidal



SERIE COMUNICACIONAL CRHIAM

PRESENTACIÓN

El Centro de Recursos Hídricos para la Agricultura y la Minería -Centro Fondap CRHIAM- está trabajando en el tema de "Seguridad Hídrica", entendida como la "capacidad de una población para resguardar el acceso sostenible a cantidades adecuadas de agua de calidad aceptable para el sustento, bienestar y desarrollo socioeconómico sostenibles; para asegurar la protección contra la contaminación transmitida por el agua y los desastres relacionados con ella, y para preservar los ecosistemas, en un clima de paz y estabilidad política" (ONU-Agua, 2013).

La "Serie Comunicacional CRHIAM" tiene como objetivo potenciar temas desde una mirada interdisciplinaria, con la finalidad de difundirlos a los tomadores de decisiones públicos, privados y a la comunidad general. Estos textos surgen como un espacio de colaboración colectiva entre diversos investigadores ligados al CRHIAM como un medio para informar y transmitir las evidencias de la investigación relacionada a la gestión del recurso hídrico.

Con palabras sencillas, esta serie busca ser un relato entendible por todos y todas, en el que se exponen los estudios, conocimiento y experiencias más recientes para aportar a la seguridad hídrica de los ecosistemas, comunidades y sectores productivos. Agradecemos el esfuerzo realizado por nuestras y nuestros investigadores, quienes han trabajado de forma mancomunada y han puesto al servicio de la comunidad sus investigaciones para aportar de forma activa en la búsqueda de soluciones para contribuir a la generación de una política hídrica acorde a las necesidades del país.

Dra. Gladys Vidal
Directora de CRHIAM

Los vermifiltros,
¿son una alternativa para el tratamiento no convencional de las aguas residuales?

DATOS DE INVESTIGADORES



Amanda Barrientos

Licenciada en Ciencias de la Ingeniería,
Universidad de Santiago de Chile.



Emilio Quezada

Ingeniero Ambiental.
Grupo de Ingeniería y Biotecnología Ambiental
(GIBA-UdeC),
Facultad de Ciencias Ambientales,
Universidad de Concepción.



Victor Gutiérrez

Biólogo Ambiental.
Universidad de Chile.
Magíster en Ciencias Biológicas, Universidad de Chile.
Grupo de Ingeniería y Biotecnología Ambiental
(GIBA-UdeC), Facultad de Ciencias Ambientales,
Universidad de Concepción.



Gloria Gómez

Bioingeniera.
Grupo de Ingeniería y Biotecnología Ambiental
(GIBA-UdeC),
Facultad de Ciencias Ambientales,
Universidad de Concepción.
Colaboradora CRHIAM.



Gladys Vidal

Doctora en Ciencias Químicas.
Programa en Biotecnología Ambiental,
Universidad Santiago de Compostela, España.
Profesora Titular Facultad de Ciencias Ambientales,
Universidad de Concepción.
Directora CRHIAM.

RESUMEN

Actualmente en Chile, existe una parte importante de las zonas rurales que no posee cobertura sanitaria para el tratamiento de sus aguas servidas domésticas. La carencia de este servicio amenaza la salud de las personas y la integridad del medio ambiente, haciendo necesaria la búsqueda de soluciones para descontaminar estas aguas servidas de manera eficiente y a un costo accesible para las comunidades descentralizadas.

Por otro lado, múltiples industrias en Chile generan efluentes con altas cargas de materia orgánica, como la industria alimenticia, la agricultura, la industria láctea, etc. Esto fomenta la innovación de tecnologías que sean capaces de tratar estos efluentes con un bajo impacto ambiental.

Debido a todo lo antes indicado, existen tecnologías no convencionales para tratar aguas residuales llamadas vermifiltros. Dichos sistemas se enfocan en la eliminación de materia orgánica y nutrientes, instalados a lo largo de Chile y concentrados en la zona centro. Sin embargo, a pesar de su extendida aplicación, el estudio de la tecnología aún es acotado, generando la necesidad de seguir realizando investigaciones para determinar el desempeño y el impacto que tienen estos sistemas en su entorno.



INTRODUCCIÓN

Durante las últimas décadas, a raíz del cambio climático, el aumento de la población humana y la industrialización de los procesos productivos, los recursos hídricos se han visto seriamente amenazados. Factores como la demanda del agua, la generación de desechos desde las ciudades y las actividades antropogénicas, han comprometido la calidad de los recursos hídricos (Garg *et al.*, 2021).

Dichos contaminantes ingresan a cuerpos de agua mediante varias rutas de transporte y en distintos estados, ya sea mediante residuos sólidos, emisiones atmosféricas o efluentes de aguas residuales, variando en su composición y en su peligrosidad (Galindo *et al.*, 2019).

Para prevenir la contaminación, surgen distintas soluciones para tratar desechos de procesos industriales y domésticos. Para el caso de las aguas residuales se emplean diferentes tecnologías, y su selección depende del contexto de su implementación (Noyola *et al.*, 2013).

En cada escenario se debe utilizar una tecnología de tratamiento acorde a la composición del agua para asegurar que cumpla con las características requeridas para ser reutilizadas en otra actividad o descargarse como un efluente tratado a un cuerpo receptor, sin comprometer su calidad (Vidal *et al.*, 2021). Bajo esta línea existen distintas fases de tratamiento que van desde la eliminación de compuestos más simples hasta compuestos más complejos y persistentes, para los que se han empleado una amplia variedad de tecnologías.

Para un tratamiento de aguas residuales de manera sostenible se ha impulsado el desarrollo de tecnologías verdes como las Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN), las cuales se caracterizan por utilizar procesos naturales en la resolución de desafíos socioambientales, generalmente con menor costo que las tecnologías convencionales (UICN, 2024).

En localidades rurales, uno de los desafíos socioambientales más latentes es el tratamiento de aguas servidas. Se estima que la cobertura urbana en Chile alcanza un 99%, sin embargo, en el sector rural solo alcanza un 17%, relacionando esta cifra a la escasez de población y recursos económicos, los cuales son factores que acentúan con mayor fuerza el aislamiento de estos sectores (Banco Mundial, 2021).

En zonas rurales se han implementado muchos sistemas considerados SbN para tratar las aguas servidas. Entre estos destacan los humedales construidos, los biofiltros y los vermifiltros.

Los vermifiltros son tecnologías que se basan en los ciclos de nutrientes y procesos de metabolización de materia orgánica para poder descontaminar las aguas servidas (Cross *et al.*, 2021). Estos sistemas biológicos utilizan la retención de contaminantes y la sinergia entre lombrices y bacterias para depurar las aguas servidas alimentadas. El sistema considera bajos costos para su implementación, con un costo de operación anual 42% más bajo que el costo anual de sistemas convencionales como las plantas de lodos activados. La tecnología de lodos activados está totalmente consolidada e instalada en todas las plantas de tratamiento de las ciudades de Chile, destinada a eliminar materia orgánica. Además, su manejo es relativamente simple, permitiendo su emplazamiento en zonas rurales (SUBDERE, 2019).

El uso del vermifiltro se destaca principalmente en países como China e India, además de localidades rurales de Chile. Sin embargo, existen detalles que cuestionan la implementación de esta tecnología en relación con el monitoreo de variables de proceso y a las emisiones de gases de efecto invernadero emitidas constantemente por sistema, impulsando la necesidad de seguir investigando el potencial y los alcances del vermifiltro, para de esta forma dar soluciones efectivas con el menor impacto ambiental posible (Gutiérrez *et al.*, 2023).

¿QUÉ ES UN VERMIFILTRO?

El vermifiltro, también conocido como lombrifiltro, biofiltro dinámico o Sistema Tohá, es un sistema de tratamiento biológico de aguas residuales que utiliza la simbiosis de bacterias y lombrices. Las lombrices favorecen la oxigenación permanente del medio filtrante debido a la generación de túneles que realizan, y con ello se promueve el crecimiento de bacterias aeróbicas (Gutiérrez *et al.*, 2023). En la Figura 1 se ven los principales componentes del sistema, destacando el ingreso vertical del agua por aspersión y un medio filtrante con una comunidad de lombrices instalado sobre un medio de soporte.

Los vermifiltros, ¿son una alternativa para el tratamiento no convencional de las aguas residuales?

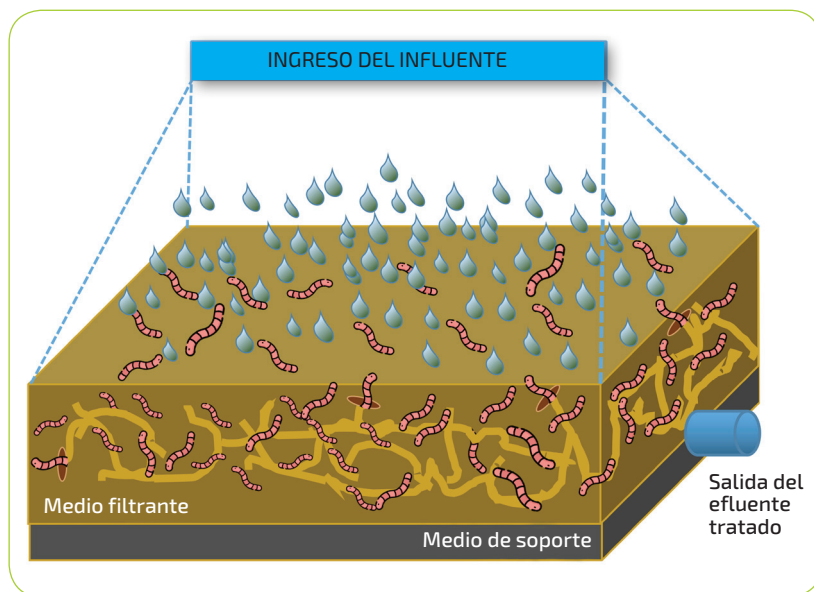


Figura 1.

Esquema general del vermifiltro. Fuente: elaboración propia.

Estos reactores corresponden a una extensión de terreno considerable contemplando un área unitaria de $0,75 \text{ m}^2/\text{habitante}$ (Vidal *et al.*, 2014), en el cual se establece una base o medio de soporte conformado usualmente de piedras como la grava. Posteriormente, por sobre el medio de soporte, se rellena un volumen determinado con una o varias capas de materiales para conformar un medio filtrante de diversas características que permiten retener los contaminantes de las aguas residuales, siendo las aguas servidas los residuos líquidos más comunes alimentados a los vermifiltros.

La altura del medio filtrante tiende a ser cercana a 1 metro, y entre los materiales más utilizados para su diseño están el compost, chips de madera, carbón, arena, viruta etc. Entre los materiales que destacan, se encuentra la viruta y los chip de madera, ya que con su implementación se han obtenido eficiencias de eliminación de materia orgánica medida en Demanda Química de Oxígeno (DQO) por sobre el 80% en el tratamiento de aguas servidas, mientras que, por ejemplo, utilizando arena de ceramita solo se alcanza un 70% (Gutiérrez *et al.*, 2023).

El medio filtrante también sirve de soporte estructural para el crecimiento de microorganismos que provienen de las mismas aguas residuales ya que, a medida que estas ingresan al sistema, van adhiriendo múltiples bacterias en sitios activos del medio filtrante, adquiriendo beneficios. En este medio, las bacterias disponen de alimento gracias a los azúcares, proteínas y nutrientes que componen la materia orgánica de las aguas residuales que alimentan al vermifiltro. Por otro lado, las bacterias encuentran en el medio filtrante un soporte estructural, el cual les permite reproducirse y desarrollar una capa biológica conocida como biopelícula, la cual juega un papel clave en la metabolización y degradación de los distintos contaminantes que ingresan al sistema (Huang *et al.*, 2014). A su vez, este medio filtrante se encuentra habitado por una población de lombrices cuyo rendimiento varía según su especie.

El desempeño de distintas especies de lombrices en un vermifiltro ha sido estudiado en los últimos años, sin embargo, la lombriz roja californiana de nombre científico *Eisenia foetida*, ha demostrado ser la especie con mejor capacidad de adaptación en el sistema. La población óptima de lombrices se encuentra entre 4.500-9.000 lombrices/m³, representando la cantidad de lombrices por unidad de volumen del sistema o densidad de lombrices. Respecto a este parámetro de diseño, una densidad de lombrices mayor a 40.000 lombrices/m³ puede afectar negativamente el vermifiltro por alteraciones en la permeabilidad del sistema (Gutiérrez *et al.*, 2023).

La función de las lombrices en el vermifiltro es asistir en la degradación del material sólido orgánico que ingresa al sistema mediante la ingestión, digestión y excreción de estos contaminantes. Gracias a su microbiota intestinal, las lombrices metabolizan materia orgánica y nutrientes, generando un consorcio entre las bacterias del medio filtrante y las del intestino de la lombriz, para ir depurando en conjunto las aguas residuales. Sin embargo, debido a que las lombrices generan excretas ricas en compuestos fosfatados, se han reportado aumentos considerables de hasta 350% del fósforo total en efluentes tratados con vermifiltros (Kumar *et al.*, 2014).

Por otro lado, mediante la excavación y surcos que generan las lombrices por su desplazamiento en el medio filtrante, son capaces de infiltrar oxígeno al sistema, lo que favorece a las comunidades de microorganismos aeróbicos al fomentar su crecimiento y, por ende, se interpreta que las lombrices optimizan el proceso de degradación aeróbica de los contaminantes en un vermifiltro (Yang *et al.*, 2017).

RENDIMIENTO DE LOS VERMIFILTROS

El vermifiltro posee múltiples parámetros los cuales deben ser monitoreados periódicamente para asegurar un funcionamiento adecuado. Entre estos parámetros se destaca el pH y la temperatura, los cuales deben encontrarse en rangos de 6 a 8 y 15 a 28°C. El control de estos parámetros es para asegurar un ambiente óptimo para los microorganismos que realizan el tratamiento y para favorecer las condiciones ambientales en la que se desarrollan las lombrices. En caso de que los valores de pH y temperatura escapen de los rangos mencionados es probable que ocurra una desestabilización del sistema que afecte negativamente su rendimiento (Arora *et al.*, 2016).

Respecto a la cantidad de aguas residuales alimentadas al sistema, se sugieren cargas hidráulicas que van desde los 0,3 a 3 m³ de aguas servidas por m² de vermifiltro construido por día de operación. Esto significa, que estos sistemas pueden operar elevadas cargas de alimentación de aguas servidas, y el consorcio de lombrices y bacterias pueden garantizar una operación óptima (Gutiérrez *et al.*, 2023).

Otras consideraciones respecto al influente se relacionan al cómo ingresan las aguas residuales al sistema. Es necesario que estas no posean sólidos gruesos, ya que interfieren con el paso del agua a través del vermifiltro. Además, es recomendable que la alimentación se genere mediante aspersión o goteo, ya que de esta manera se permite que las aguas residuales caigan de manera uniforme en la mayor extensión de superficie posible del sistema, aprovechando al máximo los sitios activos del vermifiltro.

En la Tabla 1 se muestra la eficiencia de eliminación de materias orgánicas y nutrientes obtenidos en los vermifiltros, destacando el desempeño del sistema, según el porcentaje de eliminación de materia orgánica medido en demanda química de oxígeno y la eliminación del nitrógeno reducido en el agua servida. También se observa que, en el caso del fósforo total, puede aumentar su concentración al final del tratamiento. La depuración de materia orgánica y nutrientes es vital para disminuir los procesos de eutroficación en los ecosistemas donde se descargan los vertidos depurados.

Tabla 1.
Rangos de eficiencia de eliminación de distintos contaminantes en aguas residuales tratadas con vermifiltros.

PARÁMETROS		EFICIENCIA DE ELIMINACIÓN (%)
Materia orgánica	DQO	76-89
	SST	65-96
	NT	50-79
Nutrientes	N-NH ₄ ⁺	61-96
	PT	Incremento de 350 - Eliminación de 87 (*)

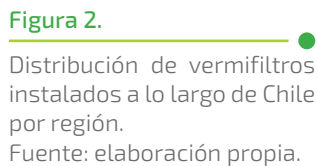
DQO: Demanda Química de Oxígeno; SST: Sólidos Suspendedos Totales; NT: Nitrógeno total; N-NH₄⁺: Nitrógeno del amonio; PT: Fósforo Total; (*): Gracias a la presencia de la lombriz, los resultados en cuanto al monitoreo del fósforo total muestran un amplio rango demostrando que este nutriente posee un comportamiento inestable en el sistema. Fuente: adaptado de Gutiérrez *et al.*, (2023) y Kumar *et al.*, (2014).

VERMIFILTROS EN CHILE

Los vermifiltros fueron introducidos en Chile como el Sistema Tohá gracias a su desarrollador el Dr. José Tohá Castella, en el laboratorio de Biofísica de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile. Esta tecnología se encuentra patentada por la Fundación para la Transferencia Tecnológica, UNTEC (Patente N° 40.754) desde mediados de década en los 90'.

Un hito importante de esta tecnología en el país fue la construcción de la primera planta de tratamiento en base a un vermifiltro instalada en la ciudad de Melipilla en el año 1994, la cual atendió a una población de 1.000 personas. En la actualidad estos sistemas se encuentran funcionando en Chile y además en países como Argentina, Bolivia, Ecuador, India, entre otros (Sistema Tohá, 2024).

Los vermifiltros se encuentran instalados a lo largo de todo el territorio nacional. La Figura 2 muestra la densidad de operación de vermifiltros por zonas del país. La mayor densificación de esta tecnología está en la macrozona centro, específicamente la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, con 46 vermifiltros instalados. Lo anterior puede relacionarse a las características productivas y demográficas de la región, ya que se trata de una zona de usos de suelo mayormente forestal y agrícola con un 25,6% de ruralidad de la población.



13

de aplicación industrial la Región Metropolitana, del Libertador General Bernardo O'Higgins y Valparaíso con 8, 5 y 4 en cada región, respectivamente. Desde la región de Arica hasta Coquimbo están instalados solamente vermifiltros para tratamiento de aguas servidas; mientras que la región de Aysén es la única región que posee solo vermifiltros industriales.

En la Región del Biobío están operando 12 vermifiltros, representando cerca del 7% de los vermifiltros instalados en Chile. De estos, 11 son para el tratamiento de aguas servidas en zonas rurales y uno está destinado al uso industrial.

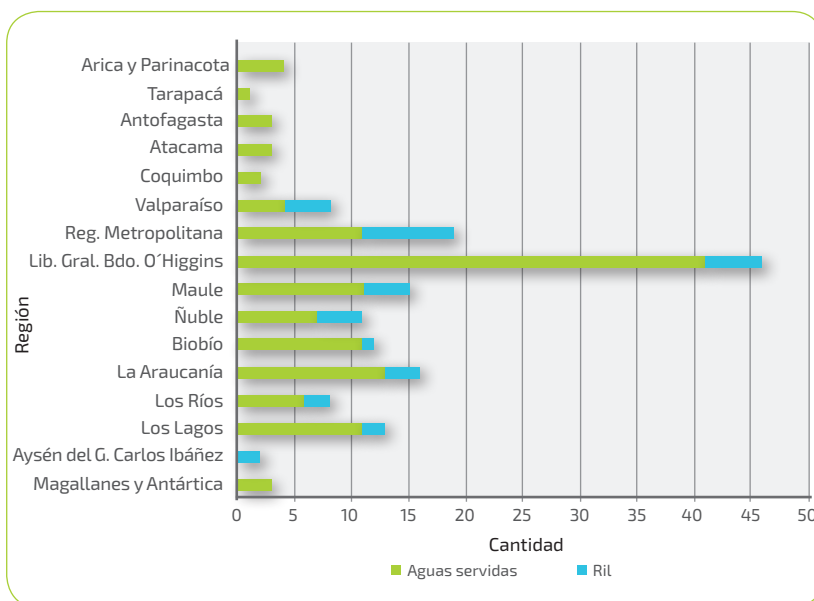


Figura 3.

Comparación entre el uso doméstico e industrial del vermifiltro por región.
Fuente: elaboración propia.

Respecto al uso industrial del vermifiltro, este se emplea en distintos rubros que generan efluentes de aguas residuales con alta materia orgánica, usualmente en rangos de 0,2-0,4 kg DQO/m²d, debido a que el consorcio bacterias- lombrices tienen la capacidad de metabolizar la materia orgánica contenida en dichos vertidos.

En la Figura 4 se ve la distribución de los distintos rubros industriales en los que se emplea el vermifiltro en cada región, destacando la industria alimenticia, la cual está presente de forma importante en cinco regiones. Por su parte, la Región Metropolitana es la que posee mayor diversidad en materia de rubros industriales donde se emplea el vermifiltro, siendo estos el rubro agrícola, alimenticio, lácteo, avícola y cervecero.

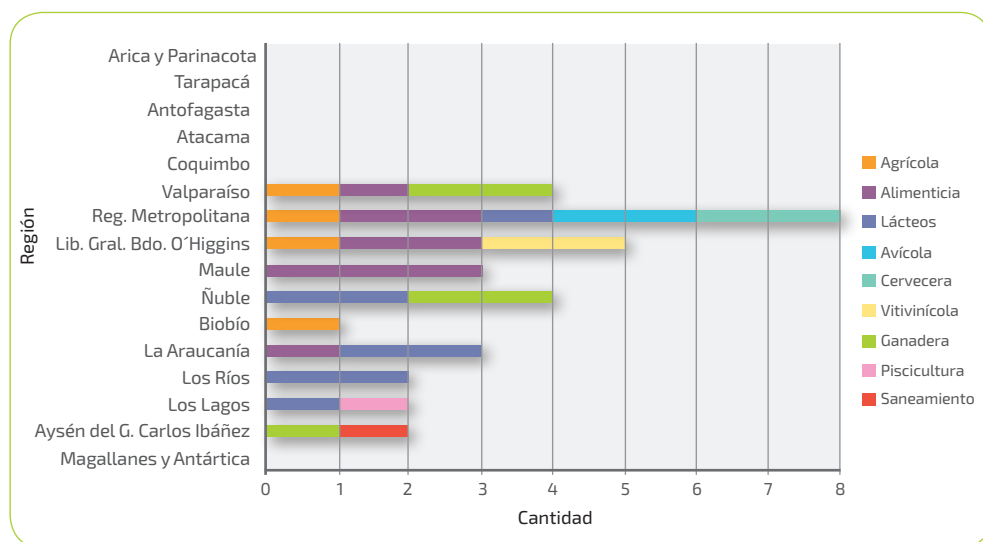


Figura 4.

Comparación entre los distintos rubros industriales que tiene el vermifiltro por región. Fuente: elaboración propia.

La Figura 5 muestra un ejemplo de un vermifiltro en plena operación con aguas servidas. En general, estos sistemas se manejan techados para evitar las mezclas de aguas lluvias con las aguas servidas. Previo al ingreso de las aguas servidas, estas son tratadas para retirar los sólidos y luego las aguas servidas son aplicadas a través de múltiples aspersores como lo muestra la Figura 5b, a través del medio filtrante donde están habitando las lombrices (generalmente la especie *Eisenia foetida*) trabajando en forma conjunta con las bacterias para producir la depuración de las aguas servidas.



Figura 5.

Vermifiltro a escala real: a) exterior de la planta y b) ambiente interior del vermifiltro con sus sistemas de aspersión. Planta de tratamiento de aguas servidas de la localidad de Copiulemu, Región del Biobío.
Fuente: cortesía V. Gutiérrez.

Una solución basada en la naturaleza como el vermifiltro puede ser la respuesta a la gestión de aguas servidas de localidades rurales, sin embargo, para lograr este objetivo es necesario tener una amplia visión en términos de factibilidad ambiental y técnica.

Si bien la tecnología ha demostrado tener éxito en la eliminación de materia orgánica y algunos nutrientes, se debe contar con una serie de recursos adicionales para garantizar un correcto funcionamiento del sistema, ya que el vermifiltro atiende solo una parte del tratamiento de aguas residuales, y se requiere considerar infraestructura y tratamientos adicionales orientados al descarte de sólidos y desinfección, tareas para las cuales el vermifiltro no está diseñado.

Recomendaciones sobre este apartado serían la elaboración de un estudio de factibilidad del sistema junto con un plan de gestión, orientado a la disposición segura del material residual del soporte del vermifiltro; la vida útil del medio de soporte es de 4 años aproximadamente (Gutierrez *et al.*, 2023).

Por otra parte, es importante atender que la simbiosis de las lombrices y las bacterias producen medios oxigenados. De hecho, ya existen estudios que demuestran no solo la producción de dióxido de carbono (CO_2), como producto de la degradación de la materia orgánica, sino que también de metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O), los cuales forman parte del proceso de degradación (Borken *et al.*, 2020). La aparición de estas emisiones es relevante, ya que el impacto de 1 kilogramo de CH_4 o N_2O sobre el calentamiento de la atmósfera es 25 o 300 veces más grande, que 1 kilogramo de dióxido de carbono en un período de 100 años (período de decaimiento de CO_2 en la atmósfera) (IPCC, 2007).

Existen estudios que muestran que cuando los vermifiltros poseen mayor carga orgánica y menores concentraciones de oxígeno en el lecho, habrá mayor probabilidad de producción de CH_4 y/o de N_2O . Particularmente, en los efluentes que provienen de industrias de elevada carga orgánica y de nutrientes (es decir, efluentes que provienen de productos lácteos y purines de cerdo, entre otros), se ha observado con mayor frecuencia las emisiones de CO_2 , CH_4 y N_2O como producto de la depuración del vertido, bajo el tratamiento de un vermifiltro (Luth *et al.*, 2011, Lai *et al.*, 2018). Preliminarmente, Lubbers *et al.* (2013) y Janzen (2006) han observado que la presencia de lombrices de tierra presentes en vermifiltros para la depuración de aguas servidas o efluentes industriales podrían aumentar las emisiones de CO_2 y CH_4 en un 33% y un 42%.

CONCLUSIONES

En las zonas rurales de Chile existe una brecha considerable en el tratamiento de aguas servidas. Tecnologías no convencionales como los vermifiltros, ofrecen oportunidades para su instalación y operación. Estos sistemas son de fácil operación y muy estables, generando ventajas para la descontaminación en zonas que no poseen tecnologías más avanzadas. Actualmente la evaluación económica para construir plantas de tratamiento de aguas servidas en zonas rurales considera solo el material involucrado y los costos de operación, dejando fuera los costos involucrados relativos al impacto ambiental, ya sea al agua, suelo o emisiones de gases de efecto invernadero producidas. Debido a esto, la construcción de estos sistemas está al alza en zonas rurales, pues los costos lineales de materiales y de operación son bajos.

Es importante avanzar, por un lado, en la investigación de estos sistemas en cuanto a emisiones de gases de efecto invernadero y evaluar el impacto del recambio de medio filtrante, que se realiza cada cierto tiempo. Por otra parte, y debido al efecto de gases efectos invernadero, es importante que las autoridades relacionadas con las obras públicas puedan analizar con mayor atención los permisos para la construcción y operación de estos sistemas en las zonas rurales, para la depuración de aguas servidas o para el tratamiento de efluentes de elevada carga de materia orgánica y/o nitrógeno.



REFERENCIAS

- Arora, S., Rajpal, A., Bhargava, R., Pruthi, V., Bhatia, A., Kazmi, A.A. 2014. Antibacterial and enzymatic activity of microbial community during wastewater treatment by pilot scale vermifiltration system. *Bioresource Technology*, 166, 132-141.
- Arora, S., Rajpal, A., Kazmi, A.A. 2016. Antimicrobial activity of bacterial community for removal of pathogens during vermifiltration. *Journal of Environmental Engineering*, 142 (5), 1- 10.
- Banco Mundial. 2021. Chile rural brief. World Bank Documents. Disponible en: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/193131621327775848/pdf/Chile-Informe-Rural-2021.pdf>.
- Borken, W., Gründel, S., Beese, F. 2000. Potential contribution of *Lumbricus terrestris* L. to carbon dioxide, methane and nitrous oxide fluxes from a forest soil. *Biology and Fertility of Soils* 32(2), 142-148.
- Galindo, M., Guizar, C., Becerril, E., Moeller, G., León, E., Vallejo, R. 2019. Occurrence of emerging contaminants in environmental surface waters and their analytical methodology—a review. *Water Suply*, 19 (1), 1871-1884.
- Garg, S., Zaman, Z., Nasser, A., Pynadathu, N., Thomas, P. 2021. Impact of Industrial Wastewater on Environment and Human Health. *Advanced Industrial Wastewater Treatment and Reclamation of Water*, 197-209.
- Gutierrez, V., Gómez, G., Rodríguez, D., Vidal, G. 2023. Critical analysis of wastewater treatment using vermifilters: Operating parameters, wastewater quality, and greenhouse gas emissions. *Journal of Environmental Engineering*, 11 (3), 109683.
- Gutiérrez, V., Monsalves, N., Gómez, G., Vidal, G. 2023. Performance of a full-scale vermifilter for sewage treatment in removing organic matter, nutrients, and antibiotic-resistant bacteria. *Sustainability* 15 (8), 6842.
- Huang, W., Zhao, Y., Zhang, J. 2014. Effects of different influent C/N ratios on the performance of various earthworm eco-filter systems: nutrient removal and greenhouse gas emission. *World Journal of Microbiology and Biotechnology* 30 (1), 109-118.

- IPCC. 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Aporte al Grupo de Trabajo del Informe de la Cuarta Evaluación del Panel Intergubernamental del Cambio Climático. [S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor y H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge, Reino Unido, 996 páginas.
- Janzen, H.H. 2006. The soil carbon dilemma: shall we hoard it or use it? *Soil Biology and Biochemistry* 38(3), 419-424.
- Kumar, T., Rajpal, A., Bhargava, R. 2014. Performance evaluation of vermifilter at different hydraulic loading rate using riverbed material. *Ecological Engineering*, 62, 77-82.
- Lai, E., Hess, M., Mitloehner, F.M. 2018. Profiling of the microbiome associated with nitrogen removal during vermifiltration of wastewater from a commercial dairy. *Frontiers in Microbiology* 9, 1964.
- Lubbers, I.M., Van Groenigen, K.J., Fonte, S.J., Six, J., Brussaard, L., Van Groenigen, J.W. 2013. Greenhouse-gas emissions from soils increased by earthworms. *Nature Climate Change* 3(3), 187-194.
- Luth, Robin, P., Germain, P., Lecomte, M., Landrain, B., Li, Y., Cluzeau, D. 2011. Earthworm effects on gaseous emissions during vermifiltration of pig fresh slurry. *Bioresource Technology* 102(4), 3679-3686.
- Rajpal, A., Arora, S., Bhatia, A. 2014. Co-treatment of organic fraction of municipal solid waste (OFMSW) and sewage by vermireactor. *Ecological Engineering* 73, 154-161.
- Sánchez, I., Fernández, N., Amils, R., Sans, J.L. 2008. Assessment of the addition of *Thiobacillus denitrificans* and *Thiomicrospira* to denitrificans to chemolithoautotrophic denitrifying bioreactors. *International Microbiology* 11 (3), 179-184.
- Sistema Tohá. 2024. Sistema de depuración de Aguas. Disponible en: <https://sistematoha.cl/newSistematoha/sistema-toha/>
- Unidad de Saneamiento Sanitario, Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo (SUBDERE). 2018. Estudio de Soluciones Sanitarias para el Sector Rural Año 2018. ISBN: 978-956-8468-54-5. Disponible en: https://www.subdere.gov.cl/sites/default/files/documentos/estudio_de_soluciones_sanitarias_para_el_sector_rural_1.pdf

- Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN). 2024. Soluciones basadas en la naturaleza. Disponible en: <https://www.iucn.org/es/nuestro-trabajo/soluciones-basadas-en-lanaturaleza>
- Vidal, G., Araya, F. 2014. Las aguas servidas y su depuración en zonas rurales: Situación actual y desafíos. Ediciones Universidad de Concepción, ISBN 978-956-227-378-7, 118 p.
- Vidal, G., Gómez, G., Diez, M.C. 2021. Soluciones basadas en la naturaleza para la descontaminación de descargas puntuales y difusas. Ediciones Universidad de Concepción ISBN 978-956-227-465-4, 132 p.
- Yang, G., Xing, M., Liu, J., Yang, J. 2017. Optimizing vermifilter depth by process performance collaborated with the evolutions of microbial characteristics during sewage sludge treatment. *Environmental Science and Pollution Research* 24 (7), 6688–6697.



ANID/FONDAP/15130015

ANID/FONDAP/1523A0001

LOS VERMIFILTROS, ¿SON UNA ALTERNATIVA PARA EL TRATAMIENTO NO CONVENCIONAL DE LAS AGUAS RESIDUALES?



Universidad de Concepción



UNIVERSIDAD
DE LA FRONTERA



Universidad del Desarrollo
Universidad de Excelencia

