



Revista EIA
ISSN 1794-1237
e-ISSN 2463-0950
Año XIX/ Volumen 22/ Edición N.44
Julio - diciembre 2025
Reia4408 pp. 1-45

Publicación científica semestral
Universidad EIA, Envigado, Colombia

PARA CITAR ESTE ARTÍCULO / TO REFERENCE THIS ARTICLE /

González Mazo, C.; Avendaño Mejía, K.; Naranjo-Fernández, D.; Betancur Vargas, T.; Ossa Valencia, J. y Vásquez Cardona, P. A.
Alternativas de Tratamiento Terciario de Aguas Residuales Domésticas para Viviendas Dispersas Rurales en Zonas de Interés Hidrogeológico

Revista EIA, 22(44), Reia4408 pp. 1-45
<https://doi.org/10.24050/reia.v22i43.1845>

✉ *Autor de correspondencia:* Correa Naranjo-Fernández, D.
Ingeniería Química,
M.Sc. Ingeniería, Ph.D. Ingeniería Hidráulica y Saneamiento
Correo electrónico:
dario.naranjo@udea.edu.co

Recibido: 15-11-2024

Aceptado: 10-06-2025

Disponible online: 01-07-2025

Alternativas de Tratamiento Terciario de Aguas Residuales Domésticas para Viviendas Dispersas Rurales en Zonas de Interés Hidrogeológico

CATALINA GONZÁLEZ MAZO¹

KEREN AVENDAÑO MEJÍA¹

✉ DARÍO NARANJO-FERNÁNDEZ¹

TERESITA BETANCUR VARGAS¹

JULIANA OSSA VALENCIA¹

PAOLA ALEJANDRA VÁSQUEZ CARDONA²

1. Universidad de Antioquia, Colombia
2. CORPOCALDAS, Colombia

Resumen

En Colombia existe actualmente la necesidad de definir acciones y estrategias claras para la protección de las aguas subterráneas y así disminuir la creciente preocupación originada por la información dispersa y la falta de conocimiento acerca de este recurso, que dificultan su correcta gestión. La normativa colombiana prohíbe los vertimientos en zonas críticas como las de recarga alta de acuíferos y en las aguas subterráneas. Por su parte, la Resolución 0631 de 2015 regula estrictamente estas descargas, estableciendo límites permisibles para diversas actividades económicas y fomentando la implementación de sistemas de tratamiento de agua residual doméstica. Sin embargo, el manejo de aguas residuales en zonas rurales representa un riesgo significativo de contaminación, especialmente si se encuentran en zonas de interés hidrogeológico, pues al tratarlas mediante sistemas sépticos no se realiza la remoción de nutrientes que, al descargar el efluente directamente al suelo, llegan a los acuíferos por infiltración. Con el objetivo de propender por la calidad del agua en las fuentes subterráneas así como su conservación a largo plazo, este artículo selecciona alternativas de tratamiento terciario descentralizadas para viviendas rurales dispersas por

medio de una revisión bibliográfica y presenta una metodología de diseño y selección para las alternativas de tratamiento aplicables en estas zonas rurales. Entre las alternativas de tratamiento terciario existentes, aquellas adecuadas para implementar en zonas de interés hidrogeológico son: humedales construidos de flujo superficial y subsuperficial, filtro intermitente de arena, filtro verde, filtro verde descarga cero y filtro verde evaporativo de flujo ascendente; estas dos últimas alternativas presentan la ventaja adicional que no generan efluentes al final del proceso.

Palabras clave: Zonas de interés hidrogeológico; Tratamiento terciario; Agua residual doméstica; Agua subterránea; Acuífero; Nutrientes.

Tertiary Domestic Wastewater Treatment Alternatives for Dispersed Rural Housing in Areas of Hydrogeological Interest

Abstract

In Colombia, there is currently a need to define clear actions and strategies for the protection of groundwater. This is in order to reduce the growing concern caused by the scattered information and lack of knowledge about this resource, which hinders its proper management. In accordance with Colombian legislation, the disposal of wastewaters is prohibited in areas of critical environmental importance, including zones with high aquifer recharge and groundwater sources. In addition, Resolution 0631 of 2015 provides comprehensive regulation of these discharges, establishing permissible limits for a range of economic activities and promoting the implementation of domestic wastewater treatment systems. However, the management of wastewater in rural areas represents a significant risk of contamination, especially if they are located in areas of hydrogeological interest. This is because the removal of nutrients that, when discharging the effluent directly to the soil, reach the aquifers by infiltration is not performed when the wastewater is treated through septic systems. The objective of this article is to promote water quality in groundwater sources and to facilitate their long-term conservation. To this end, it presents a review of the literature and a methodology for the design and selection of decentralised tertiary treatment alternatives for dispersed rural housing. Among the existing tertiary treatment alternatives, those suitable for implementation in areas of hydrogeological interest are surface and subsurface flow constructed

wetlands, intermittent sand filters, green filters, zero discharge green filters and upflow evaporative green filters. The latter two alternatives have the additional advantage that they do not generate effluents at the end of the process.

Keywords: Areas of hydrogeological interest; Tertiary treatment; Domestic wastewater; Groundwater; Aquifer; Nutrients.

1. Introducción

Según presenta la Organización de las Naciones Unidas (ONU) en el sexto Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS): agua y saneamiento, en la actualidad, aproximadamente 1.800 millones de personas en todo el mundo utilizan una fuente de agua potable que está contaminada por restos fecales, debido a que más del 80% de las aguas residuales resultantes de la actividad humana se vierte en los ríos o en el mar sin ningún tratamiento, lo que provoca su contaminación. En Colombia, la Resolución 0631 de 2015, emitida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia (MADS), regula el vertimiento de aguas residuales, estableciendo los límites máximos permisibles para diferentes tipos de actividades económicas; con el fin de cumplir con los parámetros presentes en esta normativa, es necesario plantear un sistema de tratamiento de agua residual doméstica (STARD), compuesto por un tratamiento preliminar, primario, secundario, y en algunos casos, terciario.

Con base en los registros de datos reportados al Sistema Único de Información de Servicios Públicos Domiciliarios (SUI) y las acciones de inspección y vigilancia adelantadas por esta Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (SSPD), se identificaron 720 sistemas de tratamiento de aguas residuales en Colombia, contando con información de 368 Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) operativas asociadas a 237 empresas prestadoras del servicio (SSPD, 2021); sin embargo, son muy pocas las PTAR que emplean tratamiento terciario, puesto que con el tratamiento secundario se alcanza a cumplir con la normatividad de vertimientos (Resolución 0631 de 2015; MADS, 2015a). Al no realizar tratamiento terciario, no se remueven nutrientes, compuestos de nitrógeno y fósforo, que terminan depositándose en aguas superficiales y alcanzando las aguas subterráneas.

Las aguas subterráneas son un recurso vital para el suministro de agua potable y la conservación de los ecosistemas acuáticos. Para protegerlas, es esencial identificar y manejar adecuadamente las zonas de interés hidrogeológico, incluyendo las zonas de recarga y aquellas altamente vulnerables a la contaminación. Las zonas de interés hidrogeológico corresponden a las zonas estratégicas para la protección de las aguas subterráneas y la prevención y reducción de los riesgos que puedan afectarlas.

La normatividad colombiana presenta las mayores restricciones en estas zonas. De acuerdo con el Decreto 050 de 2018 (MADS, 2018), no se admiten vertimientos al suelo en zonas de recarga de acuíferos, por otro lado, el Decreto 1076 de 2015 (MADS, 2015b) en su artículo 2.2.3.2.20.1, establece que los cuerpos de agua Clase I, los cuales incluyen las aguas subterráneas, no admiten ningún tipo de vertimiento, y los Clase II admiten vertimientos con algún tipo de tratamiento. Además, el artículo 2.2.3.3.4.3 del mismo decreto prohíbe específicamente los vertimientos en acuíferos.

Los componentes contaminantes encontrados con mayor frecuencia en el agua subterránea relacionados con la actividad de saneamiento *in situ* son los patógenos fecales, nutrientes (nitrógeno y fósforo), carga orgánica general y microorganismos tóxicos (Foster e Hirata, 2002). Entre estos elementos, los nutrientes suelen persistir en el efluente del tratamiento secundario, el cual puede infiltrarse hasta el acuífero y afectar negativamente su calidad.

La disposición de aguas residuales y la implementación de sistemas de tratamiento representa una de las acciones que deben ser objeto de especial reglamentación y restricción en zonas de recarga de acuíferos; en ese sentido los asentamientos humanos que se localizan sobre o cerca de estas zonas deben contar con alternativas de disposición de aguas residuales domésticas (ARD) que garanticen el menor impacto posible sobre los acuíferos. En territorios rurales, estas zonas de recarga son altamente vulnerables a la contaminación por materia orgánica, nutrientes y microorganismos que pueden infiltrarse o percolar en el suelo procedentes de efluentes de sistemas sépticos (trampa de grasas, pozo séptico y filtro anaerobio de flujo ascendente), opción de STARD más común para el tratamiento de ARD rurales.

Con la intención de proteger el recurso hídrico subterráneo y disminuir el impacto y la contaminación que generan los efluentes con contaminantes de STARD en zonas de interés hidrogeológico, este artículo selecciona alternativas de tratamiento terciario descentralizadas para viviendas rurales dispersas por medio de una revisión bibliográfica y presenta una metodología de diseño y selección para las alternativas de tratamiento aplicables en estas zonas rurales.

2. Alternativas de tratamiento terciario

El tratamiento de ARD implica una serie de procesos físicos, químicos y biológicos para eliminar los contaminantes antes de ser liberados al medio ambiente. Estos procesos incluyen la remoción de sólidos suspendidos, materia orgánica disuelta biodegradable, nutrientes (i.e. nitrógeno y fósforo), patógenos y otros contaminantes orgánicos recalcitrantes. Para alcanzar estas remociones, se realizan tratamientos clasificados como preliminares, primarios, secundarios y terciarios.

Diferentes alternativas de tratamiento terciario se han desarrollado para obtener un efluente final con características que permitan la reutilización del agua residual tratada en zonas donde las fuentes de suministro de agua son limitadas o la protección de zonas de importante interés ambiental. Con el fin de seleccionar alternativas de tratamiento terciario que se ajusten a la disminución de los impactos que las ARD pueden tener sobre las aguas subterráneas, se realizó una búsqueda bibliográfica de las alternativas y se obtienen los resultados consolidados en la en la Tabla 1, en la que se clasifican según el tratamiento: biológico, físico o químico, y en orden creciente de complejidad.

Tabla 1. Alternativas de tratamiento terciario de ARD.

Proceso	Descripción del sistema	Características	Fuente
TRATAMIENTOS BIOLÓGICOS			
Sistema de infiltración subsuperficial	Se divide principalmente en diferentes escenarios de aplicación en cuatro tipos: sistema de pozo de filtración, sistema de zanja de drenaje, sistema de cámara y sistema Niimi. Los cuerpos principales del mecanismo de eliminación de nitrógeno involucran el suelo, las plantas y los microorganismos, entre los cuales los microorganismos realizan la mayor parte del trabajo de eliminación de nitrógeno.	Se ha utilizado ampliamente en el tratamiento descentralizado de aguas residuales rurales debido a su bajo costo, bajo consumo de energía, alta eficiencia, estructura simple, disponibilidad de materiales locales y mantenimiento conveniente. El uso de diferentes tipos de rellenos optimiza la permeabilidad, el rendimiento de adsorción y complementa las fuentes de carbono del sistema; no obstante, el costo de construcción se eleva. El intervalo recomendado de tasa de carga hidráulica es de 0,01 a 0,08 m ³ /m ² -d, y se ajusta de acuerdo con la calidad específica del agua para obtener un mejor efecto de eliminación de nitrógeno.	Yang <i>et al.</i> (2022)
Tratamiento terrestre de filtración rápida	También conocido como tratamiento acuífero-suelo, utiliza el ecosistema del suelo para tratar las aguas residuales. Esta tecnología consiste en aplicar el agua residual en embalses poco profundos construidos sobre depósitos permeables de suelo altamente poroso. El tratamiento incluye filtración, absorción, intercambio iónico, precipitación y acción microbiana. A medida que el agua residual se percola a través del suelo, esta puede ser recolectada o puede fluir hacia cuerpos de agua superficial o acuíferos libres. En zonas donde los acuíferos son muy profundos, se utiliza tubería para recuperar el agua tratada y utilizarla para irrigación o usos industriales.	El tratamiento terrestre de filtración rápida es un tratamiento de aguas residuales simple y de bajo costo. El proceso es muy fiable con suficientes periodos de descanso y es adecuado para plantas pequeñas donde la experiencia del operador es limitada. Requiere de un área significativa para el tratamiento, entre 0,4 a 4 ha, con beneficios secundarios mínimos, como los que son posibles con otros sistemas de tratamiento natural (es decir, producción de cultivos o bosques, mejora del hábitat, etc.). Es muy flexible en términos de ubicación del sitio, a menos que se pretenda recargar y recuperar las aguas subterráneas.	U.S. EPA (2002a)
Tratamiento terrestre de filtración lenta	En este tratamiento el agua residual se aplica en un suelo vegetado, tal que los nutrientes que contiene contribuyan al crecimiento de plantaciones o el mantenimiento de parques, pastos y bosques. El efluente puede filtrarse a las aguas subterráneas nativas o a desagües subterráneos o pozos para la recuperación de agua y su reutilización. Los desagües subterráneos sirven para evitar la acumulación de agua subterránea debajo del sitio, para controlar el flujo de agua subterránea y para minimizar el movimiento de lixiviados a la propiedad adyacente. Si bien se puede alcanzar un agua percolada de alta calidad, esta tecnología requiere mucho espacio comparada con otros tratamientos terrestres. Resulta una opción económica y atractiva respecto a sistemas de tratamiento convencionales.	El filtro lento se caracteriza por ser un sistema sencillo, limpio y a la vez eficiente para el tratamiento de agua. Comparado con el filtro rápido, requiere de áreas más grandes para tratar el mismo caudal, aproximadamente entre 8,62 a 86,17 ha/m ³ .min, por lo tanto, tiene mayor costo inicial. Sin embargo, su simplicidad y bajo costo de operación y mantenimiento lo convierte en un sistema ideal para zonas rurales y pequeñas comunidades. Los requisitos operativos, laborales, químicos y energéticos son significativamente reducidos, y existe una rentabilidad económica del uso y reutilización de agua y nutrientes para proporcionar cultivos comercializables; no obstante, es necesario una investigación exhaustiva de la idoneidad del sitio antes de su implementación.	U.S. EPA (2002b)

Tabla 1. Alternativas de tratamiento terciario de ARD.

Proceso	Descripción del sistema	Características	Fuente
Humedal construido de flujo superficial	El agua fluye horizontalmente sobre la superficie del suelo con vegetación desde un punto de entrada hasta el punto de descarga. Contienen plantas acuáticas que tienen sus raíces en una capa de suelo en el fondo del humedal con agua que fluye a través de las hojas y tallos de las plantas. Los sistemas de humedales no producen biosólidos ni lodos residuales que requieran tratamiento subsiguiente y disposición.	El tamaño de los sistemas de humedales de flujo superficial va desde pequeñas unidades para tratamiento en el sitio de efluentes de tanques sépticos hasta grandes unidades de más de 16.888 hectáreas. Por lo general más grandes, debido a la limitada interacción del agua con un medio de soporte. Los intervalos oscilan entre 3 a 5 m ² /habitante. Requieren un área relativamente extensa, especialmente si se requiere la remoción de nitrógeno o fósforo. El tratamiento es efectivo y requiere muy poco en cuanto a equipos mecánicos, electricidad o la atención de operadores adiestrados.	Gordon et al. (2021) Gunes et al. (2021) U.S. EPA (2000a)
Humedal construido de flujo subsuperficial	Contienen un lecho de medios (como roca triturada, piedras pequeñas, grava, arena o tierra) que ha sido plantado con vegetación acuática en la superficie. Cuando se diseña y opera correctamente, las aguas residuales permanecen debajo de la superficie del lecho, fluyendo horizontalmente por el medio de soporte en contacto con las raíces y los rizomas de las plantas y no son visibles ni están disponibles para la vida silvestre. Los sistemas de humedales no producen biosólidos ni lodos residuales que requieran tratamiento subsiguiente y disposición.	Los humedales subsuperficiales proporcionan tratamiento efectivo en forma pasiva y minimizan la necesidad de equipos mecánicos, electricidad y monitoreo por parte de operadores calificados. Requiere un área extensa y de largos tiempos de retención para lograr una remoción de amoníaco por nitrificación biológica, debido a la disponibilidad limitada de oxígeno. Los humedales de flujo horizontal tienen un intervalo típico entre 3 a 5 m ² /habitante. Mientras el nivel subsuperficial de flujo se mantenga, se elimina el riesgo de mosquitos y vectores, además se evita que niños y mascotas estén expuestos al agua residual parcialmente tratada.	Badejo et al. (2017) MAVDT (2000a) Rodríguez et al. (2022a) U.S. EPA (2000b)
Filtro verde evaporativo de flujo ascendente (humedal construido evaporativo)	Es un sistema de flujo vertical ascendente subsuperficial, modificados. El ARD ingresa en el sistema a través de una cámara de recepción en el fondo del tanque, donde se produce la digestión anaeróbica de la materia orgánica. A medida que aumenta el nivel del agua en el sistema, las capas superiores de grava y arena también se inundan, hasta que el agua alcanza la capa superior de suelo, donde las fuerzas capilares, el viento y el calor, así como la absorción por las raíces de las plantas, eliminan el agua a través de la evapotranspiración, mientras que los nutrientes son eliminados por la incorporación de las plantas. Si se diseña adecuadamente, no se produce ningún efluente, excepto en casos de sobrecarga hidráulica severa.	El área superficial de los sistemas depende de la cantidad y la calidad de las aguas residuales que se van a tratar, de la precipitación anual local, el clima y la evapotranspiración de la vegetación que se va a emplear. Por ejemplo, en el caso de Brasil, para una vivienda de 2 personas en la ciudad de Campo Grande, se estimó un área de 4 m ² y 1 m de profundidad, cultivando plantas de banano, taioba y beri. Son sistemas ecológicos que no implican consumo de energía eléctrica, no necesitan insumos químicos, y requieren de una simple operación y mantenimiento.	Paulo et al. (2019) Valencia (2014)

Tabla 1. Alternativas de tratamiento terciario de ARD.

Proceso	Descripción del sistema	Características	Fuente
Laguna con lenteja de agua	Se pueden utilizar de manera efectiva en el tratamiento de aguas residuales debido a que crecen de forma abundante recuperando nutrientes como el nitrógeno y fósforo, además pueden ser cosechadas fácilmente para usarse como alimento para peces. Estos sistemas se utilizan para proporcionar un tratamiento adicional a los efluentes y así brindar una desnitrificación mejorada previo a su descarga.	El requerimiento de terreno generalmente puede ser de hasta alrededor de 6 m ² /habitante, con tiempo de retención hidráulico de 20 días para obtener un efluente de alta calidad. Los nutrientes de las aguas residuales se recuperan y se transforman en subproductos ricos en proteínas fáciles de recolectar. La lenteja de agua tiene alta productividad, alto contenido de proteína, gran absorción de nutrientes y fácil manejo, cosecha y procesamiento, por lo tanto, no requiere de personal capacitado y constante monitoreo. Además, tiene un período de crecimiento prolongado, bajo contenido de fibra y reduce el desarrollo de mosquitos.	Arceivala y Shyam (2007b) El-Shafai <i>et al.</i> (2007)
Laguna de maduración	Utilizados para depurar efluentes de otros procesos biológicos; se diseñan para mantener las condiciones aeróbicas en toda la profundidad del líquido, son poco profundos de 0,6 a 1,5 m. El oxígeno disuelto se obtiene a través de la fotosíntesis y la aireación de la superficie, se utilizan comúnmente como tratamientos de pulimento y usualmente se implementan para eliminar patógenos.	Es un sistema que funciona por flujo a gravedad, por lo tanto, no necesita de electricidad, ahorrando costos operacionales, y su operación es relativamente sencilla y no es necesario tener personal capacitado. El requerimiento de área es extenso, se ha estimado de 3 a 5 m ² /habitante.	Arceivala y Shyam (2007a) Silva <i>et al.</i> (1995) Von Sperling (2005)
Filtro verde (humedal de flujo vertical subsuperficial)	En los humedales de flujo vertical subsuperficial el agua fluye de manera descendente. Esta se vierte y se distribuye homogéneamente sobre toda la superficie del lecho, percola y fluye entre el material filtrante de relleno. El material de relleno que se usa en los lechos es típicamente material inerte (i.e. arenas, gravas) que favorece la adhesión y crecimiento de biopelículas, además el medio sirve para facilitar el arraigo de las plantas y la filtración del agua que se trata. Una vez el agua percola a través del lecho, se recoge en el fondo y se evacúa por medio de tubería, para permitir que el lecho se recargue de aire y el siguiente pulso tenga suficiente oxígeno para facilitar los procesos de degradación.	El lecho debe tener una profundidad efectiva de alrededor de 1,0 m y se diseñan con flujo intermitente, es decir, tienen fases de llenado, reacción y vaciado. La intermitencia en la alimentación mejora la transferencia de oxígeno y por tanto el medio granular se encuentra en condiciones más oxidadas si se compara con lo que se observaría en un sistema de tipo horizontal. Esto permite que los sistemas verticales puedan operar con cargas superiores a las de los horizontales (entre 20 y 40 g DBO/m ² .día) ocupando menor espacio para tratar un mismo caudal. Los sistemas se pueden dimensionar tomando 2,5 m ² /habitante. El sistema de distribución del caudal de agua del afluente está en la superficie, debe repartir el agua homogéneamente y sobre toda la superficie del lecho.	García y Corzo (2008) Vidal y Hormazábal (2018)

Tabla 1. Alternativas de tratamiento terciario de ARD.

Proceso	Descripción del sistema	Características	Fuente
Filtro verde descarga cero	Los filtros verdes son un método de tratamiento de aguas residuales que utiliza la vegetación y el suelo para eliminar los contaminantes en el efluente. El sistema consiste en la aplicación de las aguas residuales a un área con vegetación, ya sea forestal o herbácea, para que el sistema suelo-vegetación-microorganismos degrade los contaminantes. El afluente es sometido a procesos de evapotranspiración, filtración, biodegradación, adsorción y captación de nutrientes por la vegetación. Además, si el efluente tratado es recolectado y recirculado sobre el filtro verde, se puede lograr un sistema “descarga cero”.	La profundidad suele ser entre 0,9 y 1,2 m. El tamaño de la superficie del sistema dependerá de la cantidad y calidad de las aguas residuales a tratar, así como de la cantidad de precipitación que se presente en la zona donde se construya. Para que este sistema opere adecuadamente se debe garantizar que el filtro permanezca siempre inundado de esta manera se optimizan los procesos de degradación y remoción de contaminantes. Para dispersar las aguas residuales se utiliza un sistema que distribuya de manera uniforme el agua residual sobre el área de cultivo verde, esto mediante una tubería perforada. Adicionalmente cuenta con una unidad de drenado, la cual almacena los drenajes que puedan surgir en el área de cultivo para luego ser incorporada nuevamente al área de cultivo del filtro verde.	Rodríguez <i>et al.</i> (2022b)
Filtro intermitente de arena	La aplicación de aguas residuales discontinuas puede crear un ciclo de fases alternas “inundación/húmedo” y “drenaje/secado” que actúa como una bomba pasiva para expulsar y aspirar aire en el medio de arena y facilitar los procesos aeróbicos y anóxicos, transportando el oxígeno por biopelículas bacterianas las cuales no deben saturarse.	Son sistemas que tienen lechos de filtración entre 0,45 y 0,91 m de profundidad, con medios filtrantes cuidadosamente clasificados. Los filtros intermitentes de arena tienen bajos requerimientos de energía y son fácilmente accesibles para el monitoreo y no requieren personal calificado para funcionar eficientemente; no obstante, se requiere mantenimiento regular (pero mínimo). Si los medios de filtración apropiados no están disponibles localmente, los costos podrían ser más altos. Además, los costos de construcción son moderadamente bajos y la mano de obra es mayoritariamente manual. Estos filtros se pueden instalar para combinar con el paisaje que lo rodea.	Achak <i>et al.</i> (2019) U.S. EPA (1999a)
Filtro percolador	Se basa en comunidades microbianas autóctonas adheridas a medios granulares (naturales) o sintéticos, en procesos de filtración profunda para biotransformar sustancias químicas orgánicas, nitrógeno, fósforo y constituyentes metálicos disueltos. La aireación de este sistema puede ser natural o inducida.	El uso de materiales sintéticos que tienen mejor porosidad, área de superficie alta y resiliencia a la obstrucción facilita una mayor carga, en comparación con los medios granulares, lo que da como resultado un menor requerimiento de área, pero el costo de construcción y operación incrementan. Para aumentar la eficiencia del proceso en cuanto a la remoción de nutrientes, es necesario airear el sistema, por lo cual se requiere electricidad para su correcto funcionamiento. Los filtros de baja tasa se utilizan mejor para servir a comunidades pequeñas o viviendas unifamiliares en las que se desea una operación simple y resistente. El requerimiento de área varía de 0,5 a 0,7 m ² /habitante, con profundidades de 1,8 a 3,0 m.	Arceivala y Shyam (2007c) Chen <i>et al.</i> (2022) Rout <i>et al.</i> (2021)

Tabla 1. Alternativas de tratamiento terciario de ARD.

Proceso	Descripción del sistema	Características	Fuente
Estanque de <i>raceway</i> abiertos (sistema de estanque de canal abierto para el cultivo de microalgas)	Tiene una estructura muy simple que consta de un canal cerrado y una rueda de paletas. La canalización cerrada se puede construir utilizando materiales de bajo costo, como cemento y plásticos. Las microalgas se inoculan y se cultivan en la canaleta, y la rueda de paletas promueve la circulación de medios de cultivo o aguas residuales en la canaleta. Dado que el sistema de estanques de canalización abierta funciona al aire libre, las microalgas podrían realizar la fotosíntesis bajo la luz solar.	Los reactores más utilizados son estanques de <i>raceway</i> abiertos, que tienen bajos costos de capital y operación, no obstante, requieren de personal capacitado, pero son más fáciles de operar en comparación con un sistema de fotobiorreactor. Tienen grandes requerimientos de área debido a la baja columna de agua necesaria para la penetración de la luz, que tiende a ser corta, alrededor de 15 a 30 cm. Por esta razón, los <i>raceways</i> suelen presentar relaciones volumen/área muy altas, de 150 a 300 L/m ² . La recuperación eficiente de la biomasa algal es complicada y solo es posible mediante técnicas costosas como la floculación-flotación o centrifugación.	Barroso <i>et al.</i> (2022) Morais <i>et al.</i> (2022)
Zanja de oxidación	Es una modificación del sistema de lodos activados; es un proceso de tratamiento biológico de lodos que utiliza largos tiempos de retención de sólidos y también puede ser operado para lograr una desnitrificación parcial. La ventaja principal es la capacidad de lograr la eliminación de nitrógeno mediante la aireación extendida, en donde el tiempo de retención del tanque de aireación es entre cuatro (4) a cinco (5) veces más que en el tiempo de proceso de lodos activados.	Es un sistema eficiente y de complejidad operacional alta. Requiere un área de terreno más grande que otras opciones de tratamiento de lodos activados. Esto puede resultar costoso, limitando la viabilidad de las zanjas de oxidación en áreas urbanas, suburbanas u otras áreas donde los costos de adquisición de terrenos son relativamente altos. Es utilizado comúnmente en pequeñas comunidades y zonas rurales. Los costos de operación son elevados y se requiere de personal capacitado para operar el sistema. Las operaciones energéticamente eficientes resultan en costos de energía reducidos en comparación con otros procesos de tratamiento biológico.	Gao <i>et al.</i> (2006) U.S. EPA (2000c)
Reactor biológico de discos	Consiste en un disco giratorio que se sumerge parcialmente en una unidad de reactor de flujo continuo. Con cada rotación del disco, la biopelícula microbiana adherida al disco queda expuesta a las aguas residuales de manera intermitente. El tratamiento está mediado tanto por los organismos suspendidos en las aguas residuales como por la biopelícula adherida a los discos giratorios.	Los reactores biológicos de discos son comúnmente implementados en comunidades pequeñas, pero también existe la posibilidad de encontrarlas en instalaciones de mayor tamaño. Los requisitos de terreno para su instalación suelen ser bastante pequeños, menores a 0,1 m ² /habitante. En cuanto a la eliminación de lodos, para el caso de plantas pequeñas se pueden mantener en un tanque o laguna (con la adición de cal si se desea) para ser transportados periódicamente y así ser dispuestos finalmente, lo que representa un costo adicional. Respecto a los requerimientos energéticos, estos suelen ser más altos con el objetivo de remover el nitrógeno, por lo que puede ser necesario contar con energía adicional para la eliminación de lodos. Además, es necesario contar con personal capacitado para operar correctamente el sistema.	Arceivala y Shyam (2007c)

Tabla 1. Alternativas de tratamiento terciario de ARD.

Proceso	Descripción del sistema	Características	Fuente
Fotobiorreactor de consorcios de microalgas	<p>En estos sistemas se permite una penetración eficiente de la luz, las microalgas viven en estrecha asociación con otros microorganismos formando un consorcio mixto de microalgas, bacterias, protozoos y otros organismos. Las bacterias son las principales responsables de la eliminación de carbono orgánico mientras liberan dióxido de carbono y metabolitos, como la vitamina B 12, que ayudan al crecimiento de las microalgas. A su vez, las microalgas eliminan los nutrientes inorgánicos de nitrógeno y fósforo, así como los contaminantes emergentes del agua tratada.</p>	<p>Es una alternativa sostenible con bajas emisiones de gases de efecto invernadero, pero se utilizan menos debido a su alto costo de capital y uso de energía, lo que aumentaría drásticamente los costos de tratamiento de aguas residuales, además de requerir personal capacitado. El área que ocupa este sistema es alrededor de tres (3) veces menor que los sistemas raceway convencionales; y por su versatilidad el sistema es sencillo de escalar ya que se pueden interconectar más módulos de acuerdo al volumen y carga orgánica del efluente a tratar, lo que permite un mantenimiento más sencillo del sistema. La recuperación eficiente de la biomasa algal es complicada y solo es posible mediante técnicas costosas como la floculación-flotación o centrifugación.</p>	<p>Morais <i>et al.</i> (2022)</p>
Reactor secuencial por lotes	<p>Consiste en un sistema de lodos activados en una sola unidad operativa que requiere fases de llenado, reacción, sedimentación y vaciado de manera repetida y continua. En el proceso de aireación, controlado por PLC, el afluente se expone a condiciones aerobias y anóxicas en el reactor discontinuo. Una parte del lote se recicla a la unidad anóxica para la eliminación adicional de nitrógeno.</p>	<p>El reactor secuencial por lotes requiere una pequeña extensión de terreno, siendo útiles para zonas donde el área disponible es limitada, además los ciclos dentro del sistema se pueden ajustar para alcanzar remociones deseadas; no obstante, este sistema necesita un mayor nivel de sofisticación en control, especialmente para sistemas más grandes; mayor nivel de mantenimiento asociado con controles más sofisticados, interruptores y válvulas automáticas, por consiguiente se requiere de altos costos de operación, construcción y mantenimiento, y de un nivel avanzado y complejo de operación, haciendo que esta tecnología sea insostenible en regiones rurales.</p>	<p>Rout <i>et al.</i> (2021) U.S.EPA (1999b)</p>

Tabla 1. Alternativas de tratamiento terciario de ARD.

Proceso	Descripción del sistema	Características	Fuente
Biorreactor de lecho fluidizado	<p>En este tipo de reactor se pasa un fluido que con la velocidad suficiente viaja a través de las partículas del lecho y las suspende en la masa líquida. Puede ser operado en forma aerobia, anaerobia o anóxica y combina las mejores características de lodos activados y filtros percoladores. Es un proceso de crecimiento adherido: los microorganismos se adhieren al medio fluidizado y forman una biopelícula en la superficie. La fluidización en la columna es causada por el agua residual recirculante y/o por la corriente de aire, si el proceso incluye aireación. Las principales ventajas de estos reactores son el aumento del área de interfaz biopelícula-líquido, la alta concentración de biomasa inmovilizada, la transferencia de masa mejorada y la operación con un tiempo de retención de líquido más corto. Estos biorreactores se pueden ejecutar en un sistema de columna simple o doble, según el proceso de tratamiento que se lleve a cabo.</p>	<p>Es una tecnología probada en el laboratorio y piloto, pero no se ha utilizado ampliamente en el tratamiento de aguas residuales a gran escala. Este proceso produce menos de un tercio de los lodos biológicos que el proceso de lodos activados convencional. También se puede utilizar para reducir el tamaño y el requerimiento de área del sistema. Además, es mucho mejor en el manejo y la recuperación de cargas dinámicas (i.e. volumen y concentraciones variables del afluente) que los sistemas actuales. En general, se ha demostrado que el biorreactor de lecho fluidizado es un método muy eficaz para tratar aguas residuales, con capacidad de procesar mayores volúmenes utilizando un reactor más pequeño y un tiempo de residencia más corto. Además, su diseño compacto tiene potencial para sistemas de tratamiento de aguas residuales más aislados y localizados geográficamente. Este proceso requiere de personal capacitado y los gastos operativos aumentan respecto a la energía de fluidización requerida, además los costos de capital iniciales suelen ser elevados.</p>	<p>Dornelles et al. (2023) Nelson et al. (2021) Van de Graaf et al. (1996)</p>
TRATAMIENTOS FISICO			
Filtración por membranas: microfiltración ultrafiltración nanofiltración ósmosis inversa	<p>Los procesos de membrana de más importancia en el tratamiento del agua son: microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración y ósmosis inversa. Son procesos físicos de separación en el que los materiales que contaminan el agua (esencialmente sustancias disueltas) quedan retenidos en poros que varían en su tamaño dependiendo del tipo de membrana: microfiltración 0,01 a 12 µm, ultrafiltración 0,002 a 0,03 µm, nanofiltración: 0,001 a 0,01 µm, ósmosis inversa: 0,0001 a 0,001 µm. Estos procesos son eficientes para la desalación y en la remoción de contaminantes orgánicos e inorgánicos específicos.</p>	<p>La configuración de membrana más utilizada en el tratamiento y reutilización de aguas residuales es la de fibra hueca ya que tienen el área de superficie más alta para un espacio determinado. Por lo general, se requiere el reemplazo de la membrana cada 3 a 5 años. La tasa de flujo por unidad de área de membrana depende del espesor, la composición química de la alimentación, la porosidad de la membrana, el tiempo de operación, la presión a través de la membrana y la temperatura del agua de alimentación. Para microfiltración la tasa de flujo varía entre 400 y 1600 L/m².d; ultrafiltración entre 400 a 800 L/m².d; nanofiltración entre 200 y 800 L/m².d; ósmosis inversa entre 300 a 500 L/m².d. La operación en este tipo de procesos juega un papel fundamental, puesto que el rendimiento del sistema depende de los pretratamientos para evitar el ensuciamiento de la membrana. El tratamiento por este tipo de procesos es lo suficientemente competentes en la eliminación de nutrientes; no obstante, el ensuciamiento, costo de las membranas y su operación compleja, hacen que este sistema sea insostenible en regiones rurales.</p>	<p>Arceivala y Shyam (2007d) OMS (2018) Rout et al. (2021)</p>

Tabla 1. Alternativas de tratamiento terciario de ARD.

Proceso	Descripción del sistema	Características	Fuente
TRATAMIENTOS QUÍMICOS			
Intercambio iónico	El intercambio iónico es un proceso en el que se intercambian iones con carga similar entre la fase acuosa y la fase de resina sólida. Las resinas de intercambio iónico catiónicas intercambian iones positivos y las aniónicas intercambian iones negativos. Los tipos de resinas de intercambio iónico son: resinas catiónicas de ácido fuerte, resinas catiónicas de ácido débil, resinas aniónicas de base fuerte, resinas aniónicas de base débil y resinas quelantes selectivas de metales pesados. Este proceso puede utilizarse para remover contaminantes inorgánicos como el nitrato, fluoruro, arseniato, uranio, selenio, entre otros.	El tratamiento de aguas residuales por intercambio iónico implica una secuencia de pasos operativos, en donde un sistema normalmente se conforma de dos o más lechos de resinas contenidas en depósitos de presión con bombas adecuadas, tuberías y equipos auxiliares para la regeneración. Los depósitos de presión suelen tener 4 m de diámetro y una capa de resina de 0,6 a 1,5 m de profundidad. La capacidad de la resina para intercambiar iones y la cantidad de regenerante requerida determinan el rendimiento y la economía del intercambio iónico. Para garantizar el contacto del líquido con la resina y minimizar las fugas, la profundidad mínima del lecho es de 0,61 a 0,76 m. El caudal de tratamiento puede variar entre 0,27 y 0,67 m ³ /min.m ³ . El caudal de regenerante es de 0,13 a 0,27 m ³ /min.m ³ . Un volumen de agua de enjuague de 4 a 13,4 m ³ , aplicado a un caudal de 0,13 a 0,20 m ³ /min. m ³ , generalmente será suficiente para lavar un lecho de regenerante residual. Este sistema es altamente eficiente en la remoción de nutrientes, no obstante, su alto costo de construcción y la complejidad operativa hacen que este sistema resulte ser insostenible en regiones rurales.	Arceivala y Shyam (2007d) Guerrero y Anaya (2019) OMS (2018)

No obstante, no todos los tratamientos terciarios presentados son aplicables en viviendas dispersas en zonas rurales. Considerando el concepto de “tecnología apropiada”, que busca seleccionar alternativas que las comunidades puedan gestionar y controlar de manera efectiva bajo sus condiciones sociales, ambientales, tecnológicas y económicas específicas, pueden descartarse alternativas de tratamiento como: filtro percolador, estanque de *raceway* abiertos, zanja de oxidación, reactor biológico de discos, fotobiorreactor de consorcios de microalgas, reactor secuencial por lotes, biorreactor de lecho fluidizado, filtración por membranas e intercambio iónico. Adicionalmente, los sistemas de infiltración subsuperficial, así como los tratamientos terrestres de filtración

rápida y filtración lenta no cumplen con el requisito principal de evitar la infiltración o recargar el agua residual en el acuífero y, por lo tanto, no son aplicables para zonas de interés hidrogeológico. Finalmente, la laguna con lenteja de agua requiere una profundidad mínima de 2 m, mientras que la laguna de maduración entre 1 y 2 m, profundidades que superan 1 m y pueden alcanzar el nivel freático en zonas de recarga de acuíferos, generar daños en la estructura y poner en riesgo la calidad del agua subterránea.

De esta forma, sólo seis (6) de las alternativas de tratamiento terciario presentadas podrían aplicarse para viviendas rurales dispersas en zonas de interés hidrogeológico: humedal construido de flujo superficial (HC-FS), humedal construido de flujo subsuperficial (HC-FSS), filtro verde evaporativo de flujo ascendente (FV-EFA), filtro verde (FV), filtro verde descarga cero (FV-DZ) y filtro intermitente de arena (FIA). Los humedales son sistemas de flujo horizontal y su material de soporte es grava, mientras que los filtros son de flujo vertical (descendente o ascendente) con grava y arena como materiales de soporte, además de suelo en la capa más superficial para la biomasa vegetal en filtros verdes.

3. Metodología de diseño

La Tabla 2 detalla criterios y condiciones de diseño específicos para las seis (6) alternativas de tratamiento seleccionadas, encontrando referencias que muestran la variabilidad de los criterios de diseño en cada tecnología. Adicionalmente, se presentan las recomendaciones de diseño para estas alternativas de tratamiento terciario para viviendas rurales dispersas en zonas de interés hidrogeológico.

Tabla 2. Criterios y condiciones de diseño para las alternativas de tratamiento seleccionadas.

Tecnología	h (m)	A (m ² /PE)	q _L (g DBO ₅ /m ² .d)	l:a	Relleno	s (%)	Referencia
HC-FS	0,10-0,60	3,00-5,00	<6,70	2:1-4:1	Gravas	1	Rodríguez <i>et al.</i> (2022a)
	<0,40	5,00-20,00	6,00	10:1	Gravas	NA	Vidal y Hormazábal (2018)
HC-FSS	0,50 agua 0,60 medio	3,15	4,0	-	Gravas	1	MAVDT, (2000a) Título J
	0,46-0,76 medio 0,30-0,61 agua	3,00-5,00	<6,70	2:1-4:1	Arenas y gravas	-	Rodríguez <i>et al.</i> (2022a)
	0,30-0,90	-	7,41-17,30	<4:1	Arenas y gravas	-	U.S.EPA (2000b)
	0,30-1,00 Usual 0,60	2,50-5,00	3,0-7,5	2:1; 3:1; 4:1	Arenas y gravas	0,10-1,00 Usual 0,50	Delgadillo <i>et al.</i> (2010)
	<0,60	5,00-10,00	6	3:1	Arenas y gravas	<0,10	Vidal y Hormazábal (2018)
FIA	0,45-0,92 medio	1,88-0,75	2-10	-	Gravas	0-1	MAVDT, (2000a) Título J
	0,45-0,90 medio	8,40	2,69-10,76	-	Arenas y gravas	-	U.S.EPA (1999a)
FV	0,60-0,80	0,80-1,00	-	-	Gravas	0,50-2,00	Delgadillo <i>et al.</i> (2010)
	>0,80	1,00-3,00	40	NA	Gravas	NA	Vidal y Hormazábal (2018)
	0,50-0,80	2,50	20-40	NA	Arenas y gravas	Mín. 1:1	García y Corzo (2008)
FV-DZ	0,90-1,20	2,50-12,50	70	-	-	-	Rodríguez <i>et al.</i> (2022a)
FV-EFA	0,40	3,2	-	-	Grava, arena y suelo	-	Paulo <i>et al.</i> (2019)

h: profundidad; A: área superficial por persona equivalente; q_L: carga orgánica; l:a: relación largo:ancho; s: pendiente.

3.1. Humedal Construido de Flujo Superficial (HC-FS)

Rodríguez *et al.* (2022a) presentan el diseño simplificado de HC-FS pequeños descentralizados para el postratamiento de las ARD generadas en fincas cafeteras; para ello recomiendan la siguiente metodología.

- a) Determine el área de la superficie del humedal (A_S), utilizando la Ecuación 1:

$$A_S = \frac{Q (\text{Ln}C_o - \text{Ln}C_e)}{K_T * d * p}$$

Ecuación 1. Área superficial del HC-FS.

En la que:

A_S : área superficial, m^2 .

Q: caudal diario de ARD, m^3/d . En caso de que no se tengan datos, se supone la producción de aguas residuales de 100 L/persona.d para personal permanente y de 50 L/persona.d para personal temporal de acuerdo con lo establecido en el Título E del RAS (MAVDT, 2000b).

C_o : concentración del contaminante en el afluente (ingreso al humedal) como DBO_5 , mg/L. Suponga que la DBO_5 que sale del FAFA tiene un valor constante de 40 mg/L. Según MMA (2002), las ARD tienen una concentración media de DBO_5 de 200 mg/L y la eficiencia del sistema séptico hasta el FAFA es del 80%.

C_e : concentración del contaminante en el efluente (salida del humedal) como DBO_5 , mg/L. Suponga que la DBO_5 del efluente del humedal no excederá los 10 mg/L.

d: profundidad del agua en el humedal, m. Para el diseño, suponga que la profundidad efectiva del agua en el humedal es de 0,55 m. Metcalf y Eddy (1996) recomiendan un intervalo de 0,10 a 0,60 m y un borde libre de 0,10 m.

p: porosidad o espacio utilizado por el agua para fluir a través del humedal, adimensional. En HC-FS la vegetación, los sólidos sedimentados y las plantas secas ocupan un espacio en la columna de agua. Utilice un valor de porosidad de la Tabla 3. No obstante, se puede utilizar un valor de porosidad promedio basado en el porcentaje de cubrimiento de la vegetación. Por ejemplo, un humedal con el 50% de espejo de agua sin plantas emergentes y 50% de cubrimiento con vegetación emergente tendría una $p = 1,0$ en el área sin vegetación y una $p = 0,75$ en el área con vegetación. El promedio de este humedal sería $p = 0,875$ (U.S.EPA, 2000a).

Tabla 3. Valores de porosidad para HC-FS.

Característica del humedal	p	Referencia
Sin vegetación	1,00	
Completamente colonizados por la vegetación	0,65-0,75	
Con vegetación completa densa (0,65) hasta vegetación menos madura (0,75)	0,65-0,75	U.S.EPA (2000a)
Con vegetación poco densa	0,95-1,00	
Con vegetación madura	0,75	

Fuente: adaptado de Rodríguez et al. (2022a).

K_T : constante de velocidad de primer orden, d^{-1} . Depende del contaminante a eliminar (DBO_5 , SST, NT, PT, coliformes, entre otros) y de la temperatura a la que se realiza el proceso de tratamiento. Los valores de esta constante a $20^{\circ}C$ se presentan en la Tabla 4. Registre la temperatura del agua en el humedal, si no la puede medir, suponga que está por debajo de la temperatura ambiente en $2^{\circ}C$. Para calcular la constante se emplea la Ecuación 2:

$$K_T = 0,75 * K_{20} * \theta^{(T-20)}$$

Ecuación 2. Constante de velocidad de primer orden.

En la que:

K_T : constante de velocidad de primer orden, d^{-1} .

K_{20} : constante de velocidad a $20^{\circ}C$, d^{-1} (Tabla 4).

θ : coeficiente de temperatura a $20^{\circ}C$, d^{-1} (Tabla 4).

T: Temperatura promedio del agua residual en el humedal durante el proceso de depuración, $^{\circ}C$.

Tabla 4. Valores de la constante de velocidad de primer orden (K_{20}) y de temperatura (θ), para diversos contaminantes en HC-FS y HC-FSS.

Contaminante	Tipo de humedal	K_{20} (d^{-1})	θ	Referencia
DBO ₅	HC-FS	0,0057	1,10	U.S.EPA (2000a)
	HC-FS vegetación escasa	0,149	1,06	Rodríguez <i>et al.</i> (2022a)
		0,15	1,09	Crites <i>et al.</i> (2006)
	HC-FS vegetación densa	0,486	1,06	Rodríguez <i>et al.</i> (2022a)
		0,678	1,06	Crites <i>et al.</i> (2006)
		0,906	1,06	Rodríguez <i>et al.</i> (2022a)
	HC-FSS vegetación densa	1,1	1,06	Crites <i>et al.</i> (2006)
		1,1	1,06	
		1,104	1,06	
	N-NH ₃	HC-FS	0,219	1,048
Coliformes	HC-FS	2,6	1,19	

Fuente: adaptado de Rodríguez *et al.* (2022a).

- b)** Adopte una relación de aspecto del humedal (largo:ancho) de, máximo, 4:1, valor que permite cumplir la ley de Darcy y, por lo tanto, no se tendrían inconvenientes en el diseño hidráulico del humedal, prescindiendo de otros cálculos hidráulicos. Si las condiciones del sitio no permiten que se adopte la relación largo:ancho de máximo 4:1, será necesario realizar los cálculos hidráulicos. El flujo está descrito por la ecuación de Manning (Ecuación 3), que define el flujo en canales abiertos:

$$\frac{Q}{d * W} = \frac{1}{n} * d^{2/3} * s^{1/2}$$

Ecuación 3. Velocidad de flujo.

En la que:

Q: caudal diario de ARD, m³/s.

d: profundidad del agua en el humedal, m. Para el diseño suponga que la profundidad efectiva del agua en el humedal es de 0,55 m.

W: ancho del humedal, m.

s: pendiente de fondo del humedal, m/m.

n: número de Manning, s/m^{1/3}.

Para HC-FS, el número de Manning (n) está en función de la profundidad del agua (d) debido a la resistencia impuesta por la vegetación emergente (a). La resistencia también depende de la densidad de la vegetación y de la capa de residuos que puede variar (Ecuación 4):

$$n = \frac{a}{d^{1/2}}$$

Ecuación 4. Número de Manning.

En la que:

n: número de Manning, s/m^{1/3}.

a: factor de resistencia, s.m^{1/6} (Crites *et al.*, 2006). Tiene valores de 0,4 para vegetación escasa y $d > 0,4$ m; 1,6 para vegetación moderadamente densa y $d \geq 0,3$ m, y 6,4 para vegetación muy densa y capa de residuos y $d < 0,3$ m.

d: profundidad del agua en el humedal, m. Para el diseño suponga que la profundidad efectiva del agua en el humedal es de 0,55 m.

Con la Ecuación 3 se realiza un proceso iterativo variando el ancho del humedal (W) (profundidad constante) hasta que se igualen ambos lados de la ecuación. El ancho que satisfaga esta condición será el ancho del humedal. Con este ancho (W) y el área superficial (A_s) obtenida mediante el procedimiento del punto a) se determina la longitud del humedal (L) mediante la Ecuación 5:

$$L = \frac{A_s}{W}$$

Ecuación 5. Longitud del humedal.

En la que:

L: longitud del humedal, m.

W: ancho del humedal, m.

A_s: área superficial, m².

- c)** Con este enfoque de diseño se obtendrá un tiempo de retención hidráulico (TRH) de aproximadamente 2 d (a 20°C) en el humedal, que es apropiado para obtener una DBO₅ de 10 mg/L en el efluente. Si la eliminación de nitrógeno se requiere hasta 10 mg/L, el tamaño del sistema debe duplicarse para tener un TRH de aproximadamente 4 d. La Ecuación 6 determina el TRH:

$$\text{TRH} = \frac{L * W * p * d}{Q}$$

Ecuación 6. Tiempo de retención hidráulico (TRH).

En la que:

TRH: tiempo de retención hidráulico, d.

L: longitud del humedal, m.

W: ancho del humedal, m.

p: porosidad o espacio utilizado por el agua para fluir a través del humedal, adimensional. Los valores se presentan en la Tabla 3.

d: profundidad del agua en el humedal, m. Para el diseño suponga que la profundidad efectiva del agua en el humedal es de 0,55 m.

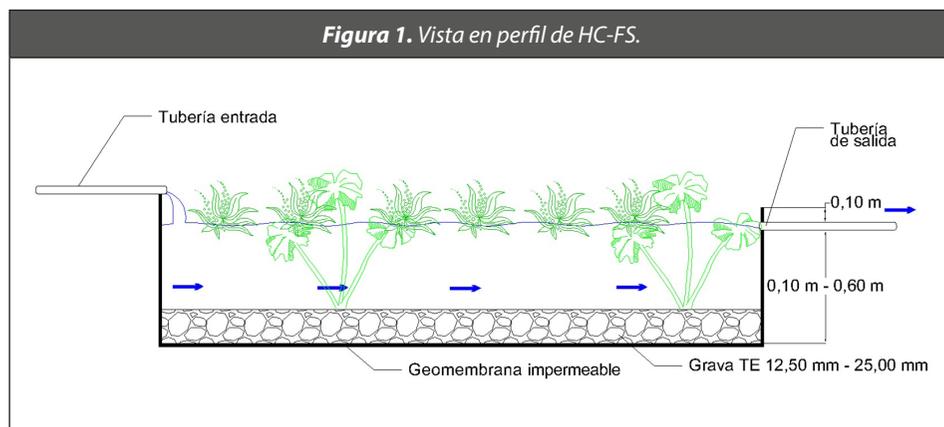
Q: caudal diario de ARD, m³/d.

- d)** Algunas recomendaciones adicionales son:

- Utilice grava limpia y lavada como medio de soporte en el humedal, con un tamaño efectivo entre 12,5 a 25,0 mm. Debido a que la grava carece de nutrientes, se recomienda que las semillas se planten en un medio fértil con el fin de evitar problemas posteriores.

- Para prevenir la infiltración de contaminantes a las aguas subterráneas, es imprescindible contar con una barrera impermeable que confine el sistema. En la mayoría de estos sistemas se utilizan revestimientos sintéticos fabricados con materiales como el caucho EPDM, PVC o polietileno de alta densidad. Se recomienda utilizar una geomembrana de 20 mils debido a su alta resistencia mecánica, su precio asequible y sus propiedades físico-mecánicas, que la convierten en un material ideal para la impermeabilización. También debe construirse una berma de al menos 15 cm por encima del sustrato y 15 cm de ancho rodeando el humedal.
- Se recomienda utilizar una planta emergente (enea, papiro, pasto elefante morado, pasto vetiver, heliconias).

La Figura 1 muestra las características de diseño de un HC-FS.



3.2. Humedal Construido de Flujo Subsuperficial (HC-FSS)

El Título J del RAS 2000 (MAVDT, 2000a) presenta alternativas tecnológicas en agua y saneamiento para el sector rural; en la sección 10.7.4.5.2. se sugieren algunos parámetros para el diseño del HC-FSS.

- a) Para la determinación del área superficial del humedal se recomiendan dos alternativas:

- Use los siguientes valores de carga hidráulica (L_w): 0,03125 m³/m².d (para zonas frías o donde haya restricciones de espacio) o 0,04762 m³/m².d (para zonas donde no haya restricciones de espacio). Definiendo este valor y con el caudal de agua residual se despeja el área superficial de la Ecuación 7:

$$A_S = \frac{Q}{L_w}$$

Ecuación 7. Carga hidráulica para el cálculo del área superficial.

En la que:

A_S : área superficial, m².

L_w : carga hidráulica, m³/m².d.

Q: caudal diario de ARD, m³/d. En caso de que no se tengan datos, se supone la producción de aguas residuales de 100 L/persona.d para personal permanente y de 50 L/persona.d para personal temporal de acuerdo con lo establecido en el Título E del RAS (MAVDT, 2000b).

- Otra alternativa es el método que incluye la cinética del proceso con la Ecuación 8:

$$A_S = \frac{Q (\ln C_o - \ln C_e)}{K_T * d * p}$$

Ecuación 8. Área superficial del HC-FSS.

En la que:

A_S : área superficial, m².

Q: caudal diario de ARD, m³/d. En caso de que no se tengan datos, se supone la producción de aguas residuales de 100 L/persona.d para personal permanente y de 50 L/persona.d para personal temporal de acuerdo con lo establecido en el Título E del RAS (MAVDT, 2000b).

- C_o : concentración del contaminante en el afluente (ingreso al humedal) como DBO_5 , mg/L. Suponga que la DBO_5 que sale del FAFA tiene un valor constante de 40 mg/L. Según MMA (2002), las ARD tienen una concentración media de DBO_5 de 200 mg/L y la eficiencia del sistema séptico hasta el FAFA es del 80%.
- C_e : concentración del contaminante en el efluente (salida del humedal) como DBO_5 , mg/L. Suponga que la DBO_5 del efluente del humedal no excederá los 10 mg/L.
- d: profundidad del agua en el humedal, m. Para el diseño, suponga que la profundidad efectiva del agua en el humedal es de 0,45 m. Para esta profundidad del agua, la profundidad del medio recomendada es de 0,60 m y un borde libre de 0,10 m. Crites *et al.* (2000), recomienda para la profundidad del agua un intervalo de 0,30 a 0,61 m, y para la profundidad del medio entre 0,46 a 0,76 m.
- p: porosidad o espacio utilizado por el agua para fluir a través del humedal, adimensional. Los valores se presentan en la Tabla 5.
- K_1 : Constante de velocidad de primer orden, d^{-1} . Depende del contaminante a eliminar (DBO_5 , SST, NT, PT, coliformes, entre otros) y de la temperatura a la que se realiza el proceso de tratamiento. Los valores de esta constante a 20°C se presentan en la Tabla 4. Registre la temperatura del agua en el humedal, si no la puede medir, suponga que está por debajo de la temperatura ambiente en 2°C. Para calcular la constante se emplea la Ecuación 2.

Tabla 5. Valores de porosidad (p) y de conductividad hidráulica (K_s) en función del tamaño efectivo (d_{10}) para HC-FSS.

Tipo de medio	d_{10} (mm)	p	K_s ($m^3/m^2.d$)
Arena gruesa	2	0,28-0,32	100-1000
Arena con grava	8	0,30-0,35	500-5000
Grava fina	16	0,35-0,38	1000-10000
Grava mediana	32	0,36-0,40	10000-50000
Roca triturada	128	0,38-0,45	50000-250000

Fuente: adaptado de Reed et al. (1998).

- b)** Adopte una relación de aspecto del humedal (largo:ancho) de, máximo, 4:1, valor que permite cumplir la ley de Darcy y, por lo tanto, no se tendrían inconvenientes en el diseño hidráulico del humedal, prescindiendo de otros cálculos hidráulicos. Si las condiciones del sitio no permiten que se adopte la relación largo:ancho de máximo 4:1, será necesario realizar los cálculos hidráulicos. El flujo está descrito por la ley de Darcy con la (Ecuación 9), que define el flujo en medios porosos:

$$\frac{Q}{d * W} = (K_s * s)$$

Ecuación 9. Velocidad de flujo.

En la que:

Q: caudal diario de ARD, m^3/d .

d: profundidad del agua en el humedal, m. Para el diseño, suponga que la profundidad efectiva del agua en el humedal es de 0,45 m. Para esta profundidad del agua, la profundidad del medio recomendada es de 0,60 m.

W: ancho del humedal, m.

K_s : conductividad hidráulica, $m^3/m^2.d$ (Tabla 5). La conductividad hidráulica (K_s) utilizada para el diseño nunca puede ser mayor que la del medio de soporte. Se debe reducir dicha conductividad en un orden de magnitud para tener en cuenta los efectos de atascamiento asociados a la retención de sólidos en los humedales.

s: pendiente de fondo del humedal, m/m. Se recomienda no usar la pendiente de fondo para ganar cabeza pues se corre el riesgo de dejar la entrada seca cuando haya condiciones de bajo caudal ($s = 0,01$).

Con la Ecuación 9 se realiza un proceso iterativo variando el ancho del humedal (W) (profundidad constante) hasta que se igualen ambos lados de la ecuación. El ancho que satisfaga esta condición será el ancho del humedal. Con este ancho (W) y el área superficial (A_s) obtenida mediante el procedimiento del punto a) se determina la longitud del humedal (L) mediante la Ecuación 5.

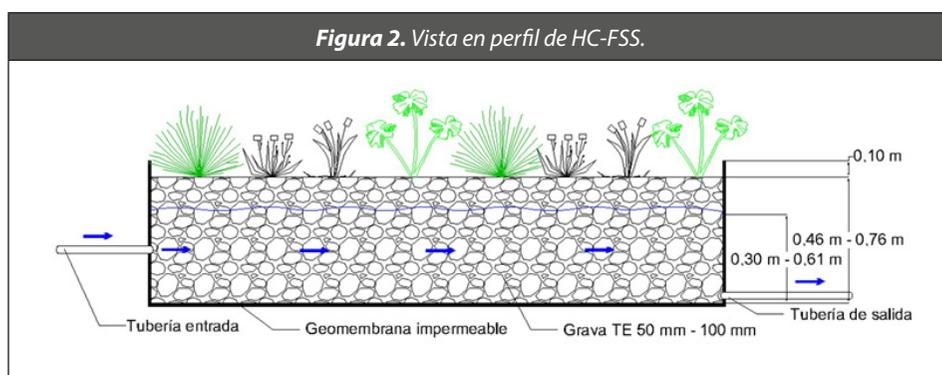
c) Algunas recomendaciones adicionales son:

- Utilice grava limpia y lavada como medio de soporte en el humedal con el fin de eliminar los granos finos que puedan taponar los poros del sustrato y, posiblemente, causen flujo superficial. La grava debe tener un tamaño efectivo medio entre 10,0 y 50,0 mm, una profundidad media del lecho de 0,60 m y que la profundidad en la entrada no sea menor de 0,30 m. Con profundidades mayores a 0,60 m, las raíces más profundas y los rizomas empiezan a debilitarse.
- Para prevenir la infiltración de contaminantes a las aguas subterráneas, es imprescindible contar con una barrera impermeable que confine el sistema. En la mayoría de estos sistemas se utilizan revestimientos sintéticos fabricados con materiales como el caucho EPDM, PVC o polietileno de alta densidad. Se recomienda utilizar una geomembrana de 20 mils debido a su alta resistencia mecánica, su precio asequible y sus propiedades físico-mecánicas, que la convierten en un material ideal para la impermeabilización. También debe construirse una berma de al menos 15 cm por encima del sustrato y 15 cm de ancho rodeando el humedal.
- Algunas especies de plantas emergentes utilizadas en los HC-FSS son: enea, bananito rojo, heliconias, pasto vetiver; además, Delgadillo *et al.* (2010) recomienda para este tipo de humedal

utilizar totora, carrizo y plantas de la familia Tifácea como: espadaña, enea, anea, junco, bayón, bayunco, bohordo, junco de la pasión, maza de agua. Cuando se utilice grava como medio, debido a que carece de nutrientes, se recomienda que las semillas se planten en un medio fértil con el fin de evitar problemas posteriores.

- Por último, el Título J del RAS 2000 (MAVDT, 2000a) da como sugerencia realizar una evaluación de las características del suelo, localización de cuerpos de agua, topografía, localización geográfica, líneas de propiedad y vegetación existente para ubicar adecuadamente el humedal.

La Figura 2 muestra las características de diseño de un HC-FSS.



3.3. Filtro Intermitente de Arena (FIA)

La sección 10.7.4.4.2. d el Titulo J del RAS 2000 (MAVDT, 2000a) sugiere algunos parámetros para el diseño de FIA.

- a) Se sugiere calcular el área superficial del filtro suponiendo una carga hidráulica (L_w) dentro del intervalo propuesto en la Tabla 6 empleando la Ecuación 10:

$$A_S = \frac{Q}{L_w}$$

Ecuación 10. Área superficial del FIA.

En la que:

A_s : área superficial, m^2 .

L_w : carga hidráulica, $m^3/m^2.d$.

Q : caudal diario de ARD, m^3/d . En caso de que no se tengan datos, se supone la producción de aguas residuales de 100 L/persona.d para personal permanente y de 50 L/persona.d para personal temporal de acuerdo con lo establecido en el Título E del RAS (MAVDT, 2000b).

Tabla 6. Parámetros de diseño para filtros intermitentes de arena.

Parámetro	Unidad	Intervalo
Carga hidráulica	$m^3/m^2.d$	0,3-0,6
Carga orgánica	$kg\ DBO_5/m^2.d$	0,002-0,010
Frecuencia de dosificación	veces/día	3,0-6,0
Volumen del tanque de entrada (efluente secundario del STARD)	m^3 (igual al caudal diario de ARD, m^3/d)	0,5-1,0
Pasos a través del filtro	Nº	1,0
Temperatura del medio filtrante	°C	>15,0

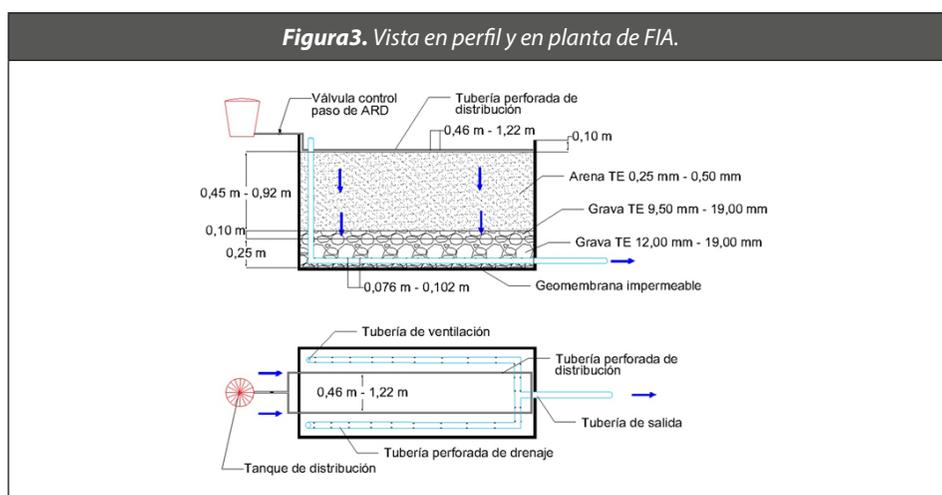
Fuente: adaptado de RAS 2000 (MAVDT, 2000a).

b) Algunas recomendaciones adicionales son:

- Utilice como medio filtrante arena con tamaño efectivo (d_{10}) entre 0,25 y 0,50 mm, coeficiente de uniformidad (CU) menor a 4,0 y de 0,45 a 0,92 m de altura.
- Para la distribución se recomienda emplear tuberías de diámetro entre 1 y 2", con un tamaño de orificio entre $1/8$ y $1/4$ ". Asimismo, se sugiere mantener un intervalo de espaciamientos laterales entre tuberías de 0,46 a 1,22 m y entre orificios en cada tubería.
- Para el drenaje se sugiere utilizar una capa de grava lavada resistente o piedra triturada con un tamaño efectivo de 9,5 a 19,0 mm en el lecho para facilitar el drenaje, así como tuberías de drenaje perforadas entre 7,6 a 10,2 cm de distancia entre orificios y tamaño de orificios entre $1/8$ y $1/4$ " con una pendiente del 0 al 1,0%.

- Adicionalmente, U.S.EPA (1999a) recomienda incluir dos capas de grava en el fondo del filtro, la primera capa recubriendo la línea de drenaje con grava gruesa y roca triturada (tamaño efectivo entre 12,0 y 19,0 mm), con una altura de 0,25 m, sobre esta capa se coloca grava en grano con altura de 0,10 m. En la parte superior del filtro, deje 0,10 m de borde libre.
- El extremo aguas arriba de la tubería de drenaje debe tener acoplada una tubería vertical de aireación, la cual sobresale en la superficie permitiendo el ingreso del aire para mantener aireadas las capas más profundas del medio, de esta manera se mejoran y favorecen los procesos de degradación aeróbica y la nitrificación.
- Para prevenir la infiltración de contaminantes a las aguas subterráneas, es imprescindible contar con una barrera impermeable que confine el sistema. En la mayoría de estos sistemas se utilizan revestimientos sintéticos fabricados con materiales como el caucho EPDM, PVC o polietileno de alta densidad. Se recomienda utilizar una geomembrana de 20 mils debido a su alta resistencia mecánica, su precio asequible y sus propiedades físico-mecánicas, que la convierten en un material ideal para la impermeabilización. También debe construirse una berma de al menos 15 cm por encima del sustrato y 15 cm de ancho rodeando el filtro.

La Figura 3 muestra las características de un FIA.



3.4. Filtro Verde (FV)

Los FV son sistemas de flujo subsuperficial vertical con descarga que operan con cargas de alrededor 20 g DBO/m².d. Las recomendaciones para el diseño son extraídas de García y Corzo (2008).

- a) El área superficial requerida se relaciona con la tasa de carga expresada en equivalentes de habitantes y varía según el nivel implícito de tratamiento (remoción de DBO o nitrógeno) (Kadlec y Wallace, 2009). La Ecuación 11, propuesta por Cooper (2005), relaciona los parámetros más utilizados para calcular el área superficial requerida para un FV:

$$A_s = m * h^b$$

Ecuación 11. Área superficial del FV con modelo cinético de primer orden.

En la que:

A_s : área superficial, m².

m : factor de escala, adimensional. Para el diseño, utilice un valor de 2 con el objetivo de remover DBO y nitrógeno amoniacal, de acuerdo con la Tabla 7.

h : habitantes equivalentes.

b : exponente. Con el objetivo de remover DBO y nitrógeno amoniacal utilice un valor de exponente de 1, según la Tabla 7.

Tabla 7. Factor de escala (m) y exponente (b) para calcular el área requerida en FV.

Objetivos de remoción	m	b
DBO	1,0	1,0
DBO y nitrógeno amoniacal	2,0	1,0
Reducción del 95% de la DBO	3,0	1,0

Fuente: adaptado de Kadlec y Wallace (2009).

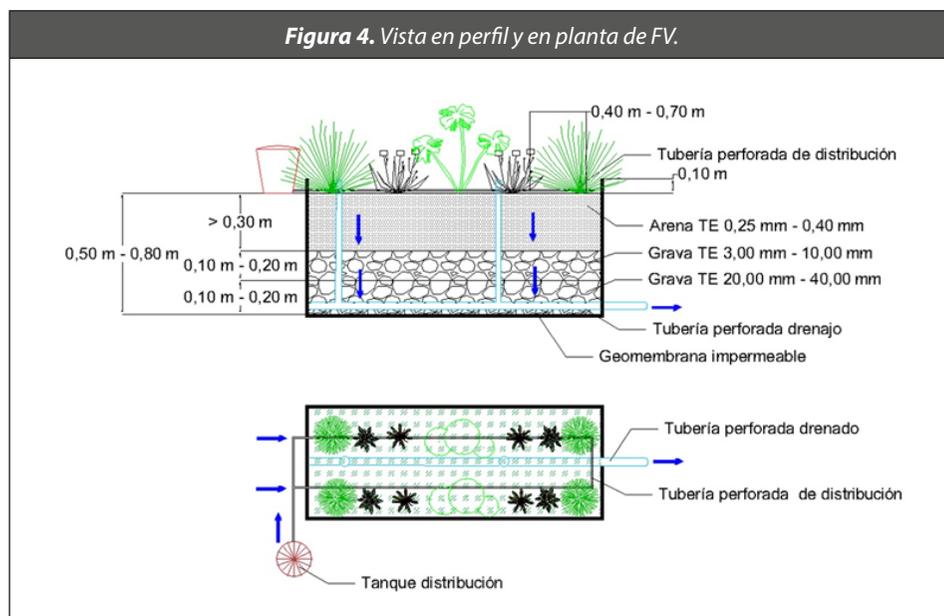
b) Algunas recomendaciones adicionales son:

- Se recomienda implementar una profundidad total entre 0,50 y 0,80 m y un borde libre de 0,10 m. El medio granular se distribuye en tres capas horizontales con diferentes tamaños de partícula. La capa superior con espesor mayor o igual a 0,30 m, con arena gruesa de tamaño efectivo entre 0,25 a 0,40 mm, seguida por una capa intermedia de espesor entre 0,10 a 0,20 m con grava de 3,0 a 10,0 mm de tamaño efectivo, y finalmente una capa inferior de grava gruesa de 20 a 40 mm de tamaño efectivo, con un espesor de 0,10 a 0,20 m. Esta configuración se elige para regular el flujo del agua a través del lecho, evitando que sea demasiado rápido o lento.
- Se recomienda instalar un tanque de almacenamiento del efluente secundario del STARD con capacidad igual o mayor al volumen de agua residual generado diariamente (se aconseja emplear tanques fabricados en polietileno).
- Para la distribución del agua en todo el sistema se recomienda emplear tuberías de diámetro entre 1½ y 2" y deben tener orificios de $\frac{3}{16}$ a $\frac{1}{4}$ " colocados en la parte inferior de las tuberías separados entre 0,4 a 0,7 m (Brix y Arias, 2005).
- El drenaje del agua se lleva a cabo mediante redes de tuberías perforadas ubicadas en el fondo y a lo largo del lecho, con diámetro de 6" (Brix y Arias, 2005). Esta tubería se cubre con una capa de grava gruesa (entre 0,10 y 0,20 m de espesor), con el fin de evitar que el medio granular más fino ingrese por las perforaciones de la tubería.
- En la tubería de drenaje se acopla una tubería vertical de aireación, la cual sobresale en la superficie permitiendo el ingreso del aire para mantener aireadas las capas más profundas del medio, de esta manera se mejoran y favorecen los procesos de degradación aeróbica y la nitrificación. Se recomienda instalar las tuberías de aireación con 1 m de separación entre ellas (Brix y Arias, 2005).
- Para prevenir la infiltración de contaminantes a las aguas subterráneas, es imprescindible contar con una barrera impermeable que confine el sistema. En la mayoría de estos sistemas se utilizan revestimientos sintéticos fabricados con

materiales como el caucho EPDM, PVC o polietileno de alta densidad. Se recomienda utilizar una geomembrana de 20 mils debido a su alta resistencia mecánica, su precio asequible y sus propiedades físico-mecánicas, que la convierten en un material ideal para la impermeabilización. También debe construirse una berma de al menos 15 cm por encima del sustrato y 15 cm de ancho rodeando el filtro.

- Para este tipo de filtro se recomienda utilizar macrófitas emergentes como tipo de vegetación; las más utilizadas son: cortadera, rume, junco de laguna, hierba del maná, carrizo, lirio amarillo, espadaña amarilla, eneas y juncos y espadañas en general.

La Figura 4 muestra las características de diseño de un FV.



3.5. Filtro Verde Descarga Cero (FV-DZ)

Las recomendaciones para el diseño de estos sistemas se basan en Rodríguez *et al.* (2022b).

- a) El área requerida para un FV-DZ se calcula utilizando la Ecuación 12, la cual considera el volumen de agua residual generado

así como las tasas promedio de retención de humedad del suelo y de evapotranspiración de la vegetación sembrada:

$$A_S = \frac{Q}{T_{RE}}$$

Ecuación 12. Área superficial del FV-DZ.

En la que:

A_S : área superficial, m².

Q: caudal diario de ARD, L/d. En caso de que no se tengan datos, se supone la producción de aguas residuales de 100 L/persona.d para personal permanente y de 50 L/persona.d para personal temporal de acuerdo con lo establecido en el Título E del RAS (MAVDT, 2000b).

T_{RE} : tasa promedio de retención de humedad del suelo y de evapotranspiración de la vegetación sembrada, mm/d. Para el caso de filtros verdes sembrados con pasto vetiver y operando con agua residuales de baja carga, como es el caso del ARD, puede utilizarse para su diseño el valor promedio de tasa de retención-evapotranspiración de 21,98 mm/d (21,98 L/m².d) (Rodríguez *et al.*, 2022b).

b) Algunas recomendaciones adicionales son:

- Se recomienda utilizar una profundidad total del filtro entre 0,9 y 1,2 m, con una pendiente máxima del 1,0% y deje un borde libre de 0,10 m.
- Se recomienda instalar un tanque de almacenamiento del efluente secundario del STARD con capacidad igual o mayor al volumen de agua residual generado diariamente (se aconseja emplear tanques fabricados en polietileno), que se utilizará como tanque de distribución al filtro verde.
- Para la distribución del agua residual en el área cultivada del filtro verde, se recomienda utilizar una tubería de PVC-P de ½" elevada mínimo 0,25 m. En esta tubería se deben realizar perforaciones de

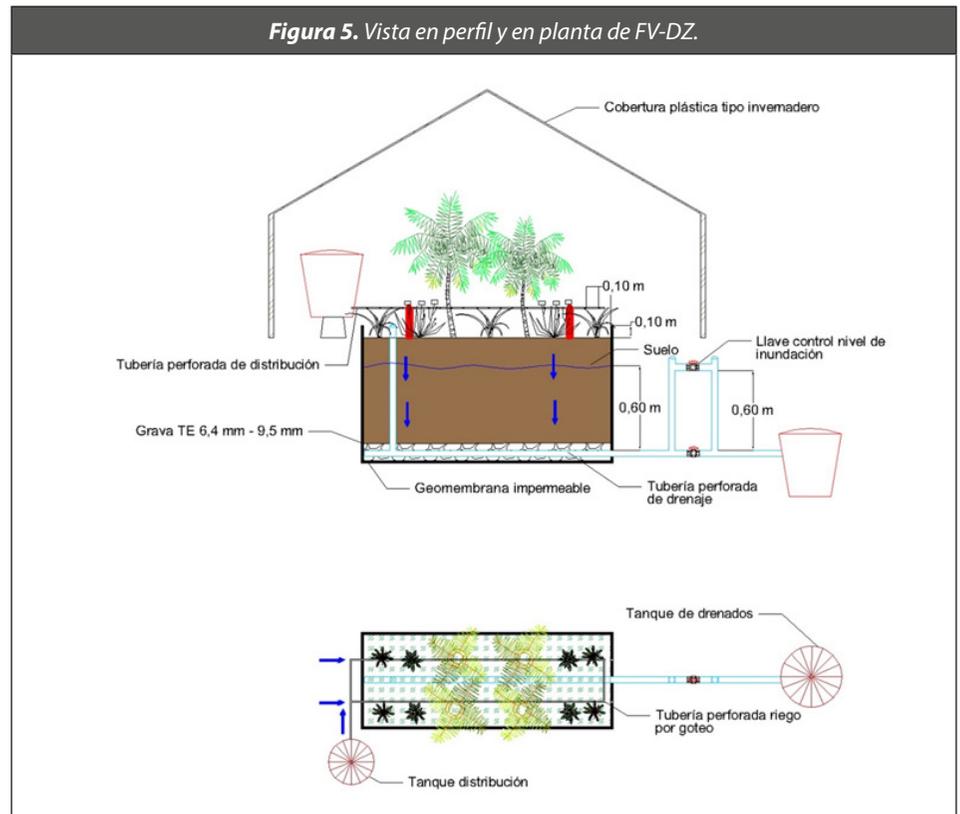
$\frac{3}{32}$ ”, espaciadas cada 10 cm. Estas perforaciones deben ubicarse en dos líneas en la parte inferior de la circunferencia del tubo, formando un ángulo de 45° y con un traslape de 5 cm entre las dos líneas de perforaciones (Rodríguez *et al.*, 2022b).

- Los drenados que puedan surgir en el área de cultivo van a depender de la temperatura del entorno; en días fríos, lluviosos o con escasa exposición solar, es posible que no se logre la completa evaporación y transpiración del agua aplicada, lo que puede resultar en una porción que requiere ser drenada. Por tanto, es crucial recolectarla en un tanque de drenados y reintroducirla en el área cultivada del filtro verde, con el fin de alcanzar la meta de cero emisiones líquidas. Esto es posible hacerlo mediante acarreo o con bombeo desde el tanque de drenados hasta el tanque de distribución.
- Para la línea de drenaje se sugiere ubicar la tubería en un canal central recubierto de gravilla únicamente en el ancho y recubrirla en su base con polisombra. La tubería de drenaje debe tener un diámetro de 3” y estar perforada en la mitad superior de su circunferencia con agujeros de $\frac{5}{16}$ ”.
- Con el fin de facilitar la aireación del suelo del filtro verde, se acoplan tuberías verticales de aireación a la tubería de drenaje cada 3 m. Estas tuberías sobresalen a la superficie permitiendo el ingreso del aire para mantener aireadas las capas más profundas del medio, de esta manera se mejoran y favorecen los procesos de degradación aeróbica y la nitrificación.
- El filtro verde debe permanecer inundado para favorecer los procesos de evapotranspiración. Por lo tanto, a la salida de la tubería de aireación y drenaje (una vez perforada la geomembrana), se acopla un adaptador hembra PVC-P de 2”, un tramo de 50 cm de longitud de tubo PVC-S de 2”, una unión PVC-S de 2” y una reducción de PVC de 2 a 1 ½” y allí se instala la unidad de control de inundación que está conformada por dos llaves PVC-P de 1½”, una instalada a nivel de piso y otra a 60 cm de altura. La primera sirve para realizar mantenimiento y eliminar lodos adheridos en la tubería de descarga de drenados y la segunda sirve para mantener el nivel de inundación dentro del

filtro verde a 60 cm de altura. Durante la operación del FV-DZ la primera llave debe permanecer cerrada y la segunda llave debe permanecer abierta.

- El agua drenada que supera el nivel de inundación (60 cm) se conduce a un tanque de drenados para ser reincorporada al tanque de distribución. La capacidad de almacenamiento del tanque de recolección de drenados debe ser igual o mayor al volumen de agua residual generado diariamente (se aconseja emplear tanques fabricados en polietileno).
- Para prevenir la infiltración de contaminantes a las aguas subterráneas, es imprescindible contar con una barrera impermeable que confine el sistema. En la mayoría de estos sistemas se utilizan revestimientos sintéticos fabricados con materiales como el caucho EPDM, PVC o polietileno de alta densidad. Se recomienda utilizar una geomembrana de 20 mils debido a su alta resistencia mecánica, su precio asequible y sus propiedades físico-mecánicas, que la convierten en un material ideal para la impermeabilización.
- Se sugiere instalar una cobertura plástica tipo invernadero, en plástico agrolene calibre 7 o superior, hasta una altura de 2 m sobre el nivel del filtro y dejando una pestaña de 20 cm libre en la parte superior de las paredes para permitir la salida del aire húmedo y caliente.

La Figura 5 muestra las características de diseño de un FV-DZ.



3.5. Filtro Verde Evaporativo de Flujo Ascendente (FV-EFA)

Las recomendaciones para el diseño de estos sistemas se basan en Paulo *et al.* (2019) y Boulware (2013).

- a) La Ecuación 13, planteada por Boulware (2013), permite estimar el área superficial requerida para evapotranspirar las ARD generadas, considerando que la tasa de evapotranspiración sea mayor a la precipitación local, de modo que habrá una transpiración neta de la humedad que ingresa al lecho.

$$A_S = \frac{K_i Q}{T_{RE} - P}$$

Ecuación 13. Área superficial del FV-EFA.

En la que:

A_s : área superficial, m^2 .

Q : caudal diario de ARD, L/d. En caso de que no se tengan datos, se supone la producción de aguas residuales de 100 L/persona.d para personal permanente y de 50 L/persona.d para personal temporal de acuerdo con lo establecido en el Título E del RAS (MAVDT, 2000b).

K_i : coeficiente de infiltración, adimensional. Varía entre 0 y 1; de acuerdo con Paulo *et al.* (2019), se sugiere utilizar un valor de 0,5.

T_{RE} : tasa promedio de retención de humedad del suelo y de evapotranspiración de la vegetación sembrada, mm/d. Para el caso de filtros verdes sembrados con pasto vetiver y operando con agua residuales de baja carga, como es el caso del ARD, puede utilizarse para su diseño el valor promedio de tasa de retención-evapotranspiración de 21,98 mm/d (21,98 L/ m^2 -d) (Rodríguez *et al.*, 2022b)

P : tasa de precipitación media diaria de la zona de estudio, mm/d.

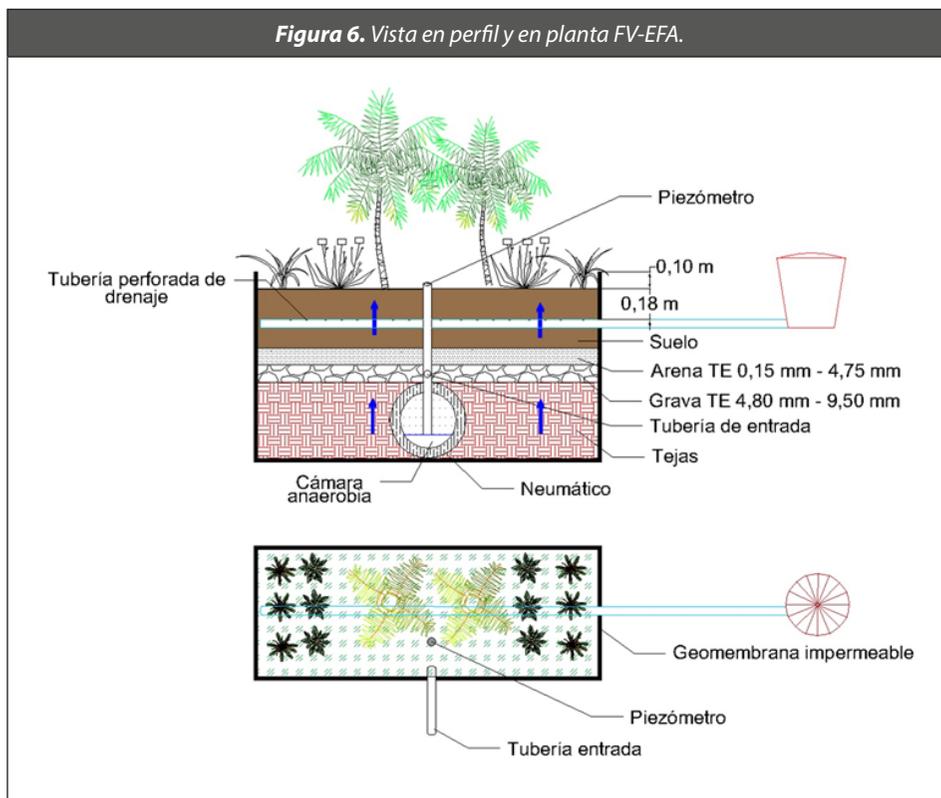
b) Algunas recomendaciones adicionales son:

- La profundidad total del filtro debe ser máximo de 1,2 m y mínimo de 1,0 m (Boulware, 2013). Se sugiere una profundidad total de 1,0 m y colocar un borde libre de 0,10 m de altura sobre el nivel del suelo para evitar inundaciones por la escorrentía de agua lluvia (Paulo *et al.*, 2019).
- Es necesario instalar una línea de drenaje a la salida del filtro con la finalidad de derivar el agua desbordada; es decir, cuando no toda el agua que ingresa al sistema como afluente o lluvia pueda ser evaporada por las plantas, el efluente drenado sería dirigido hacia una caja de inspección. La tubería se localiza a 0,18 m por debajo de la superficie del suelo, en la capa superior (Paulo *et al.*, 2019).
- La cámara anaeróbica dentro del filtro es donde se reciben las aguas residuales. Esta cámara permite que los sólidos se sedimenten y se digieran parcialmente mediante digestión

anaeróbica, evitando la obstrucción de los medios filtrantes del tanque. Cuando sube el nivel del agua en el sistema, las capas superiores, de grava y arena, también se inundan, hasta que el nivel del agua alcanza la capa superior (Paulo *et al.*, 2019). Se recomienda construir la cámara anaeróbica de acuerdo con lo planteado en el piloto desarrollado por Paulo *et al.* (2019): se acondiciona un compartimento central a lo largo del fondo del filtro utilizando llantas de automóvil dispuestas con espacios entre ellas para permitir el flujo del efluente. El agua residual que ingresa es dirigida hacia este compartimento, que a su alrededor está recubierta con una capa de tejas de 0,45 m de espesor. Sobre las tejas se colocan las siguientes capas: grava gruesa con un espesor de 0,10 m (con tamaños entre 4,8 a 9,5 mm y porosidad de 0,50), arena con un espesor de 0,10 m (con tamaños entre 0,15 a 4,75 mm) y suelo con un espesor de 0,35 m. Las tejas y la grava usadas actúan como medio filtrante y de soporte para la formación de biopelículas, lo que permite considerar el FV-EFA como un sistema 2 en 1.

- Para prevenir la infiltración de contaminantes a las aguas subterráneas, es imprescindible contar con una barrera impermeable que confine el sistema. En la mayoría de estos sistemas se utilizan revestimientos sintéticos fabricados con materiales como el caucho EPDM, PVC o polietileno de alta densidad. Se recomienda utilizar una geomembrana de 20 mils debido a su alta resistencia mecánica, su precio asequible y sus propiedades físico-mecánicas, que la convierten en un material ideal para la impermeabilización. También debe construirse una berma de al menos 15 cm por encima del sustrato y 15 cm de ancho rodeando el filtro.
- Se recomienda emplear una mayor relación largo:ancho con la finalidad de aumentar el perímetro del filtro y, en consecuencia, el índice de área foliar de las plantas que tiende a ser significativamente mayor cerca de los bordes; por lo general se recomienda optar por una relación 4:1.
- Es necesario incluir además del pasto vetiver, vegetación propia de la flora local, que pueda crecer fácilmente en las condiciones ambientales donde se va a instalar el filtro.

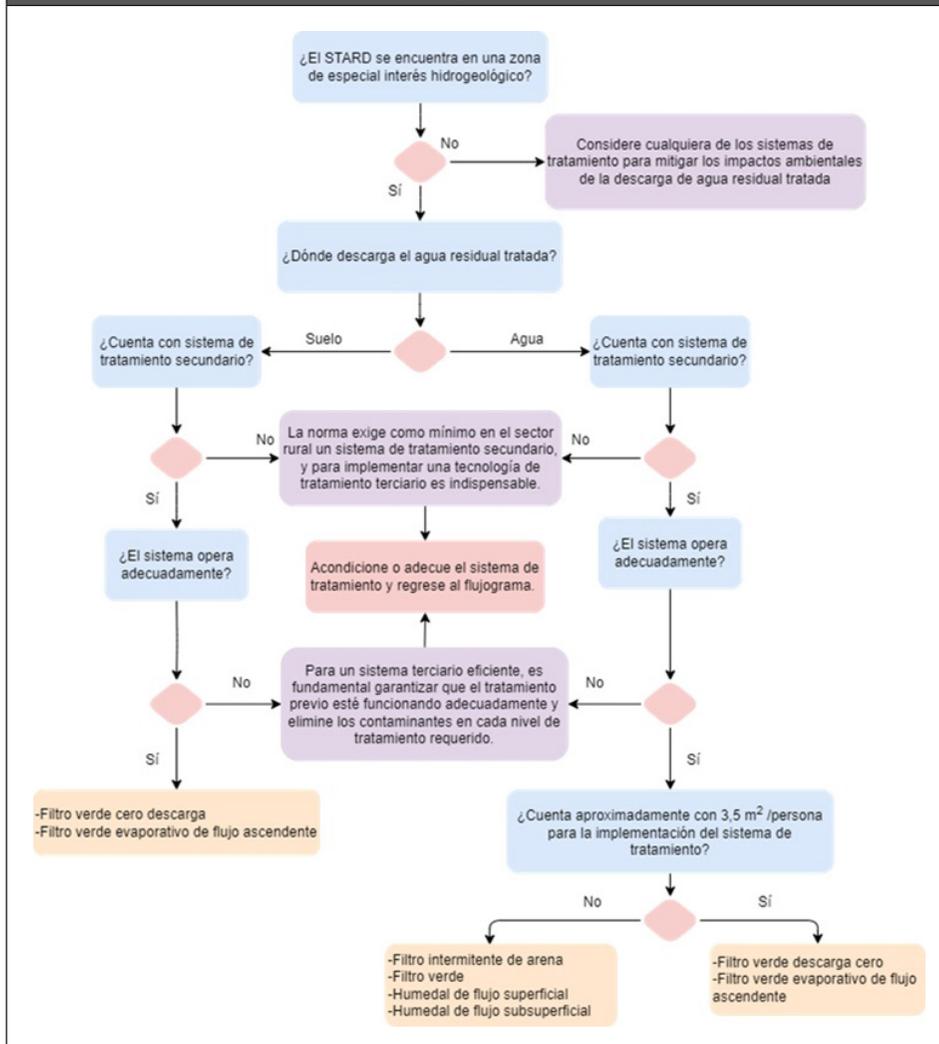
La Figura 6 muestra las características de diseño de un FV-EFA.



4. Selección de alternativa de tratamiento

Las alternativas de tratamiento terciario para viviendas rurales dispersas en zonas de interés hidrogeológico tienen la capacidad de remover componentes contaminantes que pueden afectar la calidad del agua subterránea. Para seleccionar la alternativa de tratamiento terciario más adecuada se desarrolló el flujograma presentado en la Figura 7. Este flujograma permite identificar rápidamente qué tecnología debe implementarse, según las características de cada lugar.

Figura 7. Flujograma de selección de alternativas de tratamiento terciario para viviendas rurales dispersas.



Inicialmente se considera si el STARD actual se encuentra en una zona de interés hidrogeológico. En caso de ser afirmativa la respuesta, se evalúa la siguiente condición: si el efluente se vierte al suelo o a una fuente hídrica superficial. Esto condiciona los vertimientos al suelo en zonas de interés hidrogeológico a tecnologías con descarga cero, como la implementación de un FV-DZ o un FV-EFA. Por otro lado, si la descarga se realiza a una fuente hídrica superficial, se puede considerar implementar cualquiera de las alternativas consideradas y el factor limitante será el área disponible por el usuario.

Finalmente, para implementar una alternativa de tratamiento terciario eficiente, es fundamental asegurarse de que el tratamiento previo funcione adecuadamente y cumpla con la remoción de contaminantes específicos en cada nivel de tratamiento.

4. Agradecimientos

Esta investigación hizo parte del convenio 131 de 2022 entre la Universidad de Antioquia y la Corporación Autónoma Regional de Caldas (CORPOCALDAS) con el objetivo de aunar esfuerzos técnicos, administrativos y financieros para elaborar una guía metodológica para el tratamiento terciario de las aguas residuales domésticas en áreas rurales, orientada a la protección de las aguas subterráneas en zonas de especial interés hidrogeológico en el departamento de Caldas.

5. Referencias

- Achak, M.; Boumya, W.; Ouazzani, N.; Mandi, L. (2019). Preliminary evaluation of constructed wetlands for nutrients removal from olive mill wastewater (OMW) after passing through a sand filter. *Ecological Engineering*, 136, 141-151. <https://doi.org/10.1016/j.ECOLENG.2019.06.007>
- Arceivala, S. J.; Shyam, R. A. (2007a). Natural Systems – 1 Classical Algal Ponds for Treatment and Resource Recovery. Chapter 9 in *Wastewater Treatment for Pollution Control and Reuse*. 3rd Ed. McGraw Hill Education. <https://www-accessengineeringlibrary-com.udea.lookproxy.com/content/book/9780070620995/chapter/chapter9>
- Arceivala, S. J.; Shyam, R. A. (2007b). Natural Systems – 2 Hyacinth and Duckweed Ponds, Fish Ponds, Natural and Constructed Wetlands, and Vermiculture. Chapter 10 in *Wastewater Treatment for Pollution Control and Reuse*. 3rd Ed. McGraw Hill Education. <https://www-accessengineeringlibrary-com.udea.lookproxy.com/content/book/9780070620995/chapter/chapter10>
- Arceivala, S. J.; Shyam, R. A. (2007c). Some Aerobic Biological Treatment Methods. Chapter 6 in *Wastewater Treatment for Pollution Control and Reuse*. 3rd Ed. McGraw Hill Education. <https://www-accessengineeringlibrary-com.udea.lookproxy.com/content/book/9780070620995/chapter/chapter6>

- Arceivala, S. J.; Shyam, R. A. (2007d). Some Physico-Chemical Methods and Membrane Technologies. Chapter 12 in *Wastewater Treatment for Pollution Control and Reuse*. 3rd Ed. McGraw Hill Education. <https://www-accessengineeringlibrary-com.udea.lookproxy.com/content/book/9780070620995/chapter/chapter12>
- Badejo, A. A.; Omole, D. O.; Ndambuki, J. M.; Kupolati, W. K. (2017). Municipal wastewater treatment using sequential activated sludge reactor and vegetated submerged bed constructed wetland planted with *Vetiveria zizanioides*. *Ecological Engineering*, 99, 525-529. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLENG.2016.11.012>
- Barroso, J. C. A.; Silva, M. C. de A.; Hoyos, N. L. M.; Monteggia, L. O. (2022). Evaluation of UASB effluent post-treatment in pilot-scale by microalgae HRP and macrophytes pond for nutrient recovery. *Journal of Cleaner Production*, 357, 131951. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2022.131951>
- Bernal, D. P.; Cardona, D. A.; Galvis, A.; Peña, M. R. (2015). Guía de selección de tecnología para el tratamiento de aguas residuales domésticas por métodos naturales. En *Seminario Internacional sobre Métodos Naturales para el Tratamiento de Aguas Residuales*, Instituto CINARA, Universidad del Valle, Cali, Colombia, 19-27.
- Boulware, E. W. (2013). Biological Filter and Constructed Wetland Systems. Chapter 13 in *Alternative Water Sources and Wastewater Management*. 1st Ed. McGraw-Hill Education. <https://www-accessengineeringlibrary-com.udea.lookproxy.com/content/book/9780071719513/chapter/chapter13>
- Brix, H.; Arias, C. A. (2005). The use of vertical flow constructed wetlands for on-site treatment of domestic wastewater: New Danish guidelines. *Ecological Engineering*, 25(5), 491-500. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2005.07.009>
- Chen, S.; Wang, M.; Russo, F. M.; Gobler, C. J.; Mao, X. (2022). Efficient nitrogen removal from onsite wastewater by a novel continuous flow biofilter. *Chemosphere*, 300, 134642. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2022.134642>
- Cooper, P. F. (2005). The performance of vertical flow constructed wetland systems with special reference to the significance of oxygen transfer and hydraulic loading rate. *Water Science and Technology*, 51(9), 81-90. <https://doi.org/10.2166/wst.2005.0293>
- Crites, R. W.; Tchobanoglous, G. (2000). *Sistemas de manejo de aguas residuales: Para núcleos pequeños y descentralizados*. McGraw-Hill.
- Crites, R. W.; Middlebrooks, E. J.; Bastian, R. K.; Reed, S. C. (2006). *Natural wastewater treatment systems*. CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Delgadillo, O.; Camacho, A.; Pérez, L. F.; Andrade, M. (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*. Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua (Centro AGUA), Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia.

- Dornelles, H. de S.; Camargo, F. P.; Silva, E. L.; Varesche, M. B. A. (2023). Microbial community stratification in scale-up anaerobic fluidized bed reactor applied for 4-nonylphenol degradation. *Bioresource Technology Reports*, 21, 101359. <https://doi.org/10.1016/J.BITEB.2023.101359>
- El-Shafai, S. A.; El-Gohary, F. A.; Nasr, F. A.; Steen, N. P. van der; Gijzen, H. J. (2007). Nutrient recovery from domestic wastewater using a UASB-duckweed ponds system. *Bioresource Technology*, 98(4), 798-807.
- Foster, S.; Hirata, R. (2002). *Protección de la calidad del agua subterránea: Guía para empresas de agua, autoridades municipales y agencias ambientales*. Mundi-prensa, Banco Mundial. <https://documents1.worldbank.org/curated/en/229001468205159997/pdf/25071PUB01Spanish10BOX0334116B01PUBLIC1.pdf>
- Gao, S.; Peng, Y.; Wang, S.; Yan, J. (2006). Novel strategy of nitrogen removal from domestic wastewater using pilot Orbal oxidation ditch. *Journal of Environmental Sciences*, 18(5), 833-839. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(06\)60001-6](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(06)60001-6)
- García, J.; Corzo, A. (2008). *Guía práctica de diseño, construcción y explotación de sistemas de humedales de flujo subsuperficial. Depuración con humedales construidos*. Universidad Politécnica de Catalunya. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/2474>
- Gordon, B. A.; Lenhart, C.; Peterson, H.; Gamble, J.; Nieber, J.; Current, D.; Brenke, A. (2021). Reduction of nutrient loads from agricultural subsurface drainage water in a small, edge-of-field constructed treatment wetland. *Ecological Engineering*, 160, 106128. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLENG.2020.106128>
- Graaf, A. A. van de; Bruijn, P. de; Robertson, L. A.; Jetten, M. S.; Kuenen, J. G. (1996). Crecimiento autótrofo de microorganismos anaerobios oxidantes de amonio en un reactor de lecho fluidizado. *Microbiología*, 142(8), 2187-2196.
- Guerrero, T. E.; Anaya, Ó. G. (2019). Eficiencia de la resina Lewatit monoplus m 600 en la remoción de nitratos en aguas para consumo humano. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 85(2), 153-162. http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1810-634X2019000200004&lng=es&tyt=es
- Gunes, K.; Masi, F.; Ayaz, S.; Tuncsiper, B.; Besiktas, M. (2021). Domestic wastewater and surface runoff treatment implementations by constructed wetlands for Turkey: 25 years of experience. *Ecological Engineering*, 170, 106369. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLENG.2021.106369>
- Kadlec, R.; Wallace, S. (2009). *Treatment Wetlands*. 2nd Ed., CRC Press, pp. 611.
- MADS (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible). (2015a). *Resolución 0631 de 2015*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Bogotá, Colombia.
- MADS (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible). (2015b). *Decreto 1076 de 2015. Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Bogotá, Colombia.

- MADS (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible). (2018). *Decreto 050 de 2018*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Bogotá, Colombia.
- MAVDT (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial). (2000a). *Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS 2000). Título J. Alternativas Tecnológicas en Agua y Saneamiento para el Sector Rural*. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Bogotá, Colombia. https://minvivienda.gov.co/sites/default/files/documentos/100811_titulo_j_ras-.pdf
- MAVDT (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial). (2000b). *Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS 2000). Título E. Tratamiento de aguas residuales*. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Bogotá, Colombia. https://www.minvivienda.gov.co/sites/default/files/documentos/010710_ras_titulo_e_.pdf
- Metcalf & Eddy. (1996). *Ingeniería de aguas residuales: Tratamiento, vertido y reutilización*. 3ra Ed., Vol. 1., pp. 125. McGraw-Hill.
- MMA (Ministerio del Medio Ambiente). (2002). *Gestión para el manejo, tratamiento y disposición final de las aguas residuales municipales*. Ministerio del Medio Ambiente, Bogotá, Colombia. <http://hdl.handle.net/20.500.12324/18911>
- Morais, E. G. de; Amaro, J. C.; Cerqueira, P. R.; Dimas, C.; Sousa, V. S.; Gomes, N.; Ribau, M.; Nunes, L. M.; Varela, J.; Barreira, L. (2022). Tertiary urban wastewater treatment with microalgae natural consortia in novel pilot photobioreactors. *Journal of Cleaner Production*, 378, 134521. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134521>
- Nelson, M. J.; Nakhla, G.; Zhu, J. (2021). The circulating fluidized bed bioreactor as a biological nutrient removal process for municipal wastewater treatment: Process modelling and costing analysis. *Journal of Environmental Management*, 299, 113604. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113604>
- OMS (Organización Mundial de la Salud). (2018). *Guías para la calidad del agua de consumo humano*, 4ta Ed. Organización Mundial de la Salud. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/272403>
- Paulo, P. L.; Galbiati, A. F.; Magalhães Filho, F. J. C.; Bernardes, F. S.; Carvalho, G. A.; Boncz, M. A. (2019). Evapotranspiration tank for the treatment, disposal and resource recovery of blackwater. *Resources, Conservation and Recycling*, 147, 61-66. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.04.025>
- Reed, S. C.; Crites, R. W.; Middlebrooks, E. J. (1998). *Natural Systems for Waste Management and Treatment*. 2nd Ed. McGraw-Hill.
- Rodríguez-Valencia, N.; Quintero-Yepes, L.; Castañeda, S. A. (2022a). *Construya y opere un humedal artificial para el postratamiento de las aguas residuales de su finca cafetera*. Centro Nacional de Investigación de Café (CENICAFÉ), Colombia. <https://doi.org/10.38141/cenbook-0013>
- Rodríguez-Valencia, N.; Quintero-Yepes, L.; Castañeda, S. A. (2022b). *Tecnología*

de filtros verdes para el manejo, tratamiento y descarga ceros de las aguas residuales de la finca cafetera. Centro Nacional de Investigación de Café (CENICAFÉ), Colombia. <https://doi.org/10.38141/cenbook-0029>

- Rout, P. R.; Shahid, M. K.; Dash, R. R.; Bhunia, P.; Liu, D.; Varjani, S.; Zhang, T. C.; Surampalli, R. Y. (2021). Nutrient removal from domestic wastewater: A comprehensive review on conventional and advanced technologies. *Journal of Environmental Management*, 296, 113246. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113246>
- Silva, S. A.; Oliveira, R. de; Soares, J.; Mara, D. D.; Pearson, H. W. (1995). Nitrogen removal in pond systems with different configurations and geometries. *Water Science and Technology*, 31(12), 321–330. [https://doi.org/10.1016/0273-1223\(95\)00520-W](https://doi.org/10.1016/0273-1223(95)00520-W)
- Sperling, M. von. (2005). *Waste Stabilisation Ponds*. Volume 3 in *Biological Wastewater Treatment Series*, IWA Publishing, London, UK, pp. 17.
- SSPD (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios). (2021). *Informe Sectorial de los Servicios Públicos Domiciliarios de Acueducto y Alcantarillado*. Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, Bogotá, Colombia. <https://www.superservicios.gov.co/sites/default/files/inline-files/Informe-sectorial-SSPD-2021.pdf>
- U.S. EPA. (1999a). *Folleto informativo de tecnología de aguas residuales: filtros intermitentes de arena*. EPA 932-F-99-067. United States Environmental Protection Agency. https://www3.epa.gov/npdes/pubs/septic_fs_intermittent_sp.pdf
- U.S. EPA. (1999b). *Wastewater technology fact sheet: sequencing batch reactors*. EPA 932-F-99-073. United States Environmental Protection Agency. https://www3.epa.gov/npdes/pubs/sbr_new.pdf
- U.S. EPA. (2000a). *Folleto informativo de tecnología de aguas residuales: humedales de flujo libre superficial*. EPA 832-F-00-024. United States Environmental Protection Agency. https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-06/documents/cs_00_024.pdf
- U.S. EPA. (2000b). *Folleto informativo de tecnología de aguas residuales: humedales de flujo subsuperficial*. EPA 832-F-00-023. United States Environmental Protection Agency. https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-06/documents/cs_00_023.pdf
- U.S. EPA. (2000c). *Wastewater technology fact sheet oxidation ditches*. EPA 832-F-00-013. United States Environmental Protection Agency. https://www3.epa.gov/npdes/pubs/oxidation_ditch.pdf
- U.S. EPA. (2002a). *Wastewater technology fact sheet: rapid infiltration land treatment*. EPA-625/4-73-001b. United States Environmental Protection Agency. https://www3.epa.gov/npdes/pubs/final_rapidinfiltration.pdf

- U.S. EPA. (2002b). *Wastewater technology fact sheet: slow rate land treatment*, 1-7. United States Environmental Protection Agency. <https://www3.epa.gov/npdes/pubs/sloratre.pdf>
- Valencia, J. (2014). *Evaluación de humedales evaporativos para el post tratamiento de aguas residuales domésticas*. Tesis de Maestría en Ecotecnología, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia.
- Vidal, G.; Hormazábal, S. (2018). *Humedales construidos: diseño y operación*. Universidad de Concepción.
- Yang, P.; Hou, R.; Li, D.; Yuan, R.; Wang, F.; Chen, Z.; Zhou, B.; Chen, H. (2022). Nitrogen removal from rural domestic wastewater by subsurface wastewater infiltration system: A review. *Process Safety and Environmental Protection*, 159, 309-322. <https://doi.org/10.1016/J.PSEP.2022.01.012>