

Propuesta de herramienta para la selección de Tecnologías para el Tratamiento Descentralizado de Aguas Residuales en Asentamientos no Planificados de Países Tropicales en Desarrollo, Caso de estudio: Asentamiento Los Santos Bajo (Bucaramanga)

Jesús David Álvarez Trujillo

Trabajo de grado

Para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil

Directora

Isabel Cristina Domínguez Rivera

Ph.D. Agriculture, Food and Rural Development

Codirector

Edgar Ricardo Oviedo Ocaña

Ph.D. Ingeniería, énfasis Ingeniería Sanitaria y Ambiental

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Maestría en ingeniería civil

2024

Tabla de Contenido

| | Pág. |
|--|-------------|
| INTRODUCCIÓN | 13 |
| 1. ANTECEDENTES, MARCO TEÓRICO, CONCEPTUAL Y SITUACIÓN ACTUAL | 17 |
| 1.1 Características de las aguas residuales de origen doméstico en asentamientos no planificados | 17 |
| 1.2 Sistemas descentralizados para el tratamiento de aguas residuales en asentamientos no planificados | 19 |
| 1.3 Tecnologías con mayor potencial para el tratamiento descentralizado de aguas residuales (TDAR) | 19 |
| 1.3.1 Tratamiento preliminar | 20 |
| 1.3.2 Tratamiento primario | 20 |
| 1.3.3 Tratamiento secundario de aguas residuales | 21 |
| 1.3.4 Tratamiento terciario de aguas residuales | 23 |
| 1.4 Sostenibilidad y economía circular como enfoques para el tratamiento de aguas residuales domésticas en asentamientos no planificados | 23 |
| 1.5 Sistemas descentralizados de tratamiento de aguas residuales en países en desarrollo | 24 |
| 1.6 Selección de tecnologías para el Tratamiento Descentralizado de Aguas Residuales | 36 |
| 1.6.1 Toma de Decisiones Estructurada | 36 |
| 1.6.2 Análisis multicriterio | 37 |

| | |
|--|----|
| 1.6.3 Lógica difusa y métodos multicriterio difusos | 38 |
| 1.7 Experiencias de selección de tecnologías para el tratamiento descentralizado de aguas residuales..... | 39 |
| 1.8 Vacío en el conocimiento | 40 |
| 2. OBJETIVOS | 41 |
| 2.1 Objetivo general..... | 41 |
| 2.2 Objetivos específicos | 41 |
| 3. METODOLOGÍA..... | 42 |
| 3.1 Fase I: Caracterización de trenes tecnológicos para el tratamiento descentralizado de aguas residuales en asentamientos no planificados de países tropicales en desarrollo..... | 42 |
| 3.2 Fase II: Formulación de la herramienta para la selección de trenes para el tratamiento descentralizado de aguas residuales en asentamientos no planificados de países tropicales en desarrollo..... | 47 |
| 3.2.1 Identificación de criterios de sostenibilidad para la selección de trenes de tratamiento para el tratamiento descentralizado de aguas residuales en asentamientos no planificados de países tropicales en desarrollo | 47 |
| 3.3 Fase III: Validar la herramienta para la selección de sistemas para el tratamiento descentralizado de aguas residuales en el asentamiento Los Santos Bajo (Bucaramanga, Santander, Colombia). | 52 |
| 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 54 |

| | |
|--|----|
| 4.1 Fase I: Caracterización de trenes tecnológicos para el tratamiento descentralizado de aguas residuales en asentamientos no planificados de países tropicales en desarrollo..... | 54 |
| 4.1.1 Caracterización de tecnologías para el tratamiento descentralizado de aguas residuales en países tropicales en desarrollo | 54 |
| 4.1.2 Planteamiento de trenes para el tratamiento descentralizado de aguas residuales para asentamientos no planificados de países tropicales en desarrollo | 64 |
| 4.1.3 Potencial aprovechamiento de subproductos generados por los trenes de tratamiento descentralizado de aguas residuales planteados..... | 69 |
| 4.2 Formulación de herramienta para la selección de trenes para el tratamiento descentralizados de aguas residuales en asentamientos no planificados | 73 |
| 4.2.1 Conocimiento del contexto: Caracterización del asentamiento..... | 75 |
| 4.2.2 Definición de métricas y objetivos: Factores limitantes del asentamiento..... | 75 |
| 4.2.3 Depuración de alternativas: Análisis de factores limitantes | 76 |
| 4.2.4 Estimación de implicaciones | 79 |
| 4.2.5 Determinación de criterios clave de sostenibilidad para la selección de trenes de tratamiento descentralizado de aguas residuales en asentamientos no planificados de países tropicales en desarrollo..... | 80 |
| 4.2.6 Priorización de criterios claves de sostenibilidad para la selección de trenes de TDAR en asentamientos no planificados | 86 |
| 4.2.7 Caracterización de trenes planteados respecto a criterios clave | 89 |
| 4.2.8 Evaluación de compensaciones | 92 |

| | |
|--|-----|
| 4.3 Validación la herramienta para la selección de STDAR en el asentamiento Los Santos Bajo (Bucaramanga, Santander, Colombia) | 92 |
| 4.3.1 Conocimiento del contexto: Caracterización de asentamiento | 92 |
| 4.3.2 Definición de metas y objetivos | 95 |
| 4.3.3 Análisis de factores limitantes | 97 |
| 4.3.4 Estimación de implicaciones | 104 |
| 4.3.5 Evaluación de compensaciones y selección..... | 110 |
| 4.3.6 Análisis de la herramienta para la selección de trenes descentralizados para el tratamiento de aguas residuales propuesta..... | 113 |
| CONCLUSIONES | 118 |
| LIMITACIONES Y TRABAJO FUTURO..... | 121 |
| REFERENCIAS | 122 |
| APÉNDICES | 163 |

Listado de tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Características de aguas residuales domésticas en países en desarrollo | 18 |
| Tabla 2. Estudios sobre tratamiento descentralizado de aguas residuales en países tropicales en desarrollo..... | 26 |
| Tabla 3. Ecuaciones de búsqueda utilizadas para la revisión de literatura sobre implementación de sistemas y caracterización de tecnologías para el tratamiento descentralizado de aguas residuales en países tropicales en desarrollo..... | 43 |
| Tabla 4. Aspectos considerados en la caracterización de las tecnologías para el tratamiento de aguas residuales..... | 45 |
| Tabla 5. Ecuaciones de búsqueda utilizadas para la recopilación de criterios y planteamiento de herramienta para la selección de tecnologías para el tratamiento de descentralizado aguas residuales en asentamientos no planificados de países tropicales en desarrollo..... | 48 |
| Tabla 6. Variables lingüísticas para la comparación de pares adaptadas de la escala de Saaty | 52 |
| Tabla 7. Definición de aspectos cualitativos para la caracterización de tecnologías de tratamiento descentralizado de aguas residuales domesticas en países en desarrollo..... | 60 |
| Tabla 8. Síntesis de aspectos técnicos recopilados en las fichas para la caracterización de tecnologías aplicables al tratamiento descentralizado de aguas residuales en asentamientos no planificados de países tropicales en desarrollo | 62 |
| Tabla 9. Síntesis de aspectos económicos y ambientales recopilados en las fichas para la caracterización de tecnologías aplicables al tratamiento descentralizado de aguas residuales en asentamientos no planificados de países tropicales en desarrollo | 63 |

| | |
|--|-----|
| Tabla 10. Propuesta de trenes para el tratamiento descentralizado de aguas residuales en asentamientos no planificados | 64 |
| Tabla 11. Remoción de contaminantes esperada para los distintos trenes de tratamiento planteados para asentamientos no planificados de países tropicales en desarrollo..... | 70 |
| Tabla 12. Potenciales actividades de aprovechamiento de subproductos generados por los trenes propuestos para el tratamiento descentralizado para países tropicales en desarrollo | 73 |
| Tabla 13. Factores limitantes para la selección de tecnologías para el tratamiento descentralizado de aguas residuales en asentamientos no planificados de países tropicales en desarrollo | 77 |
| Tabla 14. Criterios para la selección de tecnologías para el tratamiento descentralizado de aguas residuales en asentamientos no planificados en países tropicales en desarrollo..... | 82 |
| Tabla 15. Criterios claves priorizados para la selección de trenes descentralizados en asentamientos no planificados de países tropicales en desarrollo | 87 |
| Tabla 16. Caracterización de los trenes para el tratamiento descentralizado de aguas residuales en asentamientos no planificados en países tropicales en desarrollo respecto al criterio técnico | 90 |
| Tabla 17. Caracterización de aguas residuales generadas por la comunidad de Los Santos Bajo | 95 |
| Tabla 18. Eficiencia de remoción de contaminantes requerida para el tren de tratamiento descentralizado en el asentamiento Los Santos Bajo..... | 96 |
| Tabla 19. Análisis de factores limitantes para el asentamiento Los Santos Bajo | 97 |
| Tabla 20. Análisis de las remociones de los distintos trenes de tratamiento para el Asentamiento Los Santos Bajo | 100 |

| | |
|---|-----|
| Tabla 21. Análisis de áreas requeridas por los distintos trenes de tratamiento para el asentamiento Los Santos Bajo | 101 |
| Tabla 22. Trenes aplicables al asentamiento Los Santos Bajo resultado del análisis de factores limitantes..... | 103 |
| Tabla 23. Matriz inicial para la selección de un sistema descentralizado en el asentamiento Los Santos Bajo, alternativas caracterizadas respecto al criterio técnico | 107 |
| Tabla 24. Matriz inicial para la selección de un sistema descentralizado en el asentamiento Los Santos Bajo, alternativas caracterizadas respecto al criterio económico | 108 |
| Tabla 25. Matriz inicial para la selección de un sistema descentralizado en el asentamiento Los Santos Bajo, alternativas caracterizadas respecto al criterio ambiental..... | 109 |
| Tabla 26. Clasificación final de alternativas utilizando para el asentamiento Los Santos Bajo Fuzzy-TOPSIS | 110 |

Listado de figuras

| | |
|---|-----|
| Figura 1. Proceso de revisión de literatura utilizando la metodología Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses (PRISMA). | 44 |
| Figura 2. Metodología utilizada para la recopilación de criterios de selección..... | 49 |
| Figura 3. Distribución de sistemas descentralizados para el tratamiento de aguas residuales encontrados por país | 55 |
| Figura 4. Distribución de tecnologías para el tratamiento descentralizado de aguas residuales según el número de estudios | 57 |
| Figura 5. Esquema de la herramienta para la selección de trenes de tratamiento descentralizado de aguas residuales en asentamientos no planificados en países tropicales en desarrollo..... | 74 |
| Figura 6. Localización general del asentamiento los Santos Bajo..... | 93 |
| Figura 7. Potencial localización de la planta de tratamiento descentralizada de Los Santos Bajo | 97 |
| Figura 8. Esquema para el tren de tratamiento descentralizado de aguas residuales priorizado para la comunidad de Los Santos Bajo..... | 111 |

Listado de Apéndices

| | |
|---|-----|
| Apéndice A. Diferentes tecnologías aplicadas para el tratamiento descentralizado de aguas residuales..... | 164 |
| Apéndice B. Fichas de caracterización de tecnologías para el tratamiento descentralizado de aguas residuales en asentamientos no planificados de países tropicales en desarrollo..... | 168 |
| Apéndice C. Síntesis de requisitos de calidad de agua residual tratada para el reúso según distintos documentos internacionales de referencias..... | 318 |
| Apéndice D. Formato para la caracterización de asentamientos no planificados de países tropicales en desarrollo..... | 325 |
| Apéndice E. Criterios recopilados para la selección de tecnologías de tratamiento de aguas residuales..... | 332 |
| Apéndice F. Procedimiento para el cálculo del índice de impacto ambiental..... | 346 |
| Apéndice G . Formato de Caracterización del asentamiento Los Santos Bajo..... | 348 |
| Apéndice H. Procedimiento utilizado para la aplicación de método Fuzzy-TOPSIS..... | 357 |

RESUMEN

Título: Propuesta de herramienta para la selección de Tecnologías para el Tratamiento Descentralizado de Aguas Residuales en Asentamientos no Planificados de Países Tropicales en Desarrollo, Caso de estudio: Asentamiento Los Santos Bajo (Bucaramanga)*

Autor: Jesus David Álvarez Trujillo**

Palabras Clave: Tratamiento descentralizado de aguas Residuales, economía circular, Asentamientos no planificados

El crecimiento urbano y las condiciones socioeconómicas en países en desarrollo han generado la proliferación de asentamientos no planificados, que enfrentan problemas de saneamiento y tratamiento de aguas residuales. El tratamiento descentralizado de aguas residuales (TDAR) es una solución viable, pero la selección de tecnologías sostenibles es compleja debido a la diversidad de opciones y características específicas de cada contexto. Este proyecto propuso una herramienta para seleccionar tecnologías de TDAR en asentamientos no planificados de países tropicales en desarrollo, considerando criterios técnicos, sociales, ambientales y económicos. Inicialmente, se caracterizaron 31 trenes tecnológicos basados en 12 tecnologías aplicables. La herramienta desarrollada utiliza la Metodología de Decisión de Soporte (SDM), que integra análisis multicriterio y difuso, evaluando 3 criterios principales (técnico, económico y ambiental) y 7 subcriterios. En cuanto a los aspectos sociales, estos se evaluarán de manera participativa en el marco de un proyecto más amplio enfocado en sostenibilidad y economía circular en la cuenca del río Alto Lebrija. La aplicación de la herramienta en el asentamiento Los Santos Bajo (Bucaramanga, Colombia) permitió validar su eficacia, destacando que el criterio técnico es el más importante (39.53%), con la facilidad de operación y mantenimiento como el subcriterio clave (14.97%). El tren de tratamiento con mayor potencial identificado fue un Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente, seguido de un Filtro Percolador y Cloración. Este proyecto contribuye significativamente a la selección informada de tecnologías en asentamientos no planificados de países tropicales en desarrollo, ayudando a solucionar problemas de saneamiento a través de herramientas que facilitan la toma de decisiones sistemática.

* Trabajo de Grado

** Facultad de ingenierías físicomecánicas. Escuela de ingeniería civil. Maestría en ingeniería civil. Director: Isabel Cristina Domínguez Rivera. Ph.D. Agriculture, Food and Rural Development. Codirector: Edgar Ricardo Oviedo Ocaña. PhD en ingeniería

ABSTRACT

Title: Proposal of a Tool for the Selection of Technologies for Decentralized Wastewater Treatment in Unplanned Settlements of Tropical Developing Countries, Case Study: Los Santos Bajo Settlement (Bucaramanga)*

Author(s): Jesús David Álvarez Trujillo**

Key Words: Decentralized wastewater treatment, Circular economy, Unplanned Settlements

Description: Urban growth and socioeconomic conditions in developing countries have led to the proliferation of unplanned settlements, which face sanitation and wastewater treatment challenges. Decentralized wastewater treatment (DWWT) is a viable solution, but selecting sustainable technologies is complex due to the diversity of options and the specific characteristics of each context. This project proposed a tool for selecting DWWT technologies in unplanned settlements of tropical developing countries, considering technical, social, environmental, and economic criteria. Initially, 31 technology trains were characterized based on 12 applicable technologies. The developed tool uses the Support Decision Methodology (SDM), which integrates multicriteria and fuzzy analysis, evaluating 3 main criteria (technical, economic, and environmental) and 7 subcriteria. As for social aspects, these will be evaluated participatively within the framework of a broader project focused on sustainability and the circular economy in the Alto Lebrija River basin. The application of the tool in the Los Santos Bajo settlement (Bucaramanga, Colombia) validated its effectiveness, highlighting that the technical criterion is the most important (39.53%), with ease of operation and maintenance as the key subcriterion (14.97%). The treatment train with the highest potential identified was an Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor, followed by a Trickling Filter and Chlorination. This project significantly contributes to the informed selection of technologies in unplanned settlements of tropical developing countries, helping to address sanitation issues through tools that facilitate systematic decision-making.

* Degree Work

** Faculty of Physicomechanical Engineering. School of Civil Engineering. Master's in civil engineering. Advisor: Isabel Cristina Domínguez Rivera. Ph.D. in Agriculture, Food, and Rural Development. Co-advisor: Edgar Ricardo Oviedo Ocaña. Ph.D. in Engineering.

INTRODUCCIÓN

La población urbana ha experimentado un aumento constante en las últimas décadas, según datos de Naciones Unidas (United Nations, 2019). En 1990, aproximadamente el 42% de la población mundial residía en entornos urbanos, y para el año 2018, este porcentaje había aumentado al 55%. Se proyecta que para el año 2050, un 68%, alrededor de 6800 millones de personas, habite en centros urbanos (United Nations, 2019). Este crecimiento urbano ha resultado en la proliferación de asentamientos no planificados (Parkinson et al., 2007). Acorde a UN-Habitat (2003), los asentamientos no planificados son áreas urbanas que han surgido sin una planificación formal y estructurada. Estos asentamientos no planificados emergen como consecuencia de diversos factores, que incluyen la migración rural, la pobreza, la inequidad y la marginación (UN-Habitat, 2003).

Los asentamientos no planificados, al haber surgido de manera ilegal, generalmente quedan al margen de la integración urbana y enfrentan desafíos significativos en cuanto al acceso a servicios urbanos esenciales (Parkinson et al., 2007). En este contexto, se observa una intensificación de los problemas relacionados con el saneamiento, especialmente en países en desarrollo (Buttenheim, 2008; Singh et al., 2015). Las condiciones precarias de saneamiento son una característica común en estos asentamientos, ya que a menudo carecen de un manejo adecuado de aguas residuales, excretas, residuos sólidos y aguas pluviales (UN-Habitat, 2003).

Estas áreas son de vital importancia debido a que albergan un porcentaje significativo de la población mundial. En esta línea, en América Latina y el Caribe, el 20 % de la población vive en asentamientos no planificados y únicamente el 40% de la población urbana cuenta con acceso a servicios de saneamiento básico (CEPAL, 2018). En el contexto colombiano, se observa también

una brecha en el acceso a servicios de saneamiento básico en asentamientos no planificados, donde el 19% de la población de zonas urbanas no cuentan con estos servicios (DNP, 2018; Superservicios, 2020). En el Área Metropolitana de Bucaramanga (AMB), se estimó que en 2013 había 251 asentamientos no planificados, con una población aproximada de 230,000 habitantes. En el AMB, el 4% de la población urbana carece de acceso a servicios de alcantarillado y un porcentaje considerable de aguas residuales se vierte a los cuerpos hídricos sin tratamiento alguno (Alcaldía de Bucaramanga, 2020).

La falta de tratamiento de aguas residuales en los asentamientos no planificados resulta en diversas problemáticas, incluyendo la contaminación de fuentes de agua superficiales y subterráneas, así como riesgos para la salud pública debido a la presencia de organismos patógenos en las aguas residuales no tratadas (Gallego-Schmid & Tarpani, 2019; Katukiza et al., 2012; Parkinson & Tayler, 2003). En este contexto, el asentamiento Los Santos Bajo, ubicado en la zona periurbana del AMB, emerge como un ejemplo de asentamiento no planificado. En esta área, las aguas residuales generadas por la comunidad son vertidas en diversos afluentes del río Suratá o directamente en este cuerpo de agua, generando problemas ambientales y representando un riesgo para la salud de la comunidad.

Una posible solución al problema de la falta de tratamiento de aguas residuales (AR) en asentamientos no planificados de países en desarrollo es el tratamiento descentralizado de aguas residuales (TDAR). En el TDAR, las AR son tratadas en proximidad al lugar de su generación (Libralato et al., 2012; Rodrigues Mesquita et al., 2021). Este enfoque presenta ventajas como una menor inversión en infraestructura en comparación con los sistemas convencionales, así como una mayor adaptabilidad al entorno circundante (Capodaglio, 2017). De esta manera, el TDAR no solo facilita el acceso al servicio de saneamiento, sino que también minimiza el impacto ambiental al

reducir la carga contaminante vertida y al permitir aprovechar subproductos resultantes del tratamiento (Bernal et al., 2021).

La investigación en torno a las tecnologías para el TDAR ha aumentado significativamente en los últimos años. Estas investigaciones se centran comúnmente en: (i) la evaluación de la remoción de contaminantes emergentes (H. Cheng et al., 2011; Igos et al., 2012), (ii) métodos para la optimización energética de sistemas existentes (Cashman et al., 2018, p. 20; Hafeez et al., 2021; Pang et al., 2020; Shaw & C. Dorea, 2021) y (iii) el desarrollo de nuevas tecnologías y mejoras en las remociones de tecnologías convencionales (de Oliveira Cruz et al., 2019; Liang & Van Dijk, 2010; Nguyen et al., 2019; Ramprasad et al., 2017). A pesar del crecimiento de la investigación en esta área, persisten brechas de conocimiento, especialmente en lo referente a la selección de criterios y tecnologías aplicables al TDAR, especialmente en contextos de asentamientos no planificados en países tropicales en desarrollo.

Desde una perspectiva de toma de decisiones, la selección de tecnologías para el TDAR sostenible corresponde a un problema complejo (Singh & Kazmi, 2018). Esto debido a la variedad de tecnologías disponibles y a las diferentes características presentes en cada caso particular (Goffi et al., 2018). La selección de tecnologías no apropiadas para el TDAR hace que su implementación no sea sostenible (Liang & Van Dijk, 2010), generando así una eficiencia de tratamiento reducida e impactos económicos, ambientales y sociales adversos (Kalbar et al., 2012; Kuttuva et al., 2018).

El enfoque para la toma de decisiones estructurada o por sus siglas en inglés SDM (*Structured Decision Making*), busca ayudar e informar al proceso de toma de decisiones ambientales y de políticas públicas a través de un protocolo basado en la teoría de decisiones adaptado a necesidades prácticas (Gregory, 2012). El enfoque SDM puede ser integrado con otras herramientas como el Análisis Multicriterio (AMC) para mejorar de los procesos de selección de

tecnología en el contexto de asentamientos no planificados. El AMC es un conjunto de métodos que permiten clasificar diferentes alternativas en función de criterios predefinidos (Geneletti, 2019). De la misma forma, la lógica difusa, también conocida como *Fuzzy Logic* en inglés, se utiliza para abordar la incertidumbre asociada con información imprecisa, juicios humanos e información insuficiente (Eseoglu et al., 2022).

Dentro de los enfoques de AMC, se han propuesto métodos como Fuzzy AHP y Fuzzy-TOPSIS. El método Fuzzy AHP, una combinación de lógica difusa y el Proceso Analítico Jerárquico (AHP), es aplicado debido a su capacidad para lidiar con la incertidumbre de variables lingüísticas en el proceso de toma de decisiones y priorización de criterios (Liu et al., 2020; van Laarhoven & Pedrycz, 1983). Por otro lado, el Fuzzy-TOPSIS, una variante del método tradicional TOPSIS, es popular por su capacidad para manejar datos cualitativos y cuantitativos difusos en la toma de decisiones (Hwang & Yoon, 1981). La integración de estas herramientas permite lidiar con la incertidumbre asociada a estos procesos, generando pesos ponderados difusos que servirán como base para la evaluación difusa de alternativas (Pedrycz et al., 2011). La aplicación de estas herramientas contribuye a generar un proceso de toma de decisiones informado, que puede facilitar la selección de tecnologías más sostenibles en asentamientos no planificados abordando de mejor manera la incertidumbre asociada a la opinión o falta de información.

Este proyecto se orientó a proponer una herramienta para la selección de tecnologías destinadas al TDAR en asentamientos no planificados de países tropicales en desarrollo, considerando criterios técnicos, sociales, ambientales y económicos. Durante el desarrollo de este trabajo, se llevó a cabo la caracterización de diversos trenes para el TDAR aplicables a asentamientos no planificados de países tropicales en desarrollo. Además, se formuló una herramienta para la selección de tecnologías en estos contextos, integrando la toma de decisiones

estructurada junto con el análisis multicriterio difuso para abordar problemas de incertidumbre. En la fase final, la herramienta propuesta fue aplicada en el asentamiento Los Santos Bajo con el objetivo de evaluar su validez, analizar sus fortalezas e identificar posibles áreas de mejora. Este enfoque holístico busca proporcionar una herramienta práctica y efectiva para la toma de decisiones en la selección de tecnologías de tratamiento descentralizado en asentamientos no planificados de países tropicales en desarrollo

1. ANTECEDENTES, MARCO TEÓRICO, CONCEPTUAL Y SITUACIÓN ACTUAL

Los asentamientos no planificados se caracterizan comúnmente por condiciones de pobreza, carencia de propiedad, una población que subsiste a través de la economía informal y una ausencia de infraestructura (UN-Habitat, 2003). Estos elementos desempeñan un papel crucial en la implementación de sistemas de tratamiento de aguas residuales, ya que las características de las aguas residuales generadas y las tecnologías aplicables en dicho contexto están ligadas a estas condiciones socioeconómicas y culturales. En esta sección se presenta una revisión de la literatura sobre el TDAR en asentamientos no planificados en países tropicales en desarrollo. Se aborda específicamente la gestión de aguas residuales en estas áreas, examinando las tecnologías empleadas, la selección de tecnologías y diversas experiencias de implementación en este contexto.

1.1 Características de las aguas residuales de origen doméstico en asentamientos no planificados

Las propiedades de las Aguas Residuales Domésticas (ARD) están influenciadas por diversos factores culturales, estándares de vida y actividades en la vivienda (Oladoja, 2017). Estas aguas son predominantemente caracterizadas en función de sus propiedades fisicoquímicas y

microbiológicas (Spellman, 1999). En términos de sólidos, aproximadamente el 65% de estos son disueltos, mientras que el 35% restante son suspendidos (Von Sperling, 2007c). En cuanto a la composición de la materia orgánica en las ARD, alrededor del 40% corresponde a proteínas, entre el 25% y el 40% a carbohidratos, y un 10% a aceites y grasas (Jordao et al., 1995). En relación con los nutrientes, se destaca el elevado contenido de nitrógeno y fósforo, cuya presencia suscita preocupación debido a su contribución a la eutrofización en cuerpos de agua (Zhong et al., 2020). Por último, desde la perspectiva estética, estas aguas suelen exhibir color y olor, atribuibles a la presencia significativa de materia biodegradable (Quevauviller et al., 2006). La **Tabla 1** proporciona un resumen de las características fisicoquímicas y microbiológicas comúnmente halladas en la literatura para las aguas residuales domésticas en países en desarrollo.

Tabla 1

Características de aguas residuales domésticas en países en desarrollo

| Parámetro | Unidad | País | | | |
|-------------------------|------------------|---------------------|---------------------|--------------------|------------------------|
| | | Brasil ¹ | México ² | India ³ | Tailandia ⁴ |
| DBO ₅ | mg/L | 589 | - | - | 418 |
| DQO | mg/L | 1108 | 880 | 240 | 1233 |
| pH | - | 7.5 | 7.57 | - | 7.7 |
| SST | mg/L | 539 | 123 | 52 | 560 |
| Conductividad eléctrica | μS/cm | - | 2086 | - | 1831 |
| Nitratos | mg/L | - | 0.49 | 5.4 | 0.4 |
| Fosfatos | mg/L | - | 12.2 | 0.7 | - |
| <i>E. coli</i> | μS/cm | - | 6.79 | - | 7.03 |
| Coliformes totales | (log MPN/100 mL) | - | 7.06 | - | - |

Referencias: ¹Rodrigues Mesquita et al. (2021), ²García et al. (2022), ³Datta et al. (2021) y ⁴Danshita et al. (2020)

En consonancia con lo expuesto anteriormente, aspectos presentes en los asentamientos no planificados como la falta de servicio de agua potable, hábitos de aseo y consumo de los habitantes

podrían influir en la calidad de las AR generadas. Por ende, es fundamental realizar procesos de caracterización fisicoquímica y microbiología para conocer la composición de las AR producidas.

1.2 Sistemas descentralizados para el tratamiento de aguas residuales en asentamientos no planificados

En el TDAR se lleva a cabo el tratamiento y disposición de las aguas residuales en volúmenes relativamente pequeños, en proximidad al lugar de generación (Capodaglio, 2017). Estos sistemas destacan por su capacidad de adaptación a diferentes contextos de aplicación, brindando flexibilidad en su gestión (Massoud et al., 2009), mostrándose como una opción prometedora en áreas con zonificación inadecuada (USEPA, 2002). El TDAR surge como una solución viable en situaciones donde la conexión a servicios centralizados resulta costosa, como en zonas rurales o asentamientos no planificados localizados en la periferia (Rodriguez Mesquita et al., 2021).

En el tratamiento centralizado de AR, la recolección y transporte representan aproximadamente el 60% de la inversión inicial (Bernal et al., 2021). En contraste, el TDAR permite que estos gastos disminuyan, ayudando así la priorización de otros aspectos clave, como el tratamiento (Bernal et al., 2021). Adicionalmente, el TDAR ofrece la posibilidad de aprovechar subproductos generados, como biogás, lodos o agua tratada, cuyo uso puede contribuir a la sostenibilidad económica del sistema (Libralato et al., 2012).

1.3 Tecnologías con mayor potencial para el tratamiento descentralizado de aguas residuales (TDAR)

Las tecnologías utilizadas en el tratamiento de las ARD comprenden unidades que aplican procesos físicos, químicos y biológicos para la eliminación de contaminantes (Von Sperling & Chernicharo, 2005). Estas tecnologías suelen organizarse de manera secuencial, formando

sistemas conocidos como trenes de tratamiento. La diversidad de opciones disponibles en el TDAR permite la combinación variada de tecnologías, dando lugar a la configuración de distintos trenes de tratamiento. La selección de un tren adecuado para el TDAR se vuelve un proceso complejo, requiriendo una evaluación detallada de las ventajas y desventajas inherentes a cada tecnología. El tren de tratamiento seleccionado debe ser económicamente viable, sostenible a largo plazo y compatible con el contexto de aplicación (Capodaglio, 2017; Massoud et al., 2009). A continuación, se presenta un breve resumen de las tecnologías para el TDAR, organizadas según la etapa de tratamiento a la que pertenecen.

1.3.1 Tratamiento preliminar

El tratamiento preliminar de ARD tiene como objetivo la eliminación de sólidos de gran tamaño y arenas mediante procesos físicos (Von Sperling & Chernicharo, 2005). Esta fase busca salvaguardar las unidades de tratamiento subsiguientes, evitando la entrada de materiales que puedan impedir su correcto funcionamiento (Brault et al., 2022). Entre las opciones más comunes para el tratamiento preliminar se encuentran las rejillas de cribado y los desarenadores (Von Sperling & Chernicharo, 2005).

1.3.2 Tratamiento primario

El tratamiento primario de ARD se realiza típicamente mediante tecnologías con predominio de procesos físicos, como la sedimentación (Brault et al., 2022; A. Singh et al., 2019). Aunque existen diversas opciones para el tratamiento primario en el TDAR, el tanque séptico destaca como la tecnología más común, siendo empleada principalmente para la remoción de sedimentos y la digestión anaerobia parcial de materia orgánica (Massoud et al., 2009). Esta opción es particularmente popular en países en desarrollo debido a sus bajos costos de construcción y fácil implementación (Bajpai et al., 2019). No obstante, informes sobre su efluente indican que el agua

tratada a menudo conserva un elevado contenido de sólidos suspendidos, microorganismos patógenos y nutrientes, lo que generalmente requiere un tratamiento adicional para cumplir con estándares mínimos para la disposición final (Bajpai et al., 2019).

Otra tecnología ampliamente utilizada es el tanque de Imhoff, que separa partículas sólidas de los líquidos mediante su forma en V, permitiendo que los sólidos se sedimenten mientras que el gas generado se libera por aberturas laterales (Brault et al., 2022). Sin embargo, ni la calidad del efluente ni el biogás producido son suficientes para el reúso (Brault et al., 2022).

Además de las tecnologías mencionadas, el reactor anaerobio de flujo ascendente (UASB) es una opción común para el tratamiento primario, implementado en países como India, México y Brasil (Amaral et al., 2019). Además, de ser una tecnología utilizada para el tratamiento de AR a nivel local, siendo la PTAR de Rio Frio un ejemplo de esto. En este reactor, las AR ingresan por el fondo del reactor y fluyen a través de un manto de lodos, purificando el agua mediante procesos de digestión anaerobia (Mainardis et al., 2020). Aunque esta tecnología produce un efluente de calidad con bajo consumo energético y puede generar biogás para usos domésticos (Singh et al., 2019), su implementación presenta problemas como la generación de olores y la limitada remoción de microorganismos patógenos y nutrientes (Mainardis et al., 2020).

1.3.3 Tratamiento secundario de aguas residuales

El tratamiento secundario de ARD tiene como objetivo la eliminación de materia orgánica, comúnmente a través de procesos biológicos (Von Sperling, 2007c). Los humedales artificiales son una tecnología popular para el tratamiento descentralizado de ARD, destacan por sus bajos costos operativos y su diseño y operación sencillos (Capodaglio, 2017). Esta tecnología busca emular el tratamiento llevado a cabo por los humedales naturales, utilizando una capa de roca o grava junto con una capa de vegetación para reducir la carga contaminante mediante mecanismos

como sedimentación, filtración, degradación biológica, precipitación y radiación UV mientras las AR fluyen a través de ellos (Brault et al., 2022). A pesar de sus ventajas, su principal desafío radica en el espacio requerido, junto con la generación de olores y mosquitos, especialmente problemáticos en entornos tropicales (Datta et al., 2021).

Los filtros percoladores, otra tecnología común para el tratamiento secundario de ARD, consisten en una estructura con sustrato utilizado como medio de soporte para una biopelícula, tratando las ARD rociadas mediante un proceso de percolación (Bressani-Ribeiro et al., 2018). Esta tecnología presenta simpleza operativa respecto a alternativas que utilizan aireación y es utilizada principalmente para pulir efluentes de reactores UASB (Von Sperling & Chernicharo, 2005). Sin embargo, los filtros percoladores enfrentan limitaciones como la baja remoción de microorganismos patógenos y la necesidad de una circulación constante de ARD a través del medio filtrante y del tratamiento de los lodos generados (Von Sperling & Chernicharo, 2005).

Los lodos activados, ampliamente empleados en el tratamiento secundario, se destacan por su alta eficacia en la remoción de materia orgánica y nutrientes con un bajo requerimiento de área (Von Sperling & Chernicharo, 2005). A pesar de sus beneficios, su complejidad operativa y necesidad de personal especializado pueden dificultar su implementación en contextos descentralizados (USEPA, 2000). Como respuesta a estos desafíos, han surgido variantes como la aeración extendida y los reactores discontinuos secuenciales, buscando simplificar el proceso, eliminando la necesidad de un tanque de sedimentación secundario. No obstante, estas variantes implican un mayor tiempo de retención de biomasa generada, requieren una mayor área para el tratamiento y mayor potencia para la aireación (Brault et al., 2022).

Por último, los Biorreactores de Membrana (MBR) han surgido como una tecnología prometedora para el TDAR. Estos integran la degradación biológica con la filtración de

membranas, logrando un efluente de alta calidad con un bajo tiempo de retención hidráulica (Melin et al., 2006). Aunque su eficacia para la remoción de contaminantes y su requerimiento de espacio reducido los hacen competitivos, la implementación en países en desarrollo se ve desafiada por los altos costos de adquisición e implementación, así como su consumo eléctrico elevado (Bajpai et al., 2019).

1.3.4 Tratamiento terciario de aguas residuales

En el tratamiento terciario el objetivo es la generación de efluentes de alta calidad y se suelen emplear diversos procesos para este fin. Sin embargo, la desinfección para la eliminación de microorganismos patógenos es el procedimiento más común en esta etapa, a través de la aplicación de tecnologías como cloración, ozonización y radiación ultravioleta (Brault et al., 2022). No obstante, otras opciones de tecnologías para el tratamiento terciario de AR incluyen la ósmosis inversa, procesos de oxidación, humedales artificiales, lagunas de maduración, carbón activado y diversas membranas para la filtración (Crini & Lichtfouse, 2019; Riffat, 2013). Estas tecnologías pueden enfocarse en la remoción de nutrientes como nitrógeno y fósforo, así como abordar otros contaminantes específicos, emergentes o metales pesados.

1.4 Sostenibilidad y economía circular como enfoques para el tratamiento de aguas residuales domésticas en asentamientos no planificados

La sostenibilidad se logra mediante el equilibrio de objetivos a nivel social, ambiental y económico (Purvis et al., 2019). Por esta razón, para garantizar el saneamiento sostenible en asentamientos no planificados, es esencial considerar no solo la implementación de tecnologías desde un enfoque técnico, sino también abordar problemas relacionados con el espacio, la propiedad, el ambiente y los aspectos socioeconómicos (Katukiza et al., 2012). Para alcanzar la sostenibilidad en sistemas de saneamiento, Mara et al. (2007) propusieron cuatro principios para

el saneamiento sostenible: (i) mejorar la salud humana sin crear riesgos, (ii) ser asequible para las comunidades, (iii) tener un impacto ambiental positivo y (iv) ser apropiado institucionalmente. La implementación de sistemas de TDAR en estos entornos se vuelve compleja debido a diversos desafíos, como falta de recursos económicos, la disponibilidad de espacio y topografía sumada a la ausencia de energía (SgROI et al., 2018).

Como enfoque innovador para promover la sostenibilidad de las TDAR, la economía circular destaca como un paradigma que busca aprovechar el agua tratada y subproductos generados durante el tratamiento de AR, creando círculos cerrados que generan beneficios económicos y pueden reducir la demanda de agua potable (Capodaglio, 2017). Por ejemplo, alrededor del 10% de los alimentos consumidos a nivel mundial se producen empleando agua residual tratada para riego (Parkinson & Tayler, 2003). Sin embargo, es importante tener en cuenta que el aprovechamiento de agua tratada puede tener un requerimiento energético más alto, esto debido a la necesidad de infraestructura adicional y mejor calidad de las AR tratadas (McCarty et al., 2011). Además, el tratamiento de los lodos generados puede representar hasta el 50% del costo total de operación (Kacprzak et al., 2017). Por lo tanto, se hace imperativo optimizar el potencial energético y económico de estas plantas para convertirlas en generadoras de recursos en lugar de consumidoras de estos (McCarty et al., 2011).

1.5 Sistemas descentralizados de tratamiento de aguas residuales en países en desarrollo

Se han llevado a cabo diversos estudios acerca del TDAR en países tropicales en desarrollo, mostrando resultados variados y a distintas escalas. La Tabla 2 sintetiza distintos resultados de estudios recopilados acerca de sistemas de TDAR en países tropicales en desarrollo realizados durante los últimos 20 años. En la Tabla 2 se observa que los estudios relativos al TDAR se enfocan principalmente en aspectos técnicos y económicos relacionados con su implementación, así como

las principales herramientas utilizadas son el análisis costo-beneficio, análisis de ciclo de vida y el estudio de remociones.

Asimismo, se observa que estos sistemas descentralizados fueron implementados principalmente en entornos rurales. Respecto a su distribución espacial, el mayor número de estudios fueron realizados en Asia, siendo India el país con un mayor estado de avance en este aspecto. En el contexto latinoamericano, Brasil es el país con un mayor nivel estudio relativo al tratamiento descentralizado. Es importante recalcar que en estos contextos las tecnologías más estudiadas fueron los humedales artificiales y lagunas de estabilización. Sin embargo, fueron estudiadas también tecnologías como MBR, CBR y Aireación Extendida (AE). En conclusión, se observa que los estudios relativos al TDAR han ido en aumento, sin embargo, los estudios relativos a experiencias de selección e implementación de sistemas TDAR en asentamientos no planificados son aún escasos.

Tabla 2

Estudios sobre tratamiento descentralizado de aguas residuales en países tropicales en desarrollo

| Referencia | País | Propósito | Resultados |
|------------------------|----------|---|---|
| Lienhoop et al. (2014) | Jordania | Analizar los costos y beneficios del TDAR en Jordania. | El tratamiento descentralizado de aguas residuales y su reutilización son medios importantes para mejorar el saneamiento y la producción agrícola en las comunidades rurales de países áridos como Jordania. |
| | | Investigar las ventajas de las tecnologías descentralizadas para comunidades remotas. | La tecnología SBR, que es más costosa, solo puede justificarse en áreas agrícolas donde se obtengan beneficios suficientes de la reutilización de las aguas residuales tratadas. |
| Russell (2014) | Mexico | | La PTAR Arturo Herrera (centralizada) y Ecoparque (Descentralizada) incorporan esquemas de reutilización de agua y apoyan programas de reforestación, pero la PTAR Arturo Herrera cumple con estándares de tratamiento y presenta remociones superiores a las de Ecoparque. |
| | | Evaluar y comparar la sostenibilidad del tratamiento de aguas residuales centralizado frente al descentralizado en Tijuana, México. | La PTAR Arturo Herrera tiene costos operativos de \$49.26 por persona con la capacidad de tratamiento evaluado en esa época, la cual era menor que el costo de operación y mantenimiento de Ecoparque. Una vez que la PTAR Arturo Herrera alcance su capacidad máxima, el costo por persona se reducirá a \$37.74, convirtiéndola en una opción más rentable. |

| Referencia | País | Propósito | Resultados |
|---------------------|-----------------|--|---|
| Singh et al. (2015) | India | Estudiar la implementación sistemas de TDAR. | <p>Se encontró que los sistemas aeróbicos proporcionan mejor calidad en términos de eliminación de materia orgánica y nutrientes, y requieren menos espacio. Sin embargo, sus costos más altos de operación y mantenimiento limitan su uso. Los sistemas naturales necesitan más espacio y tienen limitaciones en la eliminación de nutrientes. Los sistemas anaeróbicos tienen limitaciones de eficiencia debido a factores como bajas temperaturas y largos tiempos de retención hidráulica, requiriendo un postratamiento para la eliminación de DQO, nutrientes y patógenos.</p> <p>El rendimiento de estos sistemas es independiente del tamaño de la planta, mientras que el costo de operación y mantenimientos es directamente proporcional al tamaño de la comunidad</p> |
| Vera et al. (2016) | Chile | Discutir la participación y el desarrollo de humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales rurales en Chile. | <p>Los humedales artificiales en Chile muestran costos de construcción y operación competitivos en comparación con los sistemas de lodos activados, lo que los convierte en una tecnología atractiva para plantas de tratamiento de aguas residuales descentralizadas.</p> <p>La reutilización de efluentes de sistemas de tratamiento de aguas residuales basadas en humedales artificiales requeriría una desinfección final, lo que resalta la necesidad de más investigación, marcos regulatorios específicos, cuestiones legales e incentivos económicos para promover la reutilización de aguas residuales tratadas.</p> |
| Capodaglio (2017) | No especificado | Analizar la gestión descentralizada de aguas residuales para la recuperación de recursos en áreas rurales. | <p>Los sistemas descentralizados de tratamiento de aguas residuales requieren una mayor conciencia, participación e involucramiento por parte de los usuarios locales, pero pueden ser bien aceptados y económicamente eficientes, contribuyendo al desarrollo urbano sostenible.</p> <p>La sostenibilidad de la tecnología de tratamiento de aguas residuales depende de dimensiones económicas, ambientales y sociales, y la selección y operación de la tecnología debe realizar en función de estos factores.</p> |

| Referencia | País | Propósito | Resultados |
|----------------------------|--------|---|--|
| Machado et al. (2017) | Brasil | Estudiar experiencias de implementación de humedales artificiales para el tratamiento descentralizado de aguas residuales en Brasil. | <p>Los humedales artificiales basados en grava fueron particularmente efectivos para la eliminación de DQO y DBO5 en Brasil, teniendo como ejemplo un estudio que evaluaba un humedal artificial de flujo horizontal para el tratamiento de aguas residuales industriales lácteas logrando las eficiencias de eliminación para DQO del 95.5% y de DBO5 del 93.2%.</p> <p>La mayoría de los estudios de humedales construidos en Brasil se enfocaron en diseños de flujo subsuperficial, con una evaluación limitada del potencial de humedales construidos híbridos. La mayoría de los estudios se realizaron en las regiones Sur y Sudeste de Brasil, particularmente en estados como Minas Gerais, Santa Catarina y São Paulo.</p> |
| Brunner et al. (2018) | India | Desarrollar un enfoque para estimar la disposición a pagar a partir de muestras pequeñas e identificar una tecnología rentable para el tratamiento de aguas residuales. | <p>Los costos de salud representaron una carga significativa para los habitantes de barrios marginales, con una disposición a pagar por tarifas de alcantarillado que disminuyó con el tiempo. Los factores que afectaron la disposición a pagar incluyeron los niveles de ingresos, y diferentes grupos de usuarios priorizaron la salud y la contaminación de manera diferente.</p> <p>El estudio también resaltó la asequibilidad y sostenibilidad de los sistemas TDAR en pueblos rurales de la India, enfatizando la necesidad de tecnologías de bajo costo y la posible recuperación de costos a través de tarifas de usuarios.</p> |
| D ecezaro et al. (2018) | Brasil | Evaluar el rendimiento de un humedal artificial de flujo vertical para el TDAR en Brasil. | <p>El humedal vertical de flujo subsuperficial (VFCW) demostró eficiencias de remoción del 78% para DBO5, 63% para DQO y 51% para SSY, junto con una remoción del 59% de N-NH4 y del 28% de NT, lo que indica procesos efectivos de nitrificación.</p> |
| Kuttuva et al. (2018) | India | Estudiar experiencias de implementación de sistemas de tratamiento descentralizado en Bengaluru, India. | <p>Variación significativa en la sostenibilidad de los sistemas debido a economías de escala, donde en complejos más pequeños enfrentaron costos de tratamiento elevados que llevaron a una eficiencia de tratamiento inadecuada</p> <p>A partir de estimaciones realizadas en el estudio se concluyó que el reúso del 100% del agua generada no era factible debido a sus limitadas aplicaciones.</p> |

| Referencia | País | Propósito | Resultados |
|------------------------|-----------|--|--|
| Musazura et al. (2018) | Sudáfrica | Evaluar la viabilidad técnica del uso del efluente de un sistema de TDAR para riego en tierras agrícolas en una comunidad periurbana en eThekweni, Sudáfrica. | <p>El riego con efluente del sistema de tratamiento fue comparable al uso de agua de grifo más fertilizante, especialmente para el cultivo de banano.</p> <p>El efluente de humedal de flujo horizontal puede suministrar agua adecuada pero no todo el N y P requeridos por el banano y el taro. Se requeriría monitoreo de las cantidades de N y P suministradas cuando se utilice el efluente del filtro anaerobio para regar banano y taro, basado en sus necesidades hídricas</p> |
| Singh & Kazmi (2018) | India | Realizar un análisis tecno económico de 16 plantas de tratamiento de aguas residuales descentralizadas (PTAR) basadas en diversas tecnologías en el norte de la India. | <p>El requerimiento suelo para los sistemas de tratamiento prefabricados se estimó entre 0.125 y 0.8 m² por equivalente de población (pe) y es mayor que para las otras PTAR, que requieren entre 0.039 y 0.159 m²/habitante equivalente. Los datos recopilados en este estudio muestran que los costos de tratamiento de las plantas prefabricadas son altas en comparación con las convencionales, oscilando entre US\$0.0676 y 0.1045 (±10%) y entre US\$0.0353 y 0.1891/m³ (±15-20%), respectivamente.</p> <p>Se realizó un análisis costo-beneficio (CBA) para todas las PTAR, y entre los beneficios ambientales considerados, la eliminación de nitrógeno fue la que más contribuyó. Además, se encontró que la operación de las PTAR era económicamente viable incluso sin la venta de agua tratada, excepto para una planta prefabricada. Para todas las plantas evaluadas, el consumo específico de energía (SPC) varió entre 0 y 1 kW/m³.</p> |

| Referencia | País | Propósito | Resultados |
|------------------------|--------|--|---|
| Fadaneli et al. (2019) | Brasil | Proporcionar directrices para la implementación de sistemas de humedales construidos de flujo subsuperficial | <p>Los humedales con mejor rendimiento en la remoción de contaminantes fueron aquellos con flujo vertical, presentando una mayor eficiencia en general en comparación con los de flujo horizontal. Sin embargo, la falta de información impidió la elaboración de consideraciones para su implementación.</p> <p>El vital para el correcto funcionamiento de los humedales artificiales la existencia de un tratamiento previo eficiente. Se recomendó el uso de unidades de decantación-digestión como tanques sépticos, reactores anaerobios, UASB o lagunas anaerobias como tratamiento primario antes del humedal.</p> <p>Se recomendó una carga máxima de $16 \text{ g d}^{-1} \text{ m}^{-2}$ de sólidos suspendidos aplicada a la sección transversal para mantener más del 65% y 80% de eliminación de DQO y SS, respectivamente, y prevenir la obstrucción del sistema.</p> |

| Referencia | País | Propósito | Resultados |
|---------------------------------|-----------|---|---|
| Gallego-Schmid & Tarpani (2019) | India | Analizar las principales conclusiones, y desafíos relacionados con el tratamiento descentralizado de aguas residuales en países en desarrollo desde una perspectiva del ciclo de vida. | <p>Las tecnologías extensivas para el tratamiento de aguas residuales, particularmente los humedales artificiales, han sido ampliamente estudiados como una opción sostenible para la gestión de aguas residuales en países en desarrollo.</p> <p>Las fronteras del sistema en los análisis de ciclo de vida (ACV) del tratamiento de aguas residuales en países en desarrollo son cruciales, y la mayoría de los estudios incluyen etapas como el vertido en rellenos sanitarios y la aplicación agrícola como opciones de disposición final.</p> <p>Se destaca como importante, pero ausente en muchos estudios, la consideración de impactos ambientales más allá de la eutrofización y el calentamiento global, como el potencial de ecotoxicidad terrestre (TETP) debido a metales pesados en los lodos.</p> |
| Singh et al. (2019) | India | evaluar la eficiencia de tratamiento de ocho plantas descentralizadas de tratamiento de aguas residuales en el estado de Maharashtra, India, en función de aspectos técnicos, sociales y ambientales. | <p>Los criterios para seleccionar una tecnología para el TDAR no deben basarse únicamente en sus costos asociados, sino también sus potenciales beneficios económicos, como la reutilización de las aguas residuales tratadas.</p> <p>El efluente terciario se utilizó para reemplazar el agua de grifo (fresca), y se encontraron beneficios relacionados con el ahorro de agua. Este tipo de beneficios se consideran equivalentes a un ahorro de energía que de otro modo se consumiría para la producción de la misma cantidad de agua de grifo o el uso de agua dulce.</p> <p>Los impactos ambientales de los sistemas de TDAR evaluados son principalmente causados por el uso de electricidad requerida para bombear efluente con fines de reutilización, el transporte de lodos y su disposición en el vertedero.</p> |
| Yu Iistyorini et al. (2019) | Indonesia | Evaluar el rendimiento del Reactor Anaerobio con Deflectores (RAD) en el TDAR en el área urbana de Malang, Indonesia. | <p>La mayoría de los Reactores Anaerobios con Deflectores (RAD) en Malang presentaban una baja calidad del efluente, donde solo el 14% de los RAD cumplen con los estándares de remoción de contaminantes. Esto es causado por la falta de mantenimiento de las unidades de tratamiento.</p> |

| Referencia | País | Propósito | Resultados |
|----------------------------------|----------|---|--|
| Ca stañer et al. (2020) | Brasil | Evaluar desde un enfoque ambiental y económico un Humedal de Flujo Subsuperficial Horizontal en un área en desarrollo en Brasil. | <p>El Humedal de Flujo Subsuperficial Horizontal estudiado remueve en promedio un 60% de DBO₅.</p> <p>El Humedal de Flujo Subsuperficial Horizontal mejora la calidad del agua con un tratamiento del 13.3% del caudal base del río.</p> |
| Bernal et al. (2021) | Colombia | Presentar los criterios clave para la gestión descentralizada de aguas residuales, enfocándose en aspectos económicos, sociales, tecnológicos, ambientales e institucionales. | <p>Identificó los indicadores clave para la gestión descentralizada de aguas residuales en áreas urbanas, donde se encontró que el apoyo institucional es crucial para el éxito a largo plazo de los sistemas descentralizados.</p> <p>Los sistemas descentralizados ofrecen saneamiento rural y minimizan los impactos ambientales, además, tienen un mayor potencial para la recuperación de energía.</p> |
| Datta et al. (2021) | India | Evaluar un humedal artificial para tratamiento de aguas residuales rurales en aldeas con escasez de recursos en India. | <p>El humedal artificial evaluado logró una remoción del 65% de DQO, el 60% de sulfato y el 67% de nitrógeno inorgánico.</p> <p>La remoción de coliformes totales se mantuvo consistentemente por encima del 80% en las aguas residuales tratadas.</p> <p>La biomasa del humedal artificial se utilizó como abono, proporcionando ingresos adicionales para los agricultores.</p> <p>La operación del humedal artificial por los habitantes de la aldea llevó a la generación de ingresos y una mejor gestión de las aguas residuales.</p> |
| Ergateg & Ben Miled (2021) | Túnez | Estudiar los humedales artificiales híbridos para el tratamiento terciario descentralizado de aguas residuales municipales. | <p>Los humedales artificiales híbridos lograron tasas de remoción satisfactorias para varios contaminantes, donde se observó un efecto significativo de remoción de fósforo en el sistema de humedales artificiales de tratamiento.</p> <p>Se presentó un efecto estacional en el rendimiento de los humedales artificiales durante el ciclo de vida de las plantas.</p> |

| Referencia | País | Propósito | Resultados |
|------------------------|------------|--|--|
| Ferreira et al. (2021) | Brasil | Explorar estudios acerca de la implementación de sistemas de TDAR en Brasil y evaluar su potencial de aplicación. | Las tecnologías TDAR son flexibles y aplicables en el 79% de los municipios brasileños. Sin embargo, los vacíos legales y las barreras obstaculizan el uso extensivo de los TDAR. Además, Los estudios carecen de análisis de rendimiento basados en los requisitos legales brasileños. |
| Pinninti et al. (2021) | India | Investigar la eficiencia de los sistemas naturales de tratamiento de aguas residuales en India. | <p>Se encontró que los sistemas basados en lagunas estabilización funcionan presentan un mejor rendimiento que aquellos basados en humedales artificiales.</p> <p>Los sistemas mantenidos regularmente alcanzan una eficiencia de remoción del 80% para materia orgánica y nutrientes.</p> <p>Los interesados prefieren el agua tratada por sistemas de tratamiento natural sobre las aguas residuales crudas para la irrigación.</p> |
| Prescott et al. (2021) | Sur global | Revisar proyectos de infraestructura verde en el Sur Global, enfocándose en sistemas de tratamiento descentralizados de aguas residuales que utilizan humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales. | <p>La escala y el alcance de los sistemas descentralizados es amplia, sirviendo desde unos pocos hogares hasta miles.</p> <p>La infraestructura verde ofrece soluciones descentralizadas para el tratamiento de aguas residuales en comunidades vulnerables.</p> <p>Los desafíos en la implementación están más relacionados con la gobernanza y los aspectos socioculturales.</p> <p>La participación comunitaria es crucial en el diseño y la gobernanza de los sistemas de saneamiento.</p> |

| Referencia | País | Propósito | Resultados |
|----------------------------------|----------------------|--|--|
| Rodrigues Mesquita et al. (2021) | Brasil | <p>Investigar el cumplimiento de los sistemas descentralizados de tratamiento de aguas residuales con normas ambientales.</p> <p>Evaluar el rendimiento de tanques sépticos y filtros anaeróbicos en Brasil para el tratamiento descentralizado de aguas residuales.</p> | <p>Los sistemas de tanques sépticos y filtros anaeróbicos cumplen con los requisitos legislativos con altas eficiencias de remoción.</p> <p>Factores como la rutina de limpieza y la dimensión del sistema influyen en el rendimiento del sistema de tratamiento.</p> <p>Las contribuciones de aguas pluviales estuvieron ausentes en las plantas de tratamiento de aguas residuales debido a redes de recolección cortas.</p> |
| Tonetti et al. (2021) | Brasil | Determinar la viabilidad económica de los sistemas in sitio versus los sistemas de agrupamiento basados en escenarios Brasil. | En distancias entre viviendas de hasta 18 metros, los sistemas descentralizados son económicamente más viables que las soluciones individuales. Entre 19 y 75 metros, los sistemas de tratamiento descentralizado son más viables que el sistema in sitio a partir de los mil contribuyentes. A partir de 76 metros en adelante, las soluciones individuales siempre serán más económicamente viables. |
| De et al. (2022) | Países en desarrollo | Discutir los desafíos de los países en desarrollo en la implementación de sistemas de tratamiento de aguas residuales basadas en la naturaleza. | <p>Se identificó como factores clave la participación comunitaria, la sostenibilidad y la consideración de los costos sociales en la toma de decisiones.</p> <p>Los proyectos de STN pueden ser una solución de bajo costo y sostenible para el tratamiento de aguas residuales en países en desarrollo, siendo los sistemas descentralizados una alternativa factible que permite la participación comunitaria.</p> |
| García et al. (2022) | México | Analizar aspectos del funcionamiento de la Planta de Tratamiento Descentralizada de Aguas Residuales Ecoparque ubicada en Tijuana, México. | El tratamiento aeróbico resultó en una remoción >85% de la demanda química de oxígeno. Además, la adición de una laguna de maduración condujo a una reducción de aproximadamente 4 log en los coliformes fecales en el efluente. Por este motivo, la planta de TADR cumplió con los estándares de efluente para el riego de paisajes. |

| Referencia | País | Propósito | Resultados |
|----------------------------------|-------|---|---|
| Geetha Varma et al. (2022) | India | Estudiar sistemas de TDAR gestionados por la comunidad para mejoras en el saneamiento en áreas densamente pobladas. | Los sistemas de TDAR tienen la potencial para brindar acceso al servicio de tratamiento de aguas residuales en zonas de transición ubicadas entre áreas urbanas y rurales. Además, los TDAR ofrecen la posibilidad de mejoras relativamente rápidas en el saneamiento en áreas densamente pobladas donde la autoridad local aún no proporciona un servicio completo de saneamiento. |

Nota: TDAR: Tratamiento Descentralizado de Aguas Residuales

1.6 Selección de tecnologías para el Tratamiento Descentralizado de Aguas Residuales

La selección de tecnologías es un aspecto crucial en la implementación de un sistema para el TDAR. Una elección inadecuada puede resultar en trenes de tratamiento no sostenible. Por lo tanto, al elegir tecnologías para el tratamiento de AR, es esencial considerar diversos criterios de ciclo de vida, abarcando el diseño, construcción, operación y mantenimiento, además de tener en cuenta la ubicación geográfica, condiciones socioeconómicas y otros posibles impactos (Gallego-Schmid & Tarpani, 2019; Massoud et al., 2009). Aunque en el pasado las tecnologías eran seleccionadas principalmente por expertos atendiendo a aspectos técnicos y costos de construcción, se observa un creciente reconocimiento de nuevos enfoques en la selección de tecnologías (Singh & Kazmi, 2018). A continuación, se presentan diversas herramientas que podrían ser de utilidad para la selección de tecnologías para e TDAR en el contexto de estudio.

1.6.1 Toma de Decisiones Estructurada

El SDM (por sus siglas en inglés) es un enfoque que provee un marco para la sistematización del proceso de toma de decisiones (Runge, 2020). Para ello, la herramienta comprende seis pasos fundamentales: (i) Conocimiento del contexto, (ii) Definir objetivos y métricas, (iii) Desarrollo de alternativas, (iv) Estimación de implicaciones, (v) Evaluación de compensaciones y selección, y (vi) implementación, seguimiento y revisión. Es importante resaltar que, lo que es hecho a cada paso proceso, depende tanto de la naturaleza de la decisión, los recursos y el tiempo disponible (Gregory, 2012). El enfoque SDM es universalmente aplicable, y distintas herramientas pueden ser integradas en las distintas etapas del proceso (Gregory, 2012). Asimismo, se debe resaltar que, el propósito primario del SDM es ayudar e informar a los tomadores de decisiones antes que prescribir una solución preferida (Conroy & Peterson, 2013; Gregory, 2012).

1.6.2 Análisis multicriterio

El Análisis Multicriterio (AMC) surge como una herramienta de utilidad para mejorar los procesos de selección de tecnologías para el tratamiento de AR. Esta técnica permite organizar o puntuar diversas opciones en relación con una serie de indicadores establecidos (Geneletti, 2019). En este análisis, la información se representa mediante una matriz X con n opciones y m criterios, donde el desempeño de la opción i respecto al criterio j se refleja en la posición X_{ij} , y una matriz W con m pesos, donde W_a representa la importancia del parámetro (Hajkowicz & Collins, 2007). Normalizando la matriz X y aplicando los pesos específicos a cada criterio, se facilita la organización, análisis y toma de decisiones (Hajkowicz & Collins, 2007). El AMC proporciona un análisis más transparente, auditable y riguroso para la toma de decisiones, y su uso está en aumento en la gestión del recurso hídrico (Hajkowicz & Collins, 2007; Mutikanga et al., 2011). Estas herramientas permiten adoptar un enfoque más holístico, considerando aspectos específicos del contexto local en la toma de decisiones (Dewalkar & Shastri, 2022; Gallego-Schmid & Tarpani, 2019).

Entre los métodos multicriterio más ampliamente utilizados se encuentra el método de jerarquía analítica, conocido por sus siglas en inglés como AHP, el cual ha encontrado una aplicación significativa en la gestión del recurso hídrico (Bottero et al., 2011). Propuesto por Saaty (1977), este método se basa en la comparación por pares. En esta metodología, la comparación se refleja en una escala de preferencia formulada por el propio autor. Uno de los usos principales de este método es la priorización de criterios, donde a través de la comparación entre pares se obtiene un vector propio con pesos ponderados para cada criterio (Munier, 2011).

De la misma manera, el método *Technique for Order of Preference by Similarity to an Ideal Solution* (TOPSIS) (Hwang & Yoon, 1981) organiza un listado de alternativas de mejor a peor

desempeño, según un listado de criterios definidos a través de la medición de la cercanía a la solución ideal, y a la lejanía de la decisión negativa ideal. Este método ha sido aplicado para el apoyo a la toma de decisiones de diversos problemas en contextos diferentes debido a su facilidad de aplicación, bajo requerimiento computacional y la posibilidad de utilizar variables cualitativas y cuantitativas (Pandey et al., 2023).

1.6.3 Lógica difusa y métodos multicriterio difusos

La lógica difusa es una teoría desarrollada por Zadeh (1965), con el fin de permitir un mejor tratamiento de información ambigua e imprecisa en escenarios con incertidumbre, que suelen ser comunes a diversos contextos. La lógica difusa se compone de conjuntos difusos que consisten en funciones de membresía continuas $A(x)$ que asocia cada número $x \in X$ a un grado de membresía, siendo una interpretación popular los números difusos triangulares representados en tripletas $A = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)$ (Papathanasiou & Ploskas, 2018). La aplicación de lógica difusa en la construcción de modelos matemáticos puede ayudar a mejorar su idoneidad, y en consecuencia mejorar su eficiencia y precisión (Pedrycz et al., 2011).

Una de las aplicaciones comunes de la lógica difusa corresponde al tratamiento de la incertidumbre y ambigüedad de las variables lingüísticas (Pedrycz et al., 2011). Por ejemplo, a pesar de que el método AHP permita manipular variables cualitativas y cuantitativas, la inclusión de lógica difusa contribuye a reducir la ambigüedad e incertidumbre de las evaluaciones basadas en la opinión de los tomadores de decisión (Emrouznejad & Ho, 2017). Por esta razón, Buckley (1985) plantea una variante del método AHP integrando la lógica difusa a la escala de Saaty, asignando funciones de membresía cada uno de los valores de la escala, y utilizando métodos geométricos para el procesamiento de las evaluaciones que se realizan utilizando esta escala como referencia.

En la misma línea, el método TOPSIS tradicional ha sido modificado para la inclusión de lógica difusa, esto debido a que muchas veces la información determinística utilizada puede representar un nivel de incertidumbre (Pandey et al., 2023). Por este motivo, Chen (2000) introdujo una versión extendida del método TOPSIS incluyendo números difusos triangulares y utilizando métodos de normalización lineal para el cálculo de distancias ideales. La metodología propuesta Chen (2000) es popular por su relativa sencillez en cuanto en proceso de medición de distancias y su bajo costo computacional.

1.7 Experiencias de selección de tecnologías para el tratamiento descentralizado de aguas residuales

Debido a la complejidad del proceso de selección de tecnologías para el tratamiento de ARD, diversos estudios han propuesto o utilizado herramientas para apoyar la toma de decisiones. El estudio de herramientas para la toma de decisiones orientadas a la selección de tecnologías para el tratamiento de ARD ha experimentado un crecimiento en los últimos años (Dewalkar & Shastri, 2022). Por ejemplo, Dewalkar & Shastri (2022), combinaron el AMC con el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) para determinar las tecnologías adecuadas de tratamiento descentralizado en un edificio residencial. Otro estudio que emplea herramientas de apoyo a la toma de decisiones es el realizado por Lizot et al. (2021), que utiliza AHP junto con ELECTRE-II para la selección de tecnologías de tratamiento de AR a escala municipal. Por otro lado, Mena-Ulecia & Hernández, (2015) aplican criterios de sostenibilidad para evaluar tecnologías en el TDAR en contextos periurbanos. Sin embargo, este estudio carece de un análisis detallado de las distintas alternativas, basándose únicamente en la literatura como fuente de información y sin considerar las particularidades de cada asentamiento. Por otro lado, Kamble et al., (2017) aplicó el método Fuzzy-TOPSIS, utilizando criterios de análisis de ciclo de vida y la opinión de expertos para la

selección de tecnologías en el tratamiento de aguas residuales a escala municipal. En el ámbito del AMB, Rodríguez Arenas (2019) empleó el método TOPSIS para seleccionar una tecnología de tratamiento para el condominio Mensulí en Floridablanca. Sin embargo, al igual que Mena-Ulecia & Hernández (2015), este estudio se basa exclusivamente en información proporcionada por una revisión de literatura, omitiendo también detalles particulares del contexto.

1.8 Vacío en el conocimiento

Con base en la revisión realizada, no se identificaron herramientas destinadas a la selección de tecnologías para el TDAR en comunidades que residen en asentamientos no planificados en países tropicales en desarrollo. A pesar de que los estudios sobre TDAR han experimentado un aumento en los últimos años, estos se han centrado principalmente en aspectos técnicos. Además, se observa una escasez de investigaciones que integren aspectos sociales, económicos y técnicos mediante la aplicación de herramientas para la selección de tecnologías en estos contextos. La aplicación de herramientas para mejorar el proceso de selección de tecnologías para el tratamiento de ARD ha sido más común a nivel municipal o en contextos descentralizados diferentes, como edificios residenciales. Las investigaciones identificadas en asentamientos no planificados carecen de un análisis detallado del contexto para la selección de tecnologías. Por lo tanto, resulta imperativo proponer herramientas específicas para la selección de tecnologías en el TDAR en asentamientos no planificados, utilizando un enfoque holístico que considere las particularidades de estos contextos.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Proponer una herramienta para la selección de tecnologías para el tratamiento descentralizado de aguas residuales domésticas en asentamientos no planificados de países tropicales en desarrollo considerando criterios técnicos, sociales, ambientales y económicos.

2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar trenes tecnológicos para el tratamiento descentralizado de aguas residuales en asentamientos no planificados de países tropicales en desarrollo.
- Formular la herramienta para la selección de sistemas de tratamiento descentralizado de aguas residuales en asentamientos no planificados de países tropicales en desarrollo.
- Validar la herramienta para la selección de sistemas para el tratamiento descentralizado de aguas residuales en el asentamiento Los Santos Bajo (Bucaramanga, Colombia).

3. METODOLOGÍA

3.1 Fase I: Caracterización de trenes tecnológicos para el tratamiento descentralizado de aguas residuales en asentamientos no planificados de países tropicales en desarrollo

Se realizó una revisión de literatura en bases de datos sobre sistemas tratamiento descentralizado de aguas residuales (TDAR) en países tropicales en desarrollo implementados a escala real. Para esto, se usó la metodología elementos de informes preferidos para los protocolos de revisión sistemática y metaanálisis o por sus siglas en inglés PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses*). Esta metodología se ha utilizado en diversos estudios para sistematizar, investigar y analizar literatura proveniente de bases de datos (Page et al., 2021). Las búsquedas se hicieron en las bases de datos Web of Science[®], SCOPUS[®] y Scielo, principales fuentes de información en el ámbito investigativo (Mongeon & Paul-Hus, 2016). La búsqueda se restringió al rango de tiempo de enero de 2003 a septiembre de 2023. Las ecuaciones booleanas utilizadas se presentan en la Tabla 3. Los términos clave utilizados fueron validados mediante la aplicación de tesauros de ScienceDirect Topics[®]. Los documentos recopilados fueron artículos científicos, artículos de revisión y capítulos de libros en inglés y español.

Tabla 3

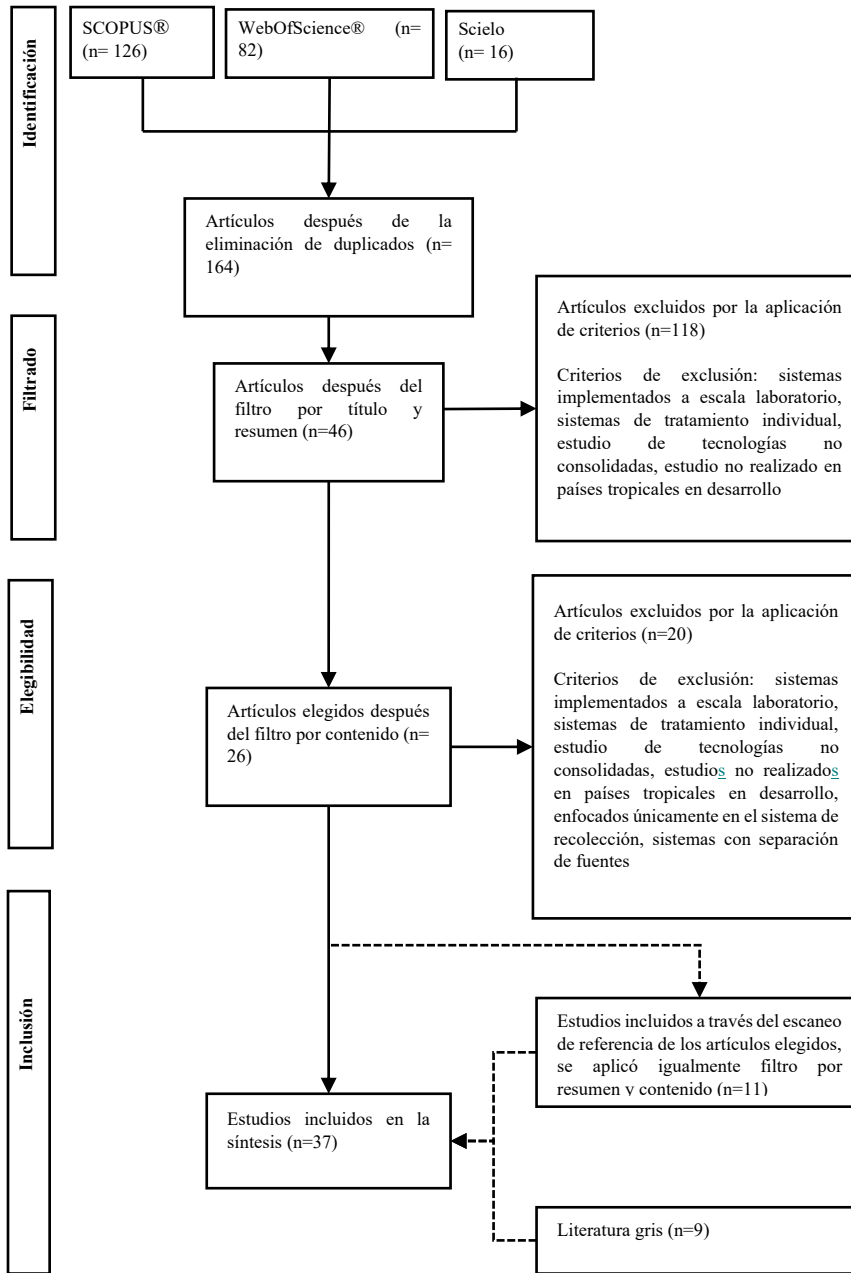
Ecuaciones de búsqueda utilizadas para la revisión de literatura sobre implementación de sistemas y caracterización de tecnologías para el tratamiento descentralizado de aguas residuales en países tropicales en desarrollo

| Base de datos | Ecuación de búsqueda |
|---------------|--|
| Scopus® | ((("decentralized" OR "small-scale") AND ("Wastewater" OR "Waste Water") AND "Treatment") OR "DEWATS") AND ("developing countries" OR "slums" OR "settlement" OR "peri-urban")) |
| WebofScience® | ((("decentralized" AND ("Wastewater" OR "Waste Water") AND "Treatment") OR "DEWATS") AND ("developing countries" OR "slums" OR "settlement" OR "peri-urban")) |
| Scielo | ("decentralized" AND "Wastewater" AND "treatment") OR ("tratamiento" AND ("Agua Residual" OR "aguas residuales") AND "decentralizado") |

Fuente: elaboración propia

Las diferentes listas de documentos encontrados fueron descargadas y procesadas utilizando Excel® para combinar, eliminar duplicados y generar un solo listado. Una vez generado el listado se aplicaron distintos filtros por título, resumen y contenido, teniendo como criterios de descarte: i) sistemas implementados a escala laboratorio, ii) sistemas de tratamiento individual, iii) estudios de desarrollo de nuevas tecnologías, iv) estudios no realizados en países tropicales en desarrollo, v) sistemas que no trataran AR domésticas y vi) sistemas con separación de fuentes. Adicionalmente, se utilizó la técnica bola de nieve para complementar la búsqueda, revisando las referencias de los estudios seleccionados y escogiendo artículos que se consideraron pertinentes para el desarrollo de la revisión. Estos artículos fueron también filtrados por resumen y contenido. En la Figura 1 se observa el protocolo del proceso de selección de literatura utilizando la metodología PRISMA.

Figura 1
Proceso de revisión de literatura utilizando la metodología Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses (PRISMA).



Seguidamente, utilizando la base de datos filtrada, se creó una tabla resumen en Excel[®] recopilando información como autores, año, tecnologías aplicadas, objetivo del estudio, tipo de estudio y población cubierta. Esta información fue empleada para determinar las distintas

tecnologías aplicadas en sistemas de tratamiento descentralizado en países tropicales en desarrollo. Posteriormente, se elaboraron fichas para la caracterización de distintos aspectos técnicos, ambientales y económicos de las tecnologías encontradas. Los aspectos incluidos en la caracterización se relacionan en la Tabla 4.

Tabla 4

Aspectos considerados en la caracterización de las tecnologías para el tratamiento de aguas residuales

| Aspectos | Ítem estudiado | Definición |
|-------------|--|--|
| Técnicos | Nivel de tratamiento Área requerida | Etapa de tratamiento en la suele ser aplicada la tecnología Área superficial ocupada por la tecnología |
| | Remoción de Materia Orgánica | Eficiencia de remoción de materia orgánica en función de la reducción de la Demanda Biológico de Oxígeno (DBO ₅) |
| | Remoción de Sólidos Suspendidos | Eficiencia de remoción de materia orgánica en función de la reducción de Sólidos Suspendidos Totales (SST) |
| | Remoción de Nutrientes | Eficiencia de remoción de materia orgánica en función de la reducción de nitrógeno y fósforo |
| | Remoción de microorganismo patógenos | Eficiencia de remoción de materia orgánica en función de la reducción de coliformes totales y fecales |
| | Consumo energético | Energía consumida durante la operación de la tecnología debido a sus diferentes componentes |
| | Facilidad de Operación & Mantenimiento | Indicador de la facilidad de operación y mantenimiento de la tecnología en función del requerimiento de mano de obra especializada |
| Económicos | Inversión inicial | Indicador de los costos asociados a la construcción o adquisición de la tecnología |
| | Costos de Operación y Mantenimiento | Indicador de los costos asociados a los costos asociados a las labores a realizar durante la implementación de la tecnología |
| Ambientales | Potencial Generación de olores | Indicador del potencial de generación de olores ofensivos durante la implementación de la tecnología |
| | Potencial generación de ruidos | Indicador del potencial de generación de ruidos ofensivos durante la implementación de la tecnología |
| | Producción de lodos | Indicador del volumen de lodos generados durante el funcionamiento de la tecnología |
| | Grado de estabilización de lodos | Contenido de materia orgánica y microorganismos patógenos en los lodos generados durante el tratamiento |

Fuente: Elaboración propia

La información recopilada y presentada en las fichas de caracterización fue la base para la conformación de los trenes de tratamiento. Los trenes se plantearon asignando una tecnología a cada nivel de tratamiento y considerando las recomendaciones de aplicabilidad para diferentes rangos poblacionales de las diversas tecnologías, información que se identificó durante la revisión de la literatura. Además, en la formulación de los trenes se consideró que contaran con al menos uno de los siguientes aspectos: generación de lodos con alto nivel de estabilización, bajo consumo energético, baja área superficial requerida y/o operación y mantenimiento que no requiera personal especializado. Los factores presentados anteriormente juegan un papel importante en la implementación de sistemas de TDAR (Bernal et al., 2021; Mason et al., 2020). Además, estos se relacionan con diferentes problemas que se pueden presentar en asentamientos no planificados (UN-HABITAT, 2003).

Una vez formulados los trenes de tratamiento, se procedió a caracterizarlos para evaluar la calidad de sus efluentes. Esta fase tenía como objetivo la identificación de posibles aplicaciones para la reutilización de dichos efluentes. Para este análisis, se realizó una revisión de las diversas regulaciones y documentos que abordaran el tema de la reutilización de subproductos generados durante el tratamiento de AR. Esta información fue recopilada y sintetizada utilizando la herramienta Excel[®]. La determinación de las posibles aplicaciones de reutilización se basó en la comparación de los estándares de calidad establecidos en las distintas regulaciones con las características de calidad esperadas de los diversos subproductos generados por los trenes de tratamiento.

3.2 Fase II: Formulación de la herramienta para la selección de trenes para el tratamiento descentralizado de aguas residuales en asentamientos no planificados de países tropicales en desarrollo

La herramienta para la selección de trenes de tratamiento fue planteada en consonancia con los lineamientos establecidos por la metodología SDM. Esta metodología divide el proceso de decisiones en cinco fases (Gregory, 2012): (i) Clarificación del contexto de decisión, (ii) Definición de objetivos y métricas, (iii) Desarrollo de alternativas, (iv) Estimación de consecuencias y (v) Evaluación de compensaciones y selección. Para cada una de las etapas de esta metodología fueron planteadas actividades para realizar un proceso de selección sistemática de trenes de tratamiento y alineado con los principios de desarrollo sostenible. Como referencia para el planteamiento de la herramienta también fueron consultadas guías internacionales para la selección de sistemas de tratamiento como las publicadas por: (i) CENTA (2021), (ii) Ortega de Miguel (2010), (iii) Noyola et al. (2013), (iv) Brault et al. (2022), (v) Tilley et al. (2014) y (vi) AECID (2022). Además, también se consideraron diversos artículos científicos relativos a la selección de alternativas para el tratamiento de AR. A continuación, se presentan en mayor detalle actividades relacionadas con el planteamiento de la herramienta.

3.2.1 Identificación de criterios de sostenibilidad para la selección de trenes de tratamiento para el tratamiento descentralizado de aguas residuales en asentamientos no planificados de países tropicales en desarrollo

Esta fase comenzó con un proceso de revisión de literatura dividido en dos etapas: i) Revisión en base de datos indexadas y ii) Revisión de literatura gris (documentos técnicos o institucionales). Al Igual que para la sección 0, para la primera etapa se usó la metodología PRISMA. Para la recolección inicial de literatura se emplearon las bases de datos SCOPUS® y WebOfScience®. Se

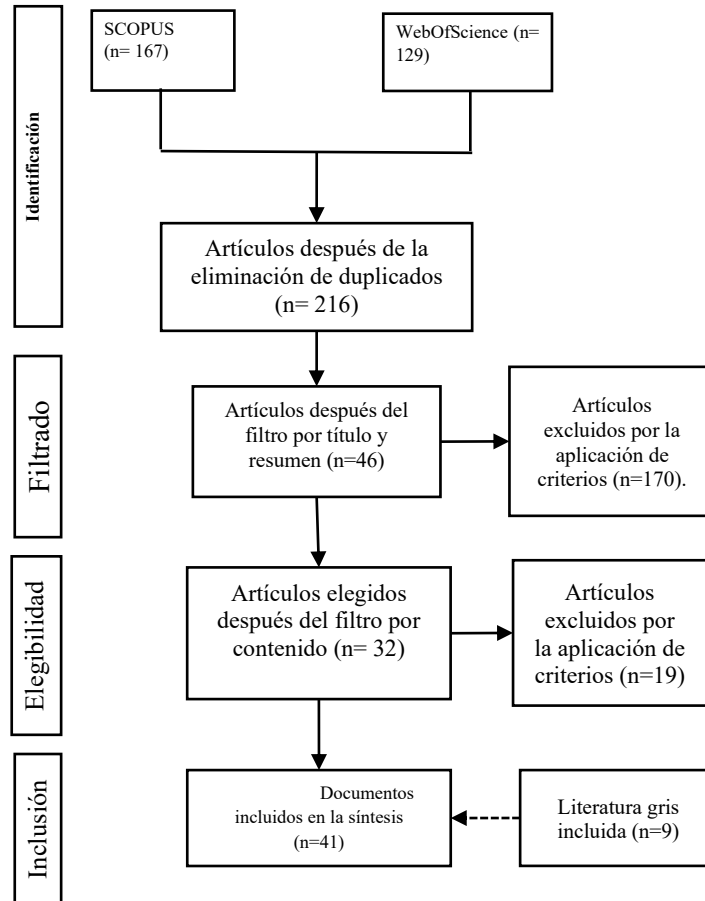
realizó una búsqueda de artículos en inglés y español, publicados en una ventana de tiempo entre enero del 2003 y septiembre de 2023, con las ecuaciones que aparecen en la Tabla 5. El procedimiento utilizado se observa en la Figura 2.

Los registros encontrados fueron compilados y procesados usando Excel®, esto para la eliminación de duplicados y la generación de un único listado. En el listado generado fueron aplicados filtros por título, resumen y contenido utilizando los siguientes criterios de exclusión: i) Estudios no relativos al tratamiento de AR, ii) Estudios referentes a la sección de tecnologías de tratamiento de AR diferentes a las domésticas, y iii) Estudios enfocados en aspectos diferentes a la selección de diferentes aspectos distintos al tren de tratamiento (p.ej. sistemas de recolección, lugar de construcción y tratamiento de lodos). Además, se recopiló literatura gris, obtenida de fuentes institucionales como la Organización de Naciones Unidas (ONU), el Banco Mundial y la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE). El procedimiento utilizado se puede observar en la Figura 2.

Tabla 5

Ecuaciones de búsqueda utilizadas para la recopilación de criterios y planteamiento de herramienta para la selección de tecnologías para el tratamiento de descentralizado aguas residuales en asentamientos no planificados de países tropicales en desarrollo

| Base de datos | Ecuación de búsqueda |
|---------------|--|
| Scopus® | ("wastewater treatment" AND "technology") AND ("sustainability assessment " OR "selection" OR "Decision" OR "choice") AND ("criteria" OR "indicators") AND ("Social" OR "technical" OR "economic" OR "environmental" OR "institutional") |
| WebofScience® | "Wastewater treatment" AND "technology" AND ("sustainability assessment " OR "selection" OR "Decision" OR "choice") AND ("criteria" OR "indicators") AND ("Social" OR "technical" OR "economic" OR "environmental" OR "institutional") |

Figura 2*Metodología utilizada para la recopilación de criterios de selección*

Se extrajeron indicadores de sostenibilidad utilizados para la selección de trenes de TDAR a partir de los documentos filtrados. Estos indicadores fueron organizados en una tabla en Excel®, consignando aspectos como autor, año, criterios, indicador y unidad de medida. Los indicadores similares se unificaron, y se eliminaron indicadores dependientes y criterios cuya medición no es factible en este estudio.

Los indicadores recopilados fueron denominados subcriterios y fueron reorganizados, agrupándolos en diferentes categorías planteadas conforme a los principios de saneamiento sostenible establecidos por la *Sustainable Sanitation Alliance* (SuSanA, 2008). De esta manera, se

definieron tres categorías clave, denominadas “criterios”, para abordar los cinco aspectos fundamentales relacionados con el saneamiento sostenible. Siguiendo la descripción previamente expuesta, los criterios establecidos fueron: i) Criterio técnico, englobando los aspectos técnicos operativos junto con los relacionados con la salud e higiene; ii) Criterio socioeconómico, que comprende los aspectos económicos, financieros, sociales e institucionales; y iii) Criterio ambiental, que se refiere a los aspectos vinculados al entorno y los recursos naturales.

Este proceso de reestructuración y refinamiento llevó a la creación de tres criterios, cada uno de los cuales se compone de varios subcriterios. Cada uno de estos subcriterios recopilados y organizados se definió en concordancia con los resultados de la revisión de literatura, y se establecieron las métricas correspondientes para su evaluación, con el fin de priorizarlos y llevar a cabo su posterior evaluación.

Respecto al componente social del proyecto, es fundamental que desde etapas tempranas de proyectos de saneamiento las comunidades estén involucradas en el proceso de toma de decisiones (Capodaglio et al., 2017). Por este motivo, en este proyecto se decidió que el componente social del proyecto fuera abordado desde una perspectiva participativa con actores de la comunidad. En este orden, esta fase participativa será realizada en el marco de la ejecución del proyecto “Desarrollo de estrategias para el manejo de aguas residuales en asentamientos periurbanos, con enfoques de sostenibilidad y economía circular, en la cuenca del río Alto Lebrija”. Este proyecto buscará desarrollar insumos que faciliten a los diferentes encargados de garantizar servicios de saneamiento básico de toma de decisiones permitiendo presentar a la comunidad alternativas priorizadas teniendo en cuenta aspectos técnicos, económicos y ambientales.

4.1.1. Priorización de criterios clave para la selección de trenes de tratamiento para el tratamiento descentralizado de aguas residuales en asentamientos no planificados de países tropicales en desarrollo

Una vez que se definieron los criterios clave y se estableció su método de evaluación, se procedió a priorizarlos para determinar su peso ponderado o importancia relativa. Este cálculo se llevó a cabo mediante la aplicación del método Fuzzy-AHP, utilizando como punto de referencia la opinión de expertos en el ámbito del TDAR en países tropicales en desarrollo. Para la aplicación del método Fuzzy-AHP se emplearon variables lingüísticas basadas en la escala de Saaty (1977) para las comparaciones por pares entre los criterios y subcriterios. Estas variables lingüísticas se convirtieron en valores difusos (ver Tabla 6).

La base de datos de expertos se construyó recopilando información de profesionales con experiencia en la investigación y la implementación acerca del TDAR en países tropicales en desarrollo, así como de aquellos con experiencia en el campo del saneamiento sostenible en dicho contexto. Estos actores fueron identificados en las revisiones de literatura presentadas en las secciones anteriores, analizando los autores de los artículos relevantes y aplicando la técnica de bola de nieve para ampliar la búsqueda. La creación de la base de datos se llevó a cabo utilizando el software Excel®, donde se registraron 130 expertos con sus nombres, profesiones, institución de afiliación, países de origen, área de experticia y correo electrónico de contacto.

Para simplificar la comparación entre pares, se organizó un cuestionario utilizando la herramienta Microsoft Forms®. El cuestionario se dividió en cuatro secciones: una para la priorización de los criterios y tres para la priorización de los subcriterios. Este cuestionario se distribuyó entre los expertos registrados en la base de datos y las respuestas obtenidas se recopilaron y procesaron utilizando Excel®. Posteriormente, se aplicó el método Fuzzy-AHP,

conforme a la propuesta de Buckley (1985), para la priorización de los criterios. Como resultado de este proceso, se obtuvieron los pesos ponderados correspondientes a los diferentes criterios.

Tabla 6

Variables lingüísticas para la comparación de pares adaptadas de la escala de Saaty

| Variable lingüística | Valor concreto | Escala difusa triangular | Escala triangular difusa reciproca |
|---------------------------|----------------|--------------------------|---|
| Igual importancia | 1 | (1,1,1) | (1, 1, 1) |
| Moderada importancia | 3 | (2,3,4) | ($\frac{1}{4}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{2}$) |
| Importante | 5 | (4,5,6) | ($\frac{1}{6}$, $\frac{1}{5}$, $\frac{1}{4}$) |
| Muy importante | 7 | (6,7,8) | ($\frac{1}{8}$, $\frac{1}{7}$, $\frac{1}{6}$) |
| Extremadamente importante | 9 | (9,9,9) | ($\frac{1}{9}$, $\frac{1}{9}$, $\frac{1}{9}$) |
| | 2 | (1,2,3) | ($\frac{1}{3}$, $\frac{1}{2}$, 1) |
| | 4 | (2,4,5) | ($\frac{1}{4}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{2}$) |
| Valores intermedios | 6 | (5,6,7) | ($\frac{1}{7}$, $\frac{1}{6}$, $\frac{1}{5}$) |
| | 8 | (7,8,9) | ($\frac{1}{9}$, $\frac{1}{8}$, $\frac{1}{7}$) |

Fuente: Adaptado de Çalik (2017)

3.3 Fase III: Validar la herramienta para la selección de sistemas para el tratamiento descentralizado de aguas residuales en el asentamiento Los Santos Bajo (Bucaramanga, Santander, Colombia).

La tercera fase de este estudio comprende la aplicación de la herramienta formulada para la selección de trenes para el TDAR en la fase anterior utilizando como caso de estudio el asentamiento Los Santos Bajo (Bucaramanga). Esto con el fin de determinar el tren de tratamiento con mayor potencial de sostenibilidad en la zona, sumado a, analizar el proceso de aplicación de la herramienta con el fin de evaluar su validez, determinando debilidades, fortalezas y oportunidades de mejora.

El proceso de aplicación de la herramienta comenzó con la fase de conocimiento del contexto. Para ello, fue completado el formulario de caracterización del asentamiento planteado durante la formulación de la herramienta. Este formato fue rellanado utilizando información

secundaria proveniente del “Documento de análisis del impacto de los vertimientos de aguas residuales de asentamientos periurbanos no planificados sobre el servicio hidrológico de suministro de las cuencas receptoras en tres comunidades caso de estudio” UIS & amb (2023), y Actualización Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica Río Alto Lebrija.” (CDMB, 2019).

Una vez diligenciado el formulario, el proceso continuó con la fase de definición de métricas y objetivos, donde fueron definidos aspectos fundamentales para la selección como el efluente requerido, las posibilidades de reúso y factores limitantes. Posteriormente, fueron determinados los trenes aplicables al asentamiento Los Santos Bajo, utilizando como insumos la biblioteca de trenes para el TDAR en asentamientos no planificados de países tropicales en desarrollo (Fase I) y los factores limitantes del asentamiento previamente determinados.

Una vez determinados los trenes aplicables en el asentamiento se preparó la matriz de desempeño frente a los criterios clave de sostenibilidad establecidos en la fase 0, para ello fue utilizada la caracterización de trenes aplicables en asentamientos no planificados desarrollada durante la formulación de la herramienta. Seguidamente, se realizó la evaluación y clasificación de los trenes aplicables respecto a los criterios. Esto se hizo aplicando el método multicriterio Fuzzy-TOPSIS teniendo como insumos los criterios clave de sostenibilidad priorizados y las hojas de cálculo para la aplicación del método multicriterio. Este proceso resultó en una clasificación de los trenes aplicables para el TDAR en Los Santos Bajo. Finalmente, los resultados obtenidos y el proceso implementado fueron analizados, identificando fortalezas y posibles falencias de la herramienta. Esto con el fin de plantear posibles mejoras para facilitar su implementación en contextos similares.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Fase I: Caracterización de trenes tecnológicos para el tratamiento descentralizado de aguas residuales en asentamientos no planificados de países tropicales en desarrollo

4.1.1 *Caracterización de tecnologías para el tratamiento descentralizado de aguas residuales en países tropicales en desarrollo*

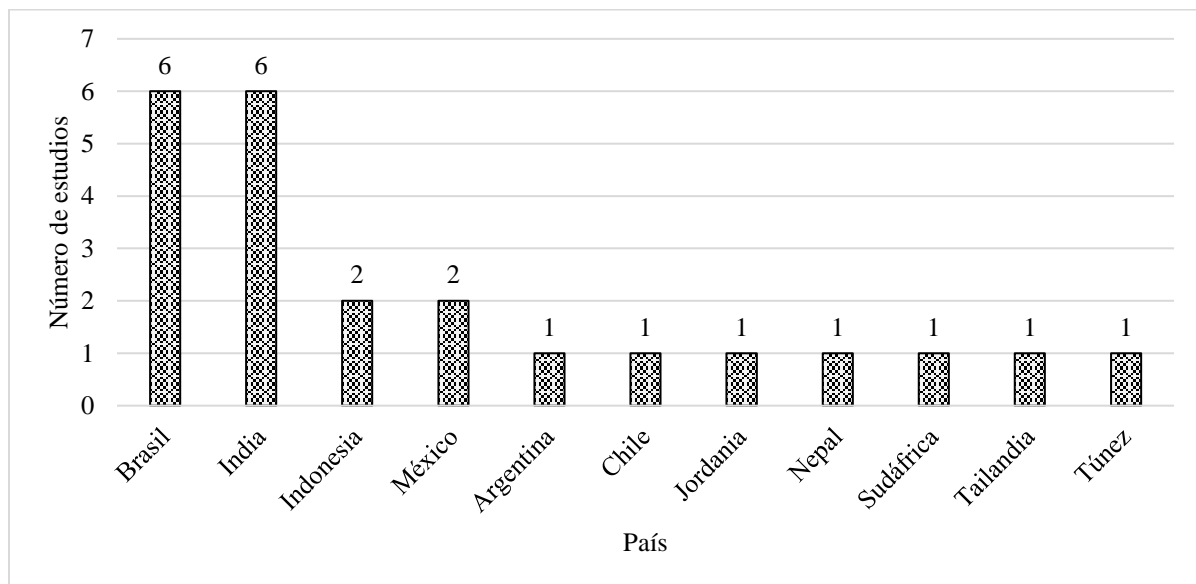
La revisión de literatura resultó en 37 documentos directamente relacionados con experiencias de implementación de sistemas para el tratamiento de aguas residuales en países tropicales en desarrollo (ver Anexo 1). Estos documentos se enfocan principalmente en el estudio de la factibilidad económica, el impacto ambiental, el desempeño técnico y las oportunidades de aprovechamiento de subproductos generados durante el tratamiento. La

Figura 3 muestra el número de publicaciones sobre este tema, donde se observa el liderazgo de India y Brasil, relacionado principalmente con diferentes inversiones financieras realizadas en el sector de agua y saneamiento (Ferreira et al., 2021; Kuttuva et al., 2018).

Figura

3

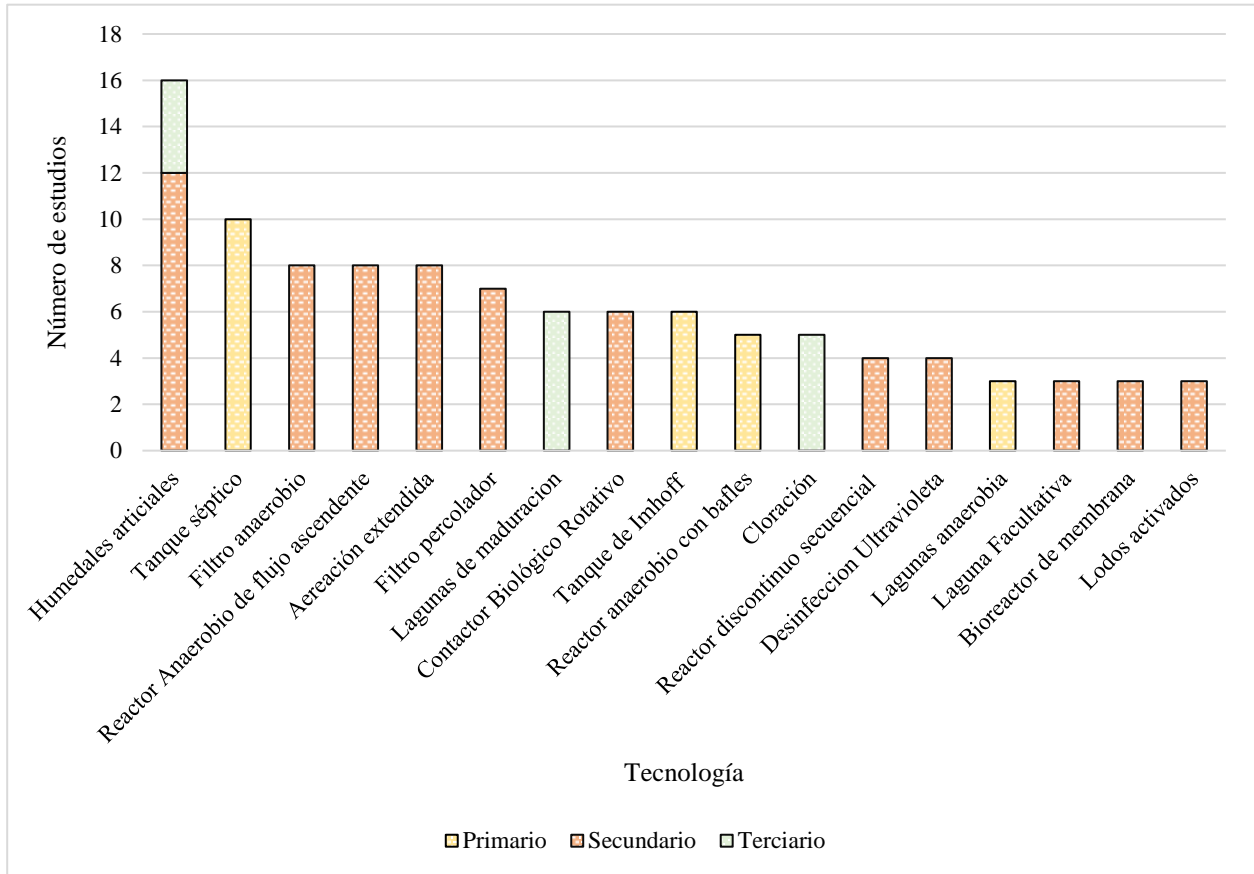
Distribución de sistemas descentralizados para el tratamiento de aguas residuales encontrados por país



En la Figura 4 se presentan las frecuencia de distintas tecnologías aplicadas para el TDA, se observa predominio de las tecnologías anaerobias para el tratamiento primario a nivel descentralizado, siendo el tanque séptico la opción más común (Massoud et al., 2009; Muzioreva et al., 2022). Esta tendencia se debe principalmente a su capacidad para tratar caudales variables y sus bajos requerimientos de área y de consumo energético (N. K. Singh et al., 2015). En el caso de los Reactores Anaerobios de Flujo Ascendente (RAFA), el balance energético puede llegar a ser positivo si se hace aprovechamiento del biogás generado (A. Singh et al., 2019; N. K. Singh et al., 2015). De igual manera, tecnologías como los Reactores Anaerobios con Deflectores (RAD) han ido ganando popularidad debido a que son operados y mantenidos de manera simple y presentan mayores remociones de carga contaminante en comparación con los tanques sépticos convencionales (del Castillo et al., 2022; A. Singh et al., 2019; Yulistyorini et al., 2019).

Figura 4

Distribución de tecnologías para el tratamiento descentralizado de aguas residuales según el número de estudios



Respecto al tratamiento secundario, la oferta se amplía respecto al tratamiento primario, siendo los humedales artificiales la tecnología con mayor frecuencia de aplicación (Brix et al., 2010; del Castillo et al., 2022; Machado et al., 2017). Esto se debe principalmente a su simpleza de operación, altas remociones e integración paisajística (Almuktar et al., 2018; Machado et al., 2017). Sin embargo, uno de los mayores inconvenientes de esta tecnología es su amplia área requerida (Vymazal, 2010). Las lagunas de estabilización también han sido ampliamente aplicadas para el tratamiento descentralizado, entre ellas se destacan las lagunas facultativas, con operación y mantenimiento relativamente sencillos y buenas remociones de carga contaminante (Ghazy et

al., 2008; Von Sperling, 2007b). Sin embargo, al igual que los humedales artificiales, esta tecnología tiene un alto requerimiento de área (Von Sperling, 2007b). En menor proporción, otras tecnologías intensivas han sido aplicadas para el tratamiento secundario; entre las tecnologías que involucran procesos aerobios se encuentran los Filtros percoladores (FP) y los contactores biológicos rotativos (CBR). Estas dos tecnologías cuentan con remociones altas de carga contaminante (>80%) y un bajo requerimiento de área (Brault et al., 2022; Tilley et al., 2014; Von Sperling, 2007c). A pesar de esto, el requerimiento de equipos mecánicos y de energía eléctrica suplida de manera constante hacen más complejos los procesos de operación y mantenimiento (Brault et al., 2022; Ortega de Miguel, 2010; Tilley et al., 2014), lo que dificulta su implementación en asentamientos no planificados. Finalmente, dentro de las tecnologías intensivas anaerobias, los filtros anaerobios han sido aplicados frecuentemente para el tratamiento secundario (del Castillo et al., 2022; Ferreira et al., 2021). Esto se debe su bajo requerimiento energético y de área (Rodrigues Mesquita et al., 2021). Sin embargo, sus remociones son menores en comparación a las presentadas por las tecnologías aerobias, especialmente para microorganismos patógenos (Rodrigues Mesquita et al., 2021).

Para el tratamiento terciario, se han aplicado tecnologías para la desinfección como la cloración o la desinfección UV. La cloración presenta una alta remoción de microorganismos patógenos y bajos costos de operación (Otter et al., 2020). Sin embargo, la utilización de esta tecnología puede generar subproductos nocivos para la salud humana como trihalometanos, ácidos haloacéticos, bromuros y clorito (Diana et al., 2019; Tchobanoglous et al., 2014). Por otro lado, la desinfección UV remueve patógenos sin generar estos subproductos, no obstante, su operación y mantenimiento son más costosos y necesita suministro eléctrico constante (Andreadakis et al., 1999; Lazarova et al., 1999). Estos factores dificultan la aplicación de esta tecnología en los

asentamientos no planificados. Las tecnologías naturales también han sido aplicadas para el tratamiento terciario, por ejemplo, las lagunas de maduración son una alternativa económica para la remoción de microorganismos patógenos, pero requieren grandes superficies para su aplicación (Maynard et al., 1999). De igual manera, los humedales artificiales son otra opción bastante utilizada para el tratamiento terciario. Esta tecnología, no solo reduce la carga de microorganismos patógenos del agua tratada, sino que también pueden ser configurada para la remoción de nutrientes (Ergaieg et al., 2021; Thalla et al., 2019).

En el Anexo 2 se encuentran las fichas de caracterización detalladas de las tecnologías aplicables al Tratamiento de Aguas Residuales (TDAR) en asentamientos no planificados. Durante la elaboración de estas fichas, se tomó la decisión de excluir algunas tecnologías, como los Reactores Secuenciales por Tandas (RST), los lodos activados convencionales y los Biorreactores de membranas (MBR). Estas exclusiones se justificaron debido a la complejidad de su mantenimiento y su alto consumo energético, lo que plantea desafíos considerables en su implementación en asentamientos no planificados en países en desarrollo (Abd El-Azeem, 2023; Brault et al., 2022; Cossio et al., 2018).

Del mismo modo, se excluyeron tecnologías primarias, como las lagunas anaerobias, debido a que no se recomienda su uso cerca de áreas pobladas debido a la generación de olores y su requisito de espacio significativamente mayor en comparación con tecnologías como los tanques de Imhoff y los tanques sépticos (Massoud et al., 2009; Von Sperling, 2007b). Además, se excluyó la decantación primaria para el tratamiento en asentamientos debido a la generación de lodos no estabilizados, lo que complicaba la gestión de lodos y, por ende, la operación y el mantenimiento (Andreoli et al., 2007; Garcia et al., 2022). Asimismo, se descartó el uso de la desinfección UV como etapa de desinfección debido a que los costos operativos y de

mantenimiento podrían representar un obstáculo para su implementación (Collivignarelli et al., 2020).

Por último, las tecnologías de filtración, como los filtros de arena y roca, se recomiendan únicamente como tratamiento complementario para la eliminación de algas en los efluentes de lagunas de estabilización o como paso previo a la desinfección, siguiendo las recomendaciones planteadas por Brault et al. (2022) & CENTA, 2021).

La Tabla 7, Tabla 8 y Tabla 9 resumen la información contenida en las fichas de caracterización de las tecnologías aplicables a asentamientos no planificados en países tropicales en desarrollo.

Tabla 7

Definición de aspectos para la caracterización cualitativa de tecnologías de tratamiento descentralizado de aguas residuales domésticas en países tropicales en desarrollo

| Aspecto | | Definición |
|------------------|--|---|
| Técnico | Consumo energético | <p>Alto: Tecnología con requerimiento de recirculación, elementos mecánicos para su funcionamiento y la aplicación de aireación constante.</p> <p>Medio: Tecnología con requerimiento de recirculación, elementos mecánicos para su funcionamiento diferentes a aireadores.</p> <p>Bajo: Tecnología sin requerimiento de recirculación, elementos mecánicos para su funcionamiento y la aplicación de aireación constante</p> |
| | Facilidad de Operación & Mantenimiento | <p>Alto: Tecnología con que requieren personal especializado para el mantenimiento de equipos mecánicos y monitoreo constante de parámetros operacionales.</p> <p>Medio: Tecnología con que requieren personal especializado para el mantenimiento de equipos mecánicos.</p> <p>Bajo: Tecnología con requerimiento de actividades de operación y mantenimiento de baja frecuencia y que no requieren personal especializado.</p> |
| Ambiental | Potencial Generación de olores | <p>Alto: Tecnología que debido a su proceso de remoción generan una alta cantidad de sustancias con olores ofensivos (p.ej. ácido sulfhídrico)</p> <p>Medio: Tecnología que debido a su proceso de remoción generan en menor cantidad de sustancias con olores ofensivos (p.ej. ácido sulfhídrico)</p> <p>Bajo: Tecnologías que generan malos olores solo si no son operadas de manera adecuada.</p> |

| | |
|--|--|
| <p>Potencial generación de ruidos</p> | <p>Alto: Tecnologías que debido a la utilización de equipos mecánicos para la distribución y la aireación generan un alto grado de contaminación auditiva.</p> <p>Medio: Tecnologías que debido a la utilización únicamente de equipos mecánicos para la distribución del efluente generan un grado de contaminación auditiva.</p> <p>Bajo: Tecnologías que no requieren equipos mecánicos para su funcionamiento</p> |
| <p>Potencial Generación de impacto visual negativo</p> | <p>Alto: Tecnologías que debido a diversos requerimientos para su construcción no podrían ser integrados de manera adecuada al entorno.</p> <p>Medio: Tecnologías que para ser integradas requerirían de aspectos constructivos especiales (p.ej. estar enterrados).</p> <p>Bajo: Tecnologías que pueden integrarse fácilmente al entorno y generar espacios verdes</p> |
| <p>Grado de estabilización de lodos</p> | <p>Alto: Los lodos generados por la tecnología no requieren procesos adicionales para su estabilización.</p> <p>Bajo: Los lodos generados por la tecnología no requieren procesos adicionales para su estabilización.</p> |

Tabla 8

Síntesis de aspectos técnicos recopilados en las fichas para la caracterización de tecnologías aplicables al tratamiento descentralizado de aguas residuales en asentamientos no planificados de países tropicales en desarrollo

| Aspectos técnicos | | | | | | | | | |
|-------------------|-----------------------------------|---|--|--|--|--|--|---------------------------------|---|
| Tecnología | Nivel de tratamiento ¹ | Área requerida (m ² /hab) ² | Remoción de Materia Orgánica - DBO ₅ (%) ² | Remoción de Sólidos Suspendedos (%) ² | Remoción de Nitrógeno Total (%) ² | Remoción de Fósforo Total (%) ² | Remoción de Coliformes Fecales (un log) ² | Consumo energético ² | Facilidad de Operación & Mantenimiento ³ |
| TS | Primario | 0.03-0.05 | 30- 35 | 55-65 | <30 | <35 | <1 | Bajo | Alta |
| TI | Primario | 0.03-0.05 | 35- 40 | 55-65 | <30 | <35 | <1 | Bajo | Alta |
| RAD | Primario | 0.03-0.10 | 50- 60 | 65-85 | <30 | <35 | <1 | Bajo | Alta |
| RAFA | Primario | 0.03-0.10 | 60-75 | 65-80 | <60 | <35 | 1-2 | Bajo | Media |
| FP | Secundario | 0.15-0.35 | 80-90 | 85-90 | <60 | <35 | 1-2 | Medio | Media |
| CBR | Secundario | 0.10-0.20 | 80-90 | 85-90 | <60 | <35 | 1-2 | Medio | Media |
| FA | Secundario | 0.04-0.15 | 60-75 | 70-80 | <60 | <35 | 1-2 | Bajo | Alta |
| LF | Secundario | 2.00-4.00 | 75-85 | 70-80 | <60 | <35 | 1-2 | Bajo | Alta |
| LFA | Secundario | 0.25-0.50 | 75-85 | 75-85 | <30 | <35 | 1-2 | Alto | Media |
| EA | Primario - Secundario | 0.12-0.25 | 90-95 | 87-93 | <60 | <35 | 1-2 | Alto | Baja |
| HA | Secundario y terciario | 3.00-5.00 | 80-90 | 87-93 | <30 | <35 | 2-3 | Bajo | Alta |
| LM | Terciario | 3.00-5.00 | 40-60 | 50-60 | <60 | <35 | 3-5 | Bajo | Alta |
| CL | Terciario | 0.03-0.05 | N.A. | N.A. | N.A. | N.A. | 3-6 | Medio | Media |

Nota: TS = Tanque Séptico; TI = Tanque de Imhoff; RAD: Reactor Anaerobio con Deflectores; RAFA= Reactor Anaerobio de flujo ascendente; FP= Filtro Percolador; CBR= Contactor Biológico Rotativo; FA= Filtro Anaerobio; LF= Laguna Facultativa; LFA = Laguna Facultativa Aireada; AE = Aireación extendida; HA= Humedal Artificial; LM= Laguna de maduración; CL= Cloración; D-UV: desinfección UV. **Fuente:** ¹Brault et al. (2022), ²Von Sperling & Chernicharo, (2005), ³Ortega de Miguel (2010)

Tabla 9

Síntesis de aspectos económicos y ambientales recopilados en las fichas para la caracterización de tecnologías aplicables al tratamiento descentralizado de aguas residuales en asentamientos no planificados de países tropicales en desarrollo

| Tecnología | Aspectos económicos | | | Aspectos ambientales | | | |
|------------|--|--|---|--|--|--|---|
| | Inversión inicial (USD/habitante) ² | Costos de Operación y Mantenimiento (USD/habitante) ² | Potencial Generación de olores ³ | Potencial Generación de impacto visual negativo ³ | Potencial al generación de ruidos ³ | Producción de lodos (L/hab/año) ² | Grado de estabilización de lodos ³ |
| TS | 42.25-70.42 | 1.76-3.52 | Medio | Medio | Baja | 110-360 | Baja |
| TI | 52.82-70.42 | 1.76-3.52 | Medio | Medio | Baja | 110-360 | Baja |
| RAD | 52.82-70.42 | 1.76-3.52 | Medio | Medio | Baja | 110-360 | Alto |
| UASB | 42.25-70.42 | 8.8-17.61 | Alto | Medio | Baja | 180-400 | Alto |
| FP | 176.05-211.26 | 14.08-21.13 | Bajo | Alto | Medio | 360-1100 | Bajo |
| CBR | 176.05-211.26 | 14.08-21.13 | Bajo | Alto | Medio | 400-1500 | Bajo |
| FAFA | 70.42-105.63 | 8.8-14.08 | Alto | Medio | Baja | 180-360 | Alto |
| LF | 52.82-105.63 | 3.52-5.28 | Bajo | Bajo | Baja | 20-60 | Alto |
| LFA | 70.42-123.24 | 7.04-12.32 | Bajo | Bajo | Alta | 7-30 | Alto |
| EA | 140.84-228.87 | 14.08-28.17 | Bajo | Alto | Alta | 1000-2000 | Alto |
| HA | 70.42-105.63 | 3.52-5.28 | Bajo | Bajo | Baja | <30 | Alto |
| LM | 70.42-105.63 | 2.82-5.28 | Bajo | Bajo | Baja | 15-40 | Alto |
| CL | 80.00-189.63 | 10.56-17.61 | Bajo | Alto | Bajo | N.A. | N/A |

Nota: TS = Tanque Séptico; TI = Tanque de Imhoff; RAD: Reactor Anaerobio con Deflectores; RAFA= Reactor Anaerobio de flujo ascendente; FP= Filtro Percolador; CBR= Contactador Biológico Rotativo; FA= Filtro Anaerobio; LF= Laguna Facultativa; LFA = Laguna Facultativa Aireada; AE = Aireación Extendida; HA= Humedal Artificial; LM= Laguna de maduración; CL= Cloración; D-UV: desinfección UV. N/A: No aplica

4.1.2 Planteamiento de trenes para el tratamiento descentralizado de aguas residuales para asentamientos no planificados de países tropicales en desarrollo

A través de la revisión de literatura y el desarrollo de fichas realizadas (Ver Anexo 2) en la fase anterior, se establecieron rangos poblacionales en función de la información consignada en las fichas. Como resultado, se obtuvieron intervalos poblacionales comprendidos entre 50 y 200 habitantes, 200 y 800 habitantes y, de 800 a 15000 habitantes. Con base en la información presentada anteriormente, la Tabla 10 presenta los trenes de tratamiento propuestos junto a su rango poblacional de aplicación recomendado.

Tabla 10

Propuesta de trenes para el tratamiento descentralizado de aguas residuales en asentamientos no planificados

| Notación | Tecnología primaria | Tecnología secundaria | Tecnología terciaria | Rango poblacional aplicable |
|----------|-----------------------------------|---|---|-----------------------------|
| T1 | Tanque Séptico / Tanque de Imhoff | Laguna Facultativa | - | RP1, RP2, RP3 |
| T2 | Tanque Séptico / Tanque de Imhoff | Laguna Facultativa | Laguna de Maduración | RP1, RP2, RP3 |
| T3 | Tanque Séptico / Tanque de Imhoff | Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Horizontal | - | RP1, RP2, RP3 |
| T4 | Tanque Séptico / Tanque de Imhoff | Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Horizontal | Laguna de Maduración | RP1, RP2, RP3 |
| T5 | Tanque Séptico / Tanque de Imhoff | Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente | - | RP1, RP2, RP3 |
| T6 | Tanque Séptico / Tanque de Imhoff | Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente | Laguna Facultativa | RP1, RP2, RP3 |
| T7 | Tanque Séptico / Tanque de Imhoff | Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente | Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Horizontal | RP1, RP2, RP3 |
| T8 | Tanque Séptico / Tanque de Imhoff | Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente | Cloración | RP1, RP2, RP3 |
| T9 | Tanque Séptico / Tanque de Imhoff | Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Vertical | Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Horizontal | RP2, RP3 |
| T10 | Tanque de Imhoff | Filtro Percolador | - | RP2, RP3 |
| T11 | Tanque de Imhoff | Filtro Percolador | Cloración | RP2, RP3 |
| T12 | Tanque de Imhoff | Contactador Biológico Rotativo | - | RP2, RP3 |
| T13 | Tanque de Imhoff | Contactador Biológico Rotativo | Cloración | RP2, RP3 |
| T14 | Reactor Anaerobio con deflectores | Laguna Facultativa | - | RP2 |
| T15 | Reactor Anaerobio con deflectores | Laguna Facultativa | Laguna de Maduración | RP2 |

| Notación | Tecnología primaria | Tecnología secundaria | Tecnología terciaria | Rango poblacional aplicable |
|----------|---------------------------------------|---|---|-----------------------------|
| T16 | Reactor Anaerobio con deflectores | Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial Horizontal | - | RP2 |
| T17 | Reactor Anaerobio con deflectores | Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial Horizontal | Laguna de Maduración | RP2 |
| T18 | Reactor Anaerobio con deflectores | Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial vertical | - | RP2 |
| T19 | Reactor Anaerobio con deflectores | Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial vertical | Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Horizontal | RP2 |
| T20 | Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente | Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial Vertical | - | RP3 |
| T21 | Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente | Humedales artificiales de flujo subsuperficial Vertical | Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Horizontal | RP3 |
| T22 | Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente | Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Horizontal | - | RP3 |
| T23 | Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente | Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Horizontal | Laguna de Maduración | RP3 |
| T24 | Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente | Contactador Biológico Rotativo | - | RP3 |
| T25 | Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente | Contactador Biológico Rotativo | Cloración | RP3 |
| T26 | Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente | Laguna Facultativa | - | RP3 |
| T27 | Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente | Laguna Facultativa | Laguna de Maduración | RP3 |
| T28 | Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente | Filtro Percolador | - | RP3 |
| T29 | Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente | Filtro Percolador | Cloración | RP3 |
| T30 | | Aireación Extendida | - | RP3 |
| T31 | | Aireación Extendida | Cloración | RP3 |

Nota: RP1 = Rango poblacional 1 (Entre 50 y 200 habitantes); RP2= Rango poblacional 2 (Entre 200 y 800 habitantes); RP3= Rango poblacional 3 (Entre 800 y 15000 habitantes)

En la Tabla 10 se observa la relación entre aumento de la población y tecnologías aplicables, donde, en los rangos poblacionales más pequeños (menor a 200 habitantes) se proponen únicamente la combinación de tanques sépticos o tanques de Imhoff con tecnologías verdes como humedales artificiales o lagunas facultativas. Esta combinación de tecnologías puede subsanar problemas propios de las tecnologías anaerobias utilizadas para el tratamiento primario como la baja remoción de nutrientes y materia orgánica, además de reducir considerablemente el área requerida para el tratamiento secundario (Castellar et al., 2022; del Castillo et al., 2022). También se propone un

tren compuesto por dos tecnologías anaerobias, un tanque séptico o de Imhoff seguido por un FAFA, esto por la posibilidad de generar efluentes aptos para la descarga con un bajo requerimiento energético y de superficie (Rodrigues Mesquita et al., 2021). Por ejemplo, esta combinación es la más común en el contexto de Brasil, con una aplicación extendida de los filtros anaerobios para el tratamiento secundario (Ferreira et al., 2021; Rodrigues Mesquita et al., 2021). A pesar de ello, factores como la generación de olores y la baja remoción de patógenos pueden ser problemas de este sistema (del Castillo et al., 2022; Iribarnegaray et al., 2018).

Para los asentamientos con una población superior a los 200 habitantes se proponen también tecnologías que implican mayores costos y mayor complejidad de operación y mantenimiento. Esto se debe a que estos costos y complejidades pueden reducirse gracias a los efectos de la economía de escala (Kerstens et al., 2012; Tonetti et al., 2021). Entre los trenes propuestos, se encuentran las combinaciones de tecnologías anaerobias como RAFA, tanques de Imhoff y RAD junto con tecnologías aerobias como CBR o FP. Estas combinaciones permiten obtener efluentes de alta calidad con un bajo requerimiento de espacio, al mismo tiempo que simplifica la gestión de lodos. Los lodos son dispuestos en la unidad de tratamiento primario para su digestión aerobia, lo que elimina la necesidad de un dispositivo adicional para la estabilización de biomasa (Lemos Chernicharo, 2007; Ortega de Miguel, 2010). Sin embargo, estos trenes requieren mano de obra especializada para la operación y mantenimiento de equipos mecánicos, sumado al suministro eléctrico constante (Brault et al., 2022; Tilley et al., 2014).

De igual manera, se propone la aireación extendida como variante simplificada de los lodos activados. Esta tecnología genera efluentes de alta calidad sin necesidad de un tratamiento primario antecedente (Fernandes et al., 2013; Lienhoop et al., 2014), lo cual reduce significativamente el espacio requerido. Sin embargo, esta tecnología demanda una gran cantidad de energía debido a

su funcionamiento con una alta concentración de biomasa suspendida (Von Sperling, 2007a). Además, requiere personal con un alto grado de especialización para el mantenimiento y operación de equipos mecánicos automatizados (Von Sperling, 2007a).

Respecto al tratamiento terciario, se proponen opciones de tratamiento complementario como desinfección con cloro y lagunas de maduración. Las distintas opciones son propuestas para cada tren con el fin de lograr un efluente con potencial de reúso. Las lagunas de maduración son principalmente sugeridas para el mejoramiento de efluentes provenientes de tecnologías extensivas. Esto debido a que esta tecnología también presenta un alto requerimiento de área.

Del mismo modo, para trenes de tratamiento con menores requerimientos de área, se recomienda el uso de desinfección mediante cloración. Estas tecnologías presentan un requerimiento de área baja y una alta eficiencia en la remoción de microorganismos patógenos. Sin embargo, al igual que las tecnologías aerobias utilizadas para el tratamiento secundario como FP o CBR, la cloración requiere energía eléctrica y personal con conocimientos técnicos para su funcionamiento.

Estas condiciones generan sinergia en los trenes de tratamiento aplicados. La aplicación de lagunas de maduración en trenes de tratamiento compuestos por tecnologías intensivas hace que se pierda una de sus principales ventajas la cual es su baja área requerida. De igual manera, la aplicación de cloración o desinfección UV a trenes compuestos por tecnologías extensivas aumentaría la complejidad de operación y mantenimiento.

Respecto a la remoción de nutrientes, se proponen trenes de tratamiento que complementan la etapa de tratamiento secundario realizada mediante FAFA con una fase de pulimento utilizando tecnologías como humedales artificiales o lagunas facultativas. Esta estrategia permite la

producción de efluentes de alta calidad al mejorar la eliminación de nitrógeno y, al mismo tiempo, reduce significativamente los requisitos de espacio de las tecnologías extensivas debido a la baja carga contaminante aplicada (del Castillo et al., 2022).

Además, se proponen variantes que emplean humedales artificiales híbridos para la eliminación de nutrientes. La combinación de Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial Vertical (HA FSSV), seguidos de Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial Horizontal, permite la nitrificación en la primera unidad y la desnitrificación en la segunda, logrando así una notable reducción de nutrientes con una superficie relativamente menor en comparación con otras tecnologías extensivas (Vymazal, 2013).

Finalmente, respecto al manejo de lodos generados durante el tratamiento, los trenes propuestos buscan simplificar su gestión, haciendo necesaria únicamente una etapa de secado para su disposición final. Esto se logra a través de la utilización tecnologías como tanques sépticos, tanques de Imhoff, humedales artificiales, FAFA, RAFA y lagunas facultativas que cuentan con una baja tasa de generación de lodos y un alto grado de estabilización. En el caso trenes que utilicen como tratamiento secundario tecnologías aerobias cuya tasa de generación de lodos es alta y su grado de estabilización es bajo, se simplifica el tratamiento de lodos a través de la disposición de la biomasa generada en la unidad de tratamiento primario. El alto grado de estabilización del lodo permite que sea únicamente necesaria la aplicación de una etapa de secado para su disposición final segura (Andreoli et al., 2007; CENTA, 2021; Ortega de Miguel, 2010). Por esta razón, se propone como alternativa para la gestión de lodos el uso de camas de secado debido a que este es un mecanismo con una mayor aplicación en países en desarrollo (CENTA, 2021; MARN, 2016). De igual manera, si se desea ampliar el potencial de aprovechamiento de lodos, se propone el compostaje como tratamiento complementario.

4.1.3 Potencial aprovechamiento de subproductos generados por los trenes de tratamiento descentralizado de aguas residuales planteados

En sincronía con lo presentado en la sección 0, fueron encontrados distintos lineamientos que han surgido para garantizar una aplicación de esquemas de reúso de agua residual. En lo relativo a directrices para el reúso seguro de AR tratadas fue publicado por la Organización Mundial de la Salud (OMS) en 2006 (WHO, 2006^a) el documento “directrices para el uso seguro de aguas residuales, excretas y aguas grises”, convirtiéndose en la pauta internacional de referencia (CENTA, 2021; Shoushtarian & Negahban-Azar, 2020). Entre otros documentos encontrados con lineamientos relevantes para el reúso están: (i) Las directrices para el reúso de aguas residuales de la *United States Environmental Protection Agency* del año 2012 (EPA, 2012^a); (ii) Directrices para el uso de agua residual tratada en proyectos de riego de la Organización Internacional de Normalización (ISO, 2023); (iii) Directrices de calidad del agua residual para reúso de Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 1992^a) y (iv) Reglamento (UE) 2020/741 relativo a los requisitos mínimos para la reutilización del agua (Unión Europea, 2020).

En la Anexo 3 son presentados los diferentes requisitos de calidad para el reúso del agua residuales consignados en los documentos mencionados. Igualmente, es importante recalcar que el reúso de AR tratada debe estar también en sincronía con la normativa local del contexto de aplicación (CENTA, 2021). Por este motivo, en el Anexo 3 también se presentan una síntesis de los diferentes los requerimientos de calidad del agua tratada para el reúso y diferentes actividades de reúso consignadas en diferentes normativas de países pioneros en estas actividades.

A partir de los resultados de la síntesis se observa que la presencia de patógenos es la mayor preocupación respecto al uso del agua tratada, siendo los coliformes fecales, coliformes totales y

E.coli los principales parámetros de control. Las concentraciones de patógenos recomendadas varían desde la no detectabilidad de coliformes totales, como en el caso de reúsos urbanos sin restricción propuestos por la EPA (2012), hasta concentraciones para *E. coli* del orden de 4 unidades logarítmicas para irrigación por goteo y otros usos restringidos (Unión Europea, 2020; WHO, 2006^a). Por otro lado, son presentadas con menor frecuencia parámetros asociados a otros contaminantes químicos como lo metales pesados y los microcontaminantes, cuya presencia puede ser negativa para la salud humana. Sin embargo, las altas concentraciones de estas sustancias suelen estar asociadas a actividades industriales (Shoushtarian & Negahban-Azar, 2020).

Para determinar el posible reúso del agua tratada se usaron como referencia los lineamientos planteados por la OMS (WHO, 2006^a) y normativa española alineada con las directrices de la Unión Europea (Unión Europea, 2020), esto debido a su carácter menos restrictivo y debido a su alto grado de consolidación (Shoushtarian & Negahban-Azar, 2020). Estos estándares planteados fueron comparados con las remociones esperadas por los trenes propuestos que aparecen en la Tabla 11. Las estimaciones para el reúso se hicieron suponiendo una concentración inicial de coliformes fecales aproximada del orden de 10^7 unidades logarítmicas, siguiendo las recomendaciones de CENTA (2021). Resultado de este proceso, la Tabla 12 resume los potenciales usos del agua tratada para los diferentes trenes de tratamiento.

Tabla 11

Remoción de contaminantes esperada para los distintos trenes de tratamiento planteados para asentamientos no planificados de países tropicales en desarrollo.

| Tren | Componentes | Remoción SST (%) | Remoción DBO ₅ (%) | Remoción DQO (%) | Remoción NT (%) | Remoción PT (%) | Coliformes fecales (u. log) |
|------|------------------|------------------|-------------------------------|------------------|-----------------|-----------------|-----------------------------|
| T1 | TS/TI+LF | 70-80 | 80-85 | 70-80 | 20-30 | 10-15 | 2-3 |
| T2 | TS/TI+LF+LM | 77.5-86 | 86-91 | 76-86 | 36-51 | 28-40.5 | 4-6 |
| T3 | TS/TI+HA FSSH | 90-94 | 88-93 | 80-86 | 20-30 | 20-30 | 1-2 |
| T4 | TS/TI+HA FSSH+LM | 92.5-95.8 | 91.6-95.8 | 84-90.2 | 36-51 | 36-51 | 4-6 |

| Tren | Componentes | Remoción SST (%) | Remoción DBO ₅ (%) | Remoción DQO (%) | Remoción NT (%) | Remoción PT (%) | Coliformes fecales (u. log) |
|------|-----------------------|------------------|-------------------------------|------------------|-----------------|-----------------|-----------------------------|
| T5 | TS/TI+FAFA | 60-90 | 40-75 | 40-75 | - | - | - |
| T6 | TS/TI+FAFA+LF | 70 – 80 | 75 – 85 | 70 – 80 | 10 – 25 | 10 – 15 | 2 – 3 |
| T7 | TS/TI+FAFA+HA FSSH | 92-98.5 | 91-97.5 | 85-95 | 20-30 | 20-30 | 1-2 |
| T8 | TS/TI+FAFA+CL | 60-90 | 40-75 | 40-75 | - | - | 3-4 |
| T9 | TS/TI+HA FSSV+HA FSSH | 98-99.1 | 98.2-99.3 | 95-97.2 | 68-79 | 36-51 | 2-4 |
| T10 | TI+FP | 85 – 95 | 85 – 90 | 80 – 85 | 20 – 35 | 20-30 | 1 (1) |
| T11 | TI+FP+CL | 85 – 95 | 85 – 90 | 80 – 85 | 20 – 35 | 20-30 | 4-5 |
| T12 | TI+CBR | 85 – 95 | 85 – 90 | 80 – 85 | 20 – 35 | 20-30 | 1 (1) |
| T13 | TI+CBR+CL | 85 – 95 | 85 – 90 | 80 – 85 | 20 – 35 | 20-30 | 4-5 |
| T14 | RAD+LF | 70 – 80 | 75 – 85 | 70 – 80 | 10 – 25 | 10 – 15 | 2 – 3 |
| T15 | RAD+LF+LM | 77.5-86 | 82.5-91 | 76-86 | 28-47.5 | 28-40.5 | 4-6 |
| T16 | RAD+HA FSSH | 92-99 | 88-93 | 80-86 | 20-30 | 20-30 | 1-2 |
| T17 | RAD+HA FSSH+LM | 94-98.95 | 93.7-98.5 | 88-96.5 | 36-51 | 36-51 | 5-6 |
| T18 | RAD+HA FSSV | 90-94 | 88-93 | 80-86 | 60-70 | 20-30 | 1-2 |
| T19 | RAD+HA FSSV+HA FSSH | 96-97 | 96-97 | 94-97 | 34-49 | 34-49 | 2-4 |
| T20 | RAFA+HA FSSV | 92-99 | 91-98 | 85-95 | 20-30 | 20-30 | 1-2 |
| T21 | RAFA+HA FSSV+HA FSSH | 96-97 | 96-97 | 94-97 | 36-51 | 36-51 | 2-5 |
| T22 | RAFA+HA FSSH | 92-99 | 91-98 | 85-95 | 20-30 | 20-30 | 1-2 |
| T23 | RAFA+HA FSSH+LM | 90-94 | 94-96 | 90-93 | 34-49 | 34-49 | 5-6 |
| T24 | RAFA+CBR | 85 – 95 | 85 – 90 | 80 – 85 | 20 – 35 | 10-20 | 1 |
| T25 | RAFA+CBR+CL | 86 – 95 | 86 – 90 | 81 – 85 | 21 – 35 | 10-20 | 4-5 |
| T26 | RAFA+LF | 70 – 80 | 75 – 85 | 75 – 85 | 10 – 25 | 10 – 15 | 2 – 3 |
| T27 | RAFA+LF+LM | 75-84 | 80-89 | 74-84 | 26-45 | 26-42 | 5-6 |
| T28 | RAFA+FP | 85 – 95 | 85 – 90 | 80 – 85 | 20 – 35 | 10-20 | 1 |
| T29 | RAFA+FP+CL | 86 – 95 | 86 – 90 | 81 – 85 | 21 – 35 | 10-20 | 4-5 |
| T30 | AE | 85 – 95 | 86 – 95 | 80 – 90 | 80 – 85 | 20 – 30 | 1 |
| T31 | AE+CL | 85 – 95 | 86 – 95 | 81 – 90 | 81 – 85 | 21 – 30 | 4-5 |

Nota: TS = Tanque Séptico; TI = Tanque de Imhoff; RAD: Reactor Anaerobio con Deflectores; RAFA= Reactor Anaerobio de flujo ascendente; FP= Filtro Percolador; CBR= Contactor Biológico Rotativo; FA= Filtro Anaerobio; LF= Laguna Facultativa; AE = Aireación Extendida; HA FSSH= Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Horizontal; HA FSSV= Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Vertical; LM= Laguna de Maduración; CL= Cloración; N/A: No aplica. *Fuente:* Adaptado de Von Sperling (2007)

En el caso de los lodos generados, entre los componentes de interés usualmente se encuentran los compuestos orgánicos, macro y micronutrientes, metales pesados y

microcontaminantes (Andreoli et al., 2007). Respecto al aprovechamiento de este subproducto, sumado a la utilización como relleno sanitario, una de las principales áreas de aplicación de este subproducto es en el sector agrícola (Gherghel et al., 2019; Kumari et al., 2023). Los trenes fueron propuestos bajo el principio de generar lodos con un alto nivel de estabilización, únicamente necesitando como tratamiento posterior lechos de secado. Por lo tanto, el digestato producido puede ser utilizado como biofertilizante si la concentración de microorganismos patógenos es baja (menor a 2 unidades de coliformes totales logarítmicas presentes por kilogramo de sólidos totales) (Ezemagu et al., 2021).

De igual manera, si se desea utilizar el lodo tratado como material de enmienda, sería necesaria la aplicación de una etapa posterior de compostaje mezclando el digestato con diferentes residuos orgánicos (Kumari et al., 2023). Sin embargo, una de las principales barreras para el aprovechamiento es la acumulación en el suelo de metales pesados provenientes del lodo del agua residual, pudiendo generar riesgo al ser transferidos en la cadenas productivas de alimentos (Hušek et al., 2022; Raheem et al., 2018).

Es importante recalcar que, fueron descartadas opciones térmicas y de incineración para la gestión de la biomasa generada durante el tratamiento. Esto debido a sus altos costos y su alto requerimiento energético. Las actividades de aprovechamiento propuestas para los lodos generados durante el tratamiento también son presentadas en la **Tabla 12**.

Respecto al biogás, el metano generado en procesos de digestión anaerobia puede ser recuperado y separado de otros productos como el dióxido de carbono y el ácido sulfhídrico (Lemos Chernicharo, 2007). El metano puede ser aprovechado tanto para usos domésticos como para la generación de energía. A pesar de esto, el metano generado podría no ser suficiente para cubrir las necesidades domésticas y energéticas de la población cubierta por el sistema

descentralizado (Lopes et al., 2020; Tilmans et al., 2014). Sin embargo, estimaciones apuntan a que aprovechamiento de este subproducto podría solventar entre el 26% y 49% de los costos de operación y mantenimiento de sistema de tratamiento.

Tabla 12

Potenciales actividades de aprovechamiento de subproductos generados por los trenes propuestos para el tratamiento descentralizado para países tropicales en desarrollo

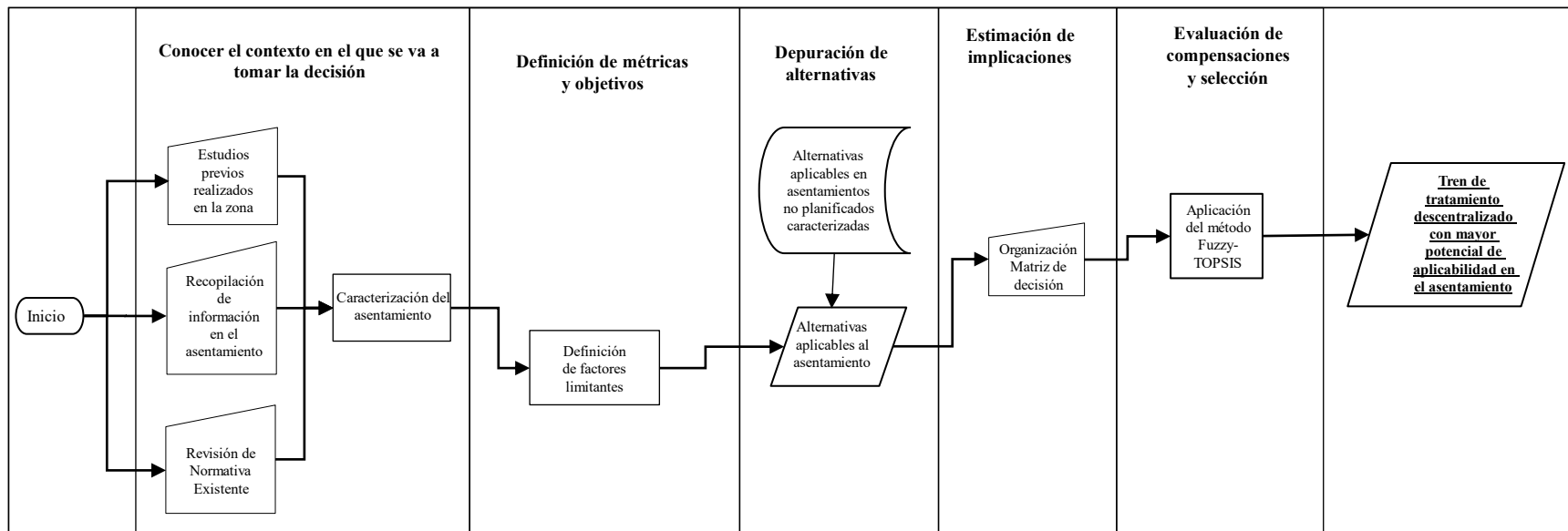
| Subproducto | Actividad de aprovechamiento | Trenes aplicables |
|-----------------------|---|---|
| Agua residual tratada | Riego para alimentos procesados | T2, T4, T6, T7, T8, T9, T10, T11, T12, T13, T15, T17, T19, T21, T23, T24, T25, T27, T28, T29, T30, T31 |
| | Riego de cultivos leñosos | T2, T4, T6, T8, T9, T11, T13, T15, T17, T19, T21, T23, T25, T27, T29, T31 |
| | Riego de hierba para pastoreo | T2, T4, T6, T8, T9, T11, T13, T15, T17, T19, T21, T23, T25, T27, T29, T31 |
| | Riego ornamental sin acceso al público | T2, T4, T6, T8, T9, T11, T13, T15, T17, T19, T21, T23, T25, T27, T29, T31 |
| | Riego para reforestación | T2, T4, T6, T8, T9, T10, T11, T12, T13, T15, T17, T19, T21, T23, T24, T25, T27, T28, T29, T30, T31 |
| | Recarga de acuíferos por percolación | T2, T4, T6, T9, T11, T13, T15, T17, T19, T21, T23, T25, T27, T29, T31 |
| | Acuicultura | T2, T4, T6, T9, T11, T13, T15, T17, T19, T21, T23, T25, T27, T29, T31 |
| Biomasa | Uso como relleno sanitario | Todos los trenes de tratamiento propuestos |
| | Uso como biofertilizante | Todos los trenes de propuestos |
| | Uso como enmienda | Sería necesario implementar unidad adicional de compostaje en la línea de tratamiento de lodos del tren |
| Biogás | Recolección de metano para generación de energía o usos doméstico | T20, T21, T22, T23, T24, T25, T26, T27, T28, T29 |

4.2 Formulación de herramienta para la selección de trenes para el tratamiento descentralizados de aguas residuales en asentamientos no planificados

La **Figura 5** ofrece una síntesis visual de los pasos de la metodología de selección propuesta, siguiendo el enfoque de SDM. A continuación, se detallan las distintas fases relacionadas con la implementación de esta herramienta, acompañados de los recursos necesarios para llevar a cabo dicho proceso.

Figura 5.

Esquema de la herramienta para la selección de trenes de tratamiento descentralizado de aguas residuales en asentamientos no planificados en países tropicales en desarrollo



4.2.1 Conocimiento del contexto: Caracterización del asentamiento

Las condiciones locales juegan un papel fundamental en los procesos de selección de sistemas de tratamiento de AR (AECID, 2022; Noyola et al., 2013). El conocimiento de estas condiciones permite la selección de alternativas que mejor se adapten a las necesidades del entorno (CENTA, 2021). Por ende, es necesario realizar una recolección previa de información con el fin de obtener conocimiento técnico, social, ambiental e institucional suficiente para una toma de decisiones adecuadas. Acorde con AECID (2022); CENTA, (2021); MARN, (2016;) y Noyola et al.(2013), entre los aspectos fundamentales a estudiar para la correcta caracterización del asentamiento se encuentran: (i) La topografía del terreno, (ii) la climatología de la zona, (iii) características ambientales del entorno, (iv) proyecciones demográficas, (v) normativa vigente, (vi) predisposición de los actores al proyecto y (vii) características fisicoquímicas y microbiológicas del agua a tratar. Se proponen estos aspectos como los requerimientos mínimos necesarios para determinar los criterios limitantes del asentamiento en la siguiente fase.

Con el fin de lograr una caracterización que permita la correcta del asentamiento, en el Anexo 4 se presenta un formato de caracterización del asentamiento con el fin de recopilar la información necesaria para la ejecución de las fases posteriores.

4.2.2 Definición de métricas y objetivos: Factores limitantes del asentamiento

Los criterios limitantes permiten simplificar el proceso de selección descartando alternativas cuya implementación no sea factible debido a las restricciones del contexto (CENTA, 2021; MARN, 2016). Esto permite reducir el número de alternativas a estudiar y optimizar esfuerzos en fases preliminares (AECID, 2022). Por este motivo, basados en revisión de literatura presentada en la metodología, la herramienta propone una etapa de selección de criterios limitantes en función de la recopilación de información planteada en la sección anterior. Esto permitirá

identificar factores que podrían tener incidencia en la factibilidad de la implementación de las alternativas propuestas. En la Tabla 13 se presentan potenciales factores limitantes para la implementación de tecnologías en asentamientos no planificados, junto con su influencia en los diferentes trenes de tratamiento.

4.2.3 Depuración de alternativas: Análisis de factores limitantes

Una vez que se han establecido los criterios limitantes, se inicia la comparación de las distintas alternativas que previamente han sido caracterizadas. El propósito de esta comparación es identificar y descartar aquellas alternativas cuya evaluación carece de relevancia en el contexto del proceso de selección. En esa fase se incluye el cálculo de área requerida y la estimación de la calidad del efluente a través del predimensionamiento de las alternativas. Es fundamental resaltar que, aun cuando no sea imperativo alcanzar un nivel exhaustivo de detalle en el prediseño de las alternativas, resulta esencial estimar con cierto grado de precisión los atributos más relevantes de esta tecnología (AECID, 2022). Estos cálculos deben realizarse con el mismo enfoque metodológico para cada alternativa prediseñada, de manera que se puedan efectuar comparaciones en igualdad de condiciones (AECID, 2022).

De igual manera, esta sección integra factores sociales recopilados durante la fase de caracterización de asentamientos a través del cuestionario aplicado a la comunidad. Esto permite una primera inclusión de aspectos sociales como la percepción de la comunidad ante posibles impactos ambientales (olores, ruidos o impacto visual) o posibles percepciones frente al uso de AR tratadas.

Como resultado de este procedimiento, se determinarán las alternativas que se someterán a un análisis más profundo en las fases posteriores del proceso de selección. En la Tabla 13 son presentados también los diversos trenes no aplicables en función de los criterios limitantes. En esta

fase, se recomienda considerar al menos tres alternativas potenciales para asegurar una variedad adecuada de opciones; no obstante, como mínimo, se pueden evaluar dos alternativas con el fin de garantizar una elección informada.

Tabla 13

Factores limitantes para la selección de tecnologías para el tratamiento descentralizado de aguas residuales en asentamientos no planificados de países tropicales en desarrollo

| Factor limitante | Causas | Implicaciones | Trenes tecnológicos descartados | Referencias |
|--|---|---|--|---|
| Grado de consolidación tecnológica | Existencia de barreras que impiden la implicación de tecnologías en desarrollo | Exclusión de las posibles alternativas que incluyan tecnologías cuya implantación no se encuentre reglamentada por la normativa local | Dependiente de la normativa y del contexto de aplicación | (Kalbar et al., 2016; Markov et al., 2017; Tjandraatmadja et al., 2013 ^a) |
| Área disponible | Existencia de baja superficie disponible y/o condiciones inadecuadas del terreno (nivel freático, permeabilidad y topografía) | Exclusión de trenes de tratamiento que incluyan tecnologías extensivas | T1, T2, T3, T4, T6, T7, T9, T14, T15, T16, T17, T18, T21, T22, T23, T26, T27 | (Arroyo & Molinos-Senante, 2018 ^a ; Avramenko et al., 2010 ^a , 2010 ^a ; Castillo et al., 2016 ^a ; D'Silva et al., 2021 ^a ; Galvão et al., 2005 ^a ; Juznic-Zonta et al., 2022 ^a ; Kalbar et al., 2013 ^a , 2016; Kamami et al., 2011 ^a ; Khattiyavong & Lee, 2019 ^a ; Markov et al., 2017; Mena-Ulecia & Hernández, 2015 ^a ; Omran et al., 2021 ^a ; Ren & Liang, 2017 ^a ; Shen et al., 2018 ^a ; Singhirunusorn & Stenstrom, 2009 ^a , 2010 ^a) |
| Complejidad técnica de operación y mantenimiento | Existencia de baja disponibilidad de personal y/o difícil acceso de personal especializado | Exclusión de trenes de tratamiento que incluyan tecnologías con una alta dificultad de operación y mantenimiento | T10, T11, T12, T13, T24, T26, T28, T29, T30, T31 | (Arroyo & Molinos-Senante, 2018 ^a ; Castillo et al., 2016 ^a , 2016 ^a ; D'Silva et al., 2021 ^a ; Markov et al., 2017; Ren & Liang, 2017 ^a ; Shen et al., 2018 ^a) |
| Requerimiento energético | Ausencia de suministro constante de energía eléctrica | Exclusión de trenes de tratamiento que incluyan tecnologías con alto y muy alto requerimiento energético | T10, T11, T12, T13, T24, T26, T28, T29, T30, T31 | (Arroyo & Molinos-Senante, 2018 ^a ; D'Silva et al., 2021 ^a ; Galvão et al., 2005 ^a ; Kalbar et al., 2013 ^a ; Kamami et al., 2011 ^a ; Khattiyavong & Lee, 2019 ^a ; Markov et al., 2017; Mena-Ulecia & Hernández, 2015 ^a ; Omran et al., 2021 ^a) |
| Potencial de mejora | Existencia de rápidas dinámicas de crecimiento poblacional y/o económico | Exclusión de trenes de tratamiento que incluyan tecnologías con un bajo potencial de mejora | T3, T4, T5, T6, T7, T8, T9, T16, T17, T21, T23 | (Kalbar et al., 2016; Markov et al., 2017; Tjandraatmadja et al., 2013 ^a) |

| Factor limitante | Causas | Implicaciones | Trenes tecnológicos descartados | Referencias |
|--|---|--|---|---|
| Remociones de carga contaminante | Existencia de condiciones que harían complejo el cumplimiento de requerimientos mínimos para la disposición de las AR tratada | Exclusión de trenes de tratamiento que incluyen tecnologías que no cumplen los requisitos mínimos normativos para el vertimiento | Dependiente de la normativa y del contexto de aplicación | (Anaokar et al., 2018 ^a ; Arroyo & Molinos-Senante, 2018 ^a ; Avramenko et al., 2010 ^a ; Kalbar et al., 2013 ^a ; Kamami et al., 2011 ^a ; H. Li et al., 2022; Markov et al., 2017; Mena-Ulecia & Hernández, 2015 ^a ; Muga & Mihelcic, 2008 ^a ; Shen et al., 2018 ^a ; Tjandraatmadja et al., 2013 ^a) |
| Costos de operación y mantenimiento | Restricciones en la disponibilidad de presupuesto podría ser un factor que incida fuertemente en la implementación del tren tratamiento | Exclusión de trenes de tratamiento que incluyan tecnologías con altos costos de operación y mantenimiento | T10, T11, T12, T13, T24, T25, T29, T30, T31 | (Avramenko et al., 2010 ^a ; Castillo et al., 2016 ^a ; D’Silva et al., 2021 ^a ; Józwiakowski et al., 2015 ^a ; Juznic-Zonta et al., 2022 ^a ; Kamami et al., 2011 ^a ; Mena-Ulecia & Hernández, 2015 ^a ; Muga & Mihelcic, 2008 ^a ; Omran et al., 2021 ^a ; Ren & Liang, 2017 ^a ; Shen et al., 2018 ^a ; Singhirunusorn & Stenstrom, 2009 ^a , 2010 ^a ; Tjandraatmadja et al., 2013 ^a) |
| Inversión inicial | Restricciones en la disponibilidad de presupuesto que podría ser un factor que incida fuertemente en la construcción del tren tratamiento | Exclusión de trenes de tratamiento que incluyan tecnologías con una alta inversión inicial | T10, T11, T12, T13, T24, T25, T28, T29, T30, T31 | (Avramenko et al., 2010 ^a ; Castillo et al., 2016 ^a ; D’Silva et al., 2021 ^a ; Galvão et al., 2005 ^a ; Józwiakowski et al., 2015 ^a ; Juznic-Zonta et al., 2022 ^a ; Kamami et al., 2011 ^a ; H. Li et al., 2022; Mena-Ulecia & Hernández, 2015 ^a ; Muga & Mihelcic, 2008 ^a ; Omran et al., 2021 ^a ; Ren & Liang, 2017 ^a ; Shen et al., 2018 ^a ; Singhirunusorn & Stenstrom, 2009 ^a ; Starkl et al., 2022 ^a ; Tjandraatmadja et al., 2013 ^a) |
| Aprovechamiento de subproductos: AR tratada | Existencia de factores que hacen obligatoria la implementación de esquemas de aprovechamiento de agua residual tratada | Exclusión de trenes de tratamiento que no incluyan esquemas de aprovechamiento de agua residual tratada | T5 | (Arroyo & Molinos-Senante, 2018 ^a) |
| Aprovechamiento de subproductos: biogás | Existencia de factores que hacen obligatoria la implementación de esquemas de aprovechamiento de biogás | Exclusión de trenes de tratamiento que no incluyan esquemas de aprovechamiento de agua residual tratada | T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7, T8, T9, T10, T11, T12, T13, T14, T15, T16, T17, T18 | (D’Silva et al., 2021 ^a ; Wang et al., 2012 ^a) |
| Aprovechamiento de subproductos: Lodos generados | Existencia de factores que hacen obligatorio la implementación de esquemas de aprovechamiento de lodos | Exclusión de trenes de tratamiento que no incluyan esquemas de aprovechamiento de lodos | Dependiente de la normativa y del contexto de aplicación | (Markov et al., 2017, 2017; Rodríguez-Castillo et al., 2023 ^a) |

| Factor limitante | Causas | Implicaciones | Trenes tecnológicos descartados | Referencias |
|--------------------------|---|---|--|--|
| Emisiones de GEI | Existencia de condiciones que impiden la implementación de tecnologías con altas emisiones de gases de efecto invernadero | Exclusión de trenes de tratamiento que incluyan tecnologías con altas emisiones de gases efecto invernadero | T5, T6, T7, T8 | (D'Silva et al., 2021 ^a ; Juznic-Zonta et al., 2022 ^a ; Kalbar et al., 2013 ^a ; Khattiyavong & Lee, 2019 ^a ; Tjandraatmadja et al., 2013 ^a ; Wang et al., 2012 ^a) |
| Generación de olores | Generación de olores como un factor que incida fuertemente en la sostenibilidad de la implementación de los trenes tecnológicos implementados | Exclusión de trenes de tratamiento que incluyan tecnologías con alta potencial de generar olores | T5, T6, T7, T8, T21, T23, T24, T25, T26, T27, T28, T29 | (Avramenko et al., 2010 ^a ; Castillo et al., 2016 ^a ; Mena-Ulecia & Hernández, 2015 ^a ; Omran et al., 2021 ^a ; Rodríguez-Castillo et al., 2023 ^a ; Tjandraatmadja et al., 2013 ^a) |
| Generación de ruidos | Generación de ruidos como un factor que incida fuertemente en la sostenibilidad de la implementación de los trenes tecnológicos implementados | Exclusión de trenes de tratamiento que incluyan tecnologías con alta potencial de generar ruidos | T10, T11, T12, T13, T24, T25, T28, T29, T30, T31 | (Arroyo & Molinos-Senante, 2018 ^a ; Castillo et al., 2016 ^a ; Mena-Ulecia & Hernández, 2015 ^a ; Omran et al., 2021 ^a ; Tjandraatmadja et al., 2013 ^a) |
| Integración paisajística | Impacto visual como un factor que incida fuertemente en la sostenibilidad de la implementación de los trenes tecnológicos implementados | Exclusión de trenes de tratamiento que incluyan tecnologías con bajo potencial de integración paisajística | T10, T11, T12, T13, T24, T25, T28, T29, T30, T31 | (Arroyo & Molinos-Senante, 2018 ^a ; Castillo et al., 2016 ^a ; Rodríguez-Castillo et al., 2023 ^a) |

4.2.4 Estimación de implicaciones

En esta etapa se procederá a construir la matriz de decisión que será sometida a evaluación mediante el método Fuzzy-TOPSIS. Para lograr esto, se llevarán a cabo los procedimientos necesarios con el propósito de asignar valoraciones a los criterios presentes en la matriz de decisión de la herramienta. La matriz resultante exhibirá de forma ordenada las valoraciones correspondientes a cada alternativa en relación con cada criterio establecido. Los criterios propuestos para la selección son presentados en la siguiente sección.

4.2.5 Determinación de criterios clave de sostenibilidad para la selección de trenes de tratamiento descentralizado de aguas residuales en asentamientos no planificados de países tropicales en desarrollo

A partir de la revisión de literatura planteada en la sección 0, fueron recopilados un total de 309 criterios (ver Anexo 5); de estos, 58 no estaban categorizados dentro de ninguna dimensión. Mientras que, los 258 restantes estaban agrupados en 10 diferentes dimensiones, siendo las más frecuentes: ambiental (107 criterios), económica (40 criterios), técnica (35 criterios) y social (27 criterios). Por otro lado, de los criterios encontrados, 85 no presentaban una métrica asociada o su definición no era clara. Adicionalmente, 89 criterios contaban con métricas asociadas a escalas cualitativas. Después del procesamiento, para unificar criterios repetidos, no aplicables o de medición no factible, se obtuvieron 9 criterios divididos en 3 dimensiones: técnico (3 indicadores), ambiental (2 indicadores) y económico (4 indicadores). Es importante recalcar que en esta fase no fueron incluidos criterios sociales debido a que su abordaje se realiza acoplado a un proceso de selección participativa de alternativas en el desarrollo del proyecto “Desarrollo de estrategias para el manejo de aguas residuales en asentamientos periurbanos, con enfoques de sostenibilidad y economía circular, en la cuenca del río Alto Lebrija”. Sin embargo, es necesario destacar que el estudio de factores sociales es incluido para el análisis de factores limitantes como parte del proceso de selección que aquí se propone.

Los criterios claves para la selección de tecnologías junto con su descripción, forma de valoración y escala difusa se presentan en la Tabla 14. Los criterios recopilados y escogidos para la evaluación de TDAR, son consistentes con estudios relativos a la selección de tecnologías. Por ejemplo, en comparación al estudio realizado Dewalkar & Shastri (2022) son compartidos un amplio número de indicadores. Sin embargo, muchos de ellos están localizadas en diferentes

categorías, los autores del estudio incluyen factores como la generación de olores, el impacto visual y la generación de ruido dentro una dimensión sociocultural. Mientras que, este estudio unifica todos estos aspectos en un índice de impacto ambiental, esto para simplificar la priorización de subcriterios. Asimismo, los autores integran en la categoría ambiental múltiples indicadores resultado del análisis de ciclo de vida preliminar de las alternativas. Este estudio no incluyó dichos indicadores debido a que no se contempla la implementación de esta metodología en la herramienta propuesta.

Del mismo modo, Lizot et al. (2021), contempla criterios similares en su estudio, sin embargo, muchos de los indicadores evaluados en ese estudio se encuentran agrupados en un indicador propuesto (p.ej. complejidad técnica) o fueron omitidos porque fueron considerados redundantes (p.ej. número de operarios requeridos y costos asociados a mano de obra). Al igual que en el estudio realizado por Dewalkar & Shastri (2022), este estudio considera dentro de la categoría social aspectos como emisión de olores, ruidos e impacto visual.

Finalmente, los criterios escogidos en este estudio coinciden con los seleccionados por Eseoglu et al. (2022), para la evaluación difusa y la selección de sistemas de tratamiento. Este y los otros estudios mencionados anteriormente incluyen indicadores para evaluar el potencial de aprovechamiento de subproductos que también fueron contemplados en la herramienta planteada. De manera similar, indicadores como confiabilidad del sistema, simplicidad y operabilidad no fueron incluidos debido a que estos se enmarcaban en el subcriterio facilidad de operación y mantenimiento. En conclusión, los criterios escogidos para la selección de tecnologías están alineados con la literatura existente y son suficientes para proveer un análisis exhaustivo para la selección desde un enfoque holístico.

Tabla 14

Criterios para la selección de tecnologías para el tratamiento descentralizado de aguas residuales en asentamientos no planificados en países tropicales en desarrollo

| 1. Criterio técnico | | | | | | |
|--|--|-----------|------------------|---|---|---|
| Subcriterio | Descripción | Objetivo | Tipo de variable | Valoración | Escala triangular difusa | Referencia |
| Facilidad técnica de operación y mantenimiento | Facilidad de la implementación de la operación y mantenimiento del sistema en función de la utilización de equipos o elementos que requieren ser reemplazados periódicamente | Maximizar | Cualitativa | Alta (5): El tren de tratamiento no requiere personal especializado ni equipos electromecánicos para su funcionamiento y utiliza materiales disponibles en el mercado local. Media (3): El tren de tratamiento requiere equipos electromecánicos excluyendo aireadores y/o materiales no disponibles en el mercado local. Baja (1): El tren de tratamiento requiere equipos aireadores incluidos y/o materiales no disponibles en el mercado local. | Muy Alta: (4,5,5) Alta: (3,4,5). Media: (2,3,4) Baja: (1,2,3) Muy Baja: (1,1,2) | (Arroyo & Molinos-Senante, 2018a; Castillo et al., 2016a, 2016a; D’Silva et al., 2021a; Markov et al., 2017; Ren & Liang, 2017a; Shen et al., 2018a) |
| Requerimiento energético | Energía eléctrica consumida por el tren de tratamiento por habitante equivalente. | Minimizar | Cuantitativa | kWh/hab | Muy Alta: (4,5,5) Alta: (3,4,5). Media: (2,3,4) Baja: (1,2,3) Muy Baja: (1,1,2) | (Arroyo & Molinos-Senante, 2018a; D’Silva et al., 2021a; Galvão et al., 2005a; Kalbar et al., 2013a; Kamami et al., 2011a; Khattiyavong & Lee, 2019a; Markov et al., 2017; Mena-Ulecia & Hernández, 2015a; Omran et al., 2021a) |

| | | | | | | |
|---------------------------------------|--|-----------|--------------|---------------------------|---|--|
| 1.7. Remociones de carga contaminante | Remociones del sistema de diferentes contaminantes como materia orgánica, nutrientes (nitrógeno amoniacal, nitrógeno total y fósforo total) y microorganismos patógenos (coliformes totales, fecales y <i>E. coli</i>). | Maximizar | Cuantitativa | % efectividad de remoción | Rango de eficiencias de remoción de contaminantes | (Anaokar et al., 2018a; Arroyo & Molinos-Senante, 2018a; Avramenko et al., 2010a; Kalbar et al., 2013a; Kamami et al., 2011a; H. Li et al., 2022; Markov et al., 2017; Mena-Ulecia & Hernández, 2015a; Muga & Mihelcic, 2008a; Shen et al., 2018a; Tjandraatmadja et al., 2013a) |
|---------------------------------------|--|-----------|--------------|---------------------------|---|--|

2. Criterio económico

| Criterio | Descripción | Objetivo | Tipo de variable | Valoración | Referencia | |
|---|---|-----------|------------------|---------------|--|--|
| 2.1 Costos de operación y mantenimiento | Se refiere a los gastos asociados con el funcionamiento del tren de tratamiento | Minimizar | Cuantitativa | \$USD/hab-año | Rango de costos de operación y mantenimiento en \$ USD/hab-año | (Avramenko et al., 2010a; Castillo et al., 2016a; D'Silva et al., 2021a; Józwiakowski et al., 2015a; Juznic-Zonta et al., 2022a; Kamami et al., 2011a; Mena-Ulecia & Hernández, 2015a; Muga & Mihelcic, 2008a; Omran et al., 2021a; Ren & Liang, 2017a; Shen et al., 2018a; Singhirunnusorn & Stenstrom, 2009a, 2010a; Tjandraatmadja et al., 2013a) |
| 2.2. Inversión inicial | Se refiere al dinero destinado a la adquisición de equipos, infraestructura y distintas actividades para la construcción e implantación del sistema de tratamiento. | Minimizar | Cuantitativa | \$USD/hab | Rango de inversión inicial en \$ USD | (Avramenko et al., 2010a; Castillo et al., 2016a; D'Silva et al., 2021a; Galvão et al., 2005a; Józwiakowski et al., 2015a; Juznic-Zonta et al., 2022a; Kamami et al., 2011a; H. Li et al., 2022; Mena-Ulecia & Hernández, 2015a; Muga & Mihelcic, 2008a; Omran et al., 2021a; Ren & Liang, |

2017a; Shen et al., 2018a; Singhirunnusorn & Stenstrom, 2009a; Starkl et al., 2022a; Tjandraatmadja et al., 2013a)

3. Criterio ambiental

| Criterio | Descripción | Objetivo | Tipo de variable | Métrica | Referencia | |
|--|--|-----------|------------------|--|---|---|
| Aprovechamiento de subproductos: agua residual tratada | Posibilidad de aprovechamiento del efluente del tren de tratamiento. | Maximizar | Cualitativa | Sí (1): Existe posibilidad de aprovechamiento del agua residual tratada. Bajo (0): No existe posibilidad de aprovechamiento del AR tratada. | Sí (0,1,1) No (0,0,1) | (Arroyo & Molinos-Senante, 2018a) |
| Aprovechamiento de subproductos: Biogás | Posibilidad de aprovechamiento del biogás generado durante el tratamiento | Maximizar | Cualitativa | Sí (1): Existe posibilidad de aprovechamiento del biogás generado. No (0): No existe posibilidad de aprovechamiento del biogás generado. | Sí (0,1,1) No (0,0,1) | (D'Silva et al., 2021a; Wang et al., 2012a) |
| Aprovechamiento de subproductos: Lodos generados | Posibilidad de aprovechamiento de lodos generados durante el tratamiento | Maximizar | Cualitativa | Sí (1): Existe posibilidad de aprovechamiento de los lodos generados. No (0): No existe posibilidad de aprovechamiento de los subproductos generados. | Sí (0,1,1) No (0,0,1) | (Markov et al., 2017, 2017; Rodríguez-Castillo et al., 2023a) |
| Índice de impacto ambiental (Ver Anexo 6) | Impacto ambiental de la implementación de en función de la generación de olores, ruidos, gases efecto invernadero e impacto visual | Minimizar | Cualitativa | Bajo (5): Índice de impacto ambiental bajo. Medio (3): Índice de impacto ambiental medio. Alto (1): Índice de impacto ambiental alto. | Bajo: (3,5,5). Medio: (2,3,4) Alto: (1,1,3) | (Avramenko et al., 2010a; Castillo et al., 2016a; D'Silva et al., 2021a; Juznic-Zonta et al., 2022a; Kalbar et al., 2013a; Khattiyavong & Lee, 2019a; Mena-Ulecia & Hernández, 2015a; Rodríguez-Castillo et al., 2023a; Tjandraatmadja et al., 2013a; Wang et al., 2012a) |

4.2.6 Priorización de criterios claves de sostenibilidad para la selección de trenes de TDAR en asentamientos no planificados

La

Tabla 15 presenta los pesos ponderados de los criterios clave recopilados a través de la aplicación del método Fuzzy-AHP. Estos pesos fueron derivados de las comparaciones por pares realizadas por 15 expertos, cuyas opiniones se recabaron mediante un cuestionario de priorización desarrollado para este propósito. Inicialmente, se obtuvieron 17 respuestas, teniendo una tasa de respuesta del 13.07%; sin embargo, se excluyeron 2 de ellas debido a la falta del índice de consistencia recomendado.

Dentro los profesionales que contribuyeron con su opinión como expertos para la priorización de criterios y subcriterios, predominaron los académicos con experiencia en el estudio del tratamiento de agua residuales en países tropicales en desarrollo (11 expertos), dentro de este grupo hubo una variada distribución espacial incluyendo profesionales de Asia, América y África. Asimismo, la encuesta de priorización fue respondida por cuatro profesionales asociados a instituciones prestadoras de servicios en países tropicales en desarrollo. Al igual que los académicos, estos profesionales ejercen sus labores en distintas zonas de países tropicales en desarrollo ubicadas en Asia y América. A pesar de que el índice de respuesta no fue alto, se

obtuvieron priorización de profesionales con suficiente experticia que podrían garantizar una toma de decisiones adecuada.

Tabla 15

Criterios claves priorizados para la selección de trenes descentralizados en asentamientos no planificados de países tropicales en desarrollo

| No. | Criterio | Peso ponderado difuso (% , %, %) | Peso ponderado concreto (%) |
|-----|--|----------------------------------|-----------------------------|
| 1 | Técnica | (32.84, 39.56, 47.61) | 39.53 |
| 1.1 | Facilidad de operación y mantenimiento | (10.53, 14.97, 21.32) | 14.97 |
| 1.2 | Requerimiento energético | (7.46, 10.17, 13.90) | 10.15 |
| 1.3 | Remociones de carga contaminante | (10.13, 14.42, 20.37) | 14.40 |
| 2 | Económica | (19.94, 23.76, 28.74) | 23.80 |
| 2.1 | Costos de operación y mantenimiento | (8.52, 11.84, 16.69) | 11.86 |
| 2.2 | Inversión inicial | (8.52, 11.92, 16.80) | 11.94 |
| 3 | Ambiental | (29.35, 36.67, 45.42) | 36.67 |
| 3.1 | Aprovechamiento de subproductos: Agua residual tratada | (5.20, 8.43, 13.18) | 8.46 |
| 3.2 | Aprovechamiento de subproductos: biogás | (6.08, 10.02, 16.19) | 10.00 |
| 3.3 | Aprovechamiento de subproductos: Lodos generados | (7.18, 11.8, 18.34) | 11.57 |
| 3.4 | Índice de impacto ambiental | (4.01, 6.60, 11.01) | 6.63 |

En relación con la priorización de criterios, se evidencia un claro dominio de los aspectos técnicos y ambientales sobre los económicos. Esto sugiere que la protección de los ecosistemas y el óptimo funcionamiento del tren se consideran más relevantes que la asequibilidad y el costo del servicio. Una posible explicación radica en la percepción de que los beneficios económicos derivados de la implementación de esquemas de economía circular podrían compensar posibles

problemas financieros. A pesar de estas diferencias, es importante recalcar que ninguno de estos criterios supera una importancia relativa en la toma de decisión superior al 50%.

Al examinar los subcriterios de la dimensión técnica, se destaca la consideración especial hacia la facilidad de operación y mantenimiento, así como las remociones de carga contaminante, ambos con una importancia relativa similar, siendo estos dos subcriterios los de mayor importancia relativa. Seguido, el consumo energético se percibe como ligeramente menos importante que los subcriterios. Por esto se puede afirmar que, a nivel técnico, se prioriza la calidad del efluente y la no necesidad de personal especializado para el funcionamiento del sistema en comparación con el consumo de energía potencial. Una razón para esto podría radicar en la percepción de que la utilización de subproductos para la generación de energía podría contribuir a disminuir el consumo de energía eléctrica proveniente de otras fuentes. Dentro del criterio económico, a pesar de que este es el criterio con menor peso ponderando, los subcriterios que lo componen se encuentran en tercer y cuarto lugar destacando la importancia de la inversión inicial y costos de operación y mantenimiento en el proceso de toma de decisiones.

De manera similar, dentro del subcriterio ambiental, se otorga prioridad al aprovechamiento de la biomasa generada y el biogás en comparación con la utilización del agua residual tratada. Esto implica que, para asentamientos no planificados, se valoraría más la obtención de beneficios potenciales derivados del uso de biomasa como biofertilizante o enmienda, junto con la posible captación de metano generado por la digestión anaerobia, en contraste con los beneficios potenciales de las actividades que aprovechan el agua tratada. Una posible razón de esto podría ser que, la irrigación, una de las principales actividades relacionadas con el uso del agua tratada, no resulta atractiva en estos contextos debido a que la disponibilidad de área es limitada y hay una competencia significativa por su uso (UN-Habitat, 2003). Además, para otros usos, como

el riego de áreas exteriores o actividades domésticas que no requieren agua potable, la calidad del efluente necesaria puede ser demasiado estricta debido a potenciales problemas de salud pública causados por contacto humano con las AR, junto con otras limitaciones técnicas, como la necesidad de bombeo y desafíos de percepción en relación con la utilización de este recurso.

Asimismo, en este criterio se identificó como el subcriterio de menor importancia los posibles impactos estéticos, priorizando así la implementación de esquemas de economía circular sobre las potenciales preocupaciones causadas por ruidos, olores e impacto visual.

Finalmente, es fundamental destacar la flexibilidad inherente a la herramienta propuesta. En caso de que se perciba que la priorización proporcionada no se ajusta a las condiciones específicas de un contexto de toma de decisiones, es posible realizar ajustes aplicando el método Fuzzy-AHP nuevamente, utilizando el juicio de expertos locales como referencia. Esto asegura que la herramienta sea adaptable y pueda ser finamente ajustada para reflejar con precisión las particularidades y matices de cada escenario de decisión.

4.2.7 Caracterización de trenes planteados respecto a criterios clave

En la Tabla 16 se presenta la caracterización de los trenes de tratamiento respecto a los diferentes criterios seleccionados en la sección anterior. Esta información sirve como punto de partida para la evaluación de las alternativas, suministrando la información necesaria para completar la matriz de decisión en siguientes fases de la herramienta. El procedimiento utilizado para el cálculo del índice de impacto ambiental es presentado en el Apéndice H.

Tabla 16

Caracterización de los trenes para el tratamiento descentralizado de aguas residuales en asentamientos no planificados en países tropicales en desarrollo respecto al criterio técnico, económico y ambiental

| Tren | Facilidad de O&M ^{1,2,3,6} | Requerimiento energético ^{1,2,6} | Inversión inicial ^{1,2,3} | Costos de operación y mantenimiento ^{1,2,3} | Aprovechamiento de subproductos: Agua Residual tratada* | Aprovechamiento de subproductos: biogás ¹ | Aprovechamiento de subproductos: Lodos generados ^{** 2} | Índice de impacto ambiental ³ |
|------|-------------------------------------|---|------------------------------------|--|---|--|--|--|
| T1 | Alta | Muy Bajo | Muy Baja | Muy bajo | Media | Muy bajo | Media | Media |
| T2 | Alta | Muy Bajo | Baja | Muy bajo | Alta | Muy bajo | Media | Media |
| T3 | Alta | Muy Bajo | Baja | Muy bajo | Media | Muy bajo | Media | Media |
| T4 | Alta | Muy Bajo | Baja | Muy bajo | Baja | Muy bajo | Media | Media |
| T5 | Media | Bajo | Media | Bajo | Baja | Muy bajo | Media | Alta |
| T6 | Alta | Bajo | Media | Bajo | Alta | Muy bajo | Media | Alta |
| T7 | Alta | Muy Bajo | Media | Bajo | Alta | Muy bajo | Media | Alta |
| T8 | Media | Medio | Media | Medio | Alta | Muy bajo | Media | Alta |
| T9 | Media | Muy Bajo | Media | Medio | Alta | Muy bajo | Media | Media |
| T10 | Media | Alto | Alta | Alto | Media | Muy bajo | Media | Media |
| T11 | Media | Alto | Alta | Alto | Alta | Muy bajo | Media | Media |
| T12 | Media | Alto | Alta | Alto | Media | Muy bajo | Media | Media |
| T13 | Media | Alto | Alta | Alto | Alta | Muy bajo | Media | Media |
| T14 | Alta | Bajo | Baja | Bajo | Media | Muy bajo | Media | Media |
| T15 | Alta | Bajo | Baja | Bajo | Media | Muy bajo | Media | Media |
| T16 | Alta | Bajo | Media | Bajo | Media | Muy bajo | Media | Media |
| T17 | Alta | Bajo | Media | Bajo | Alta | Muy bajo | Media | Media |
| T18 | Media | Medio | Media | Medio | Media | Muy bajo | Media | Media |
| T19 | Media | Medio | Media | Medio | Alta | Muy bajo | Media | Media |
| T20 | Alta | Medio | Media | Medio | Media | Muy bajo | Media | Alta |
| T21 | Alta | Medio | Media | Medio | Alta | Alto | Media | Alta |
| T22 | Media | Bajo | Media | Medio | Media | Alto | Media | Alta |
| T23 | Media | Bajo | Media | Medio | Alta | Alto | Media | Alta |
| T24 | Baja | Alto | Alta | Alto | Media | Alto | Media | Alta |
| T25 | Baja | Alto | Alta | Alto | Alta | Alto | Media | Alta |
| T26 | Media | Bajo | Media | Medio | Media | Alto | Media | Alta |

| Tren | Facilidad de O&M ^{1,2,3,6} | Requerimiento energético ^{1,2,6} | Inversión inicial ^{1,2,3} | Costos de operación y mantenimiento ^{1,2,3} | Aprovechamiento de subproductos: Agua Residual tratada* | Aprovechamiento de subproductos: biogás ¹ | Aprovechamiento de subproductos: Lodos generados ^{** 2} | Índice de impacto ambiental ³ |
|------|-------------------------------------|---|------------------------------------|--|---|--|--|--|
| T27 | Media | Bajo | Media | Medio | Alta | Alto | Media | Alta |
| T28 | Baja | Alto | Alta | Alto | Media | Alto | Media | Alta |
| T29 | Baja | Alto | Alta | Alto | Alta | Alto | Media | Alta |
| T30 | Muy baja | Muy Alto | Muy Alta | Muy Alto | Media | Muy bajo | Media | Bajo |
| T31 | Muy baja | Muy Alto | Muy Alta | Muy Alto | Alta | Muy bajo | Media | Bajo |

Nota: TS = Tanque Séptico; TI = Tanque de Imhoff; RAD: Reactor Anaerobio con Deflectores; RAFA= Reactor Anaerobio de flujo ascendente; FP= Filtro Percolador; CBR= Contactor Biológico Rotativo; FA= Filtro Anaerobio; LF= Laguna Facultativa; AE = Aireación Extendida; HA FSSH= Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Horizontal; HA FSSV= Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Vertical; LM= Laguna de Maduración; CL= Cloración; D-UV: Desinfección UV; N/A: No aplica. *Fuente:* Adaptado de ¹ CENTA (2021), ² Ortega de Miguel (2010), ³ Brault et al. (2022), ⁴ MARN (2016), ⁵ Von Sperling, (2007), ⁶ AECID (2022)

4.2.8 Evaluación de compensaciones

Teniendo como insumo la caracterización de alternativas frente a criterios clave, la herramienta evaluará las compensaciones entre las diversas alternativas aplicables al asentamiento considerando los criterios clave previamente ponderados mediante la aplicación del método FUZZY AHP (Buckley, 1985). Este proceso resulta en una clasificación de las diferentes alternativas evaluadas que indica el tren de tratamiento con mayor potencial de sostenibilidad en el asentamiento donde se esté aplicando la herramienta.

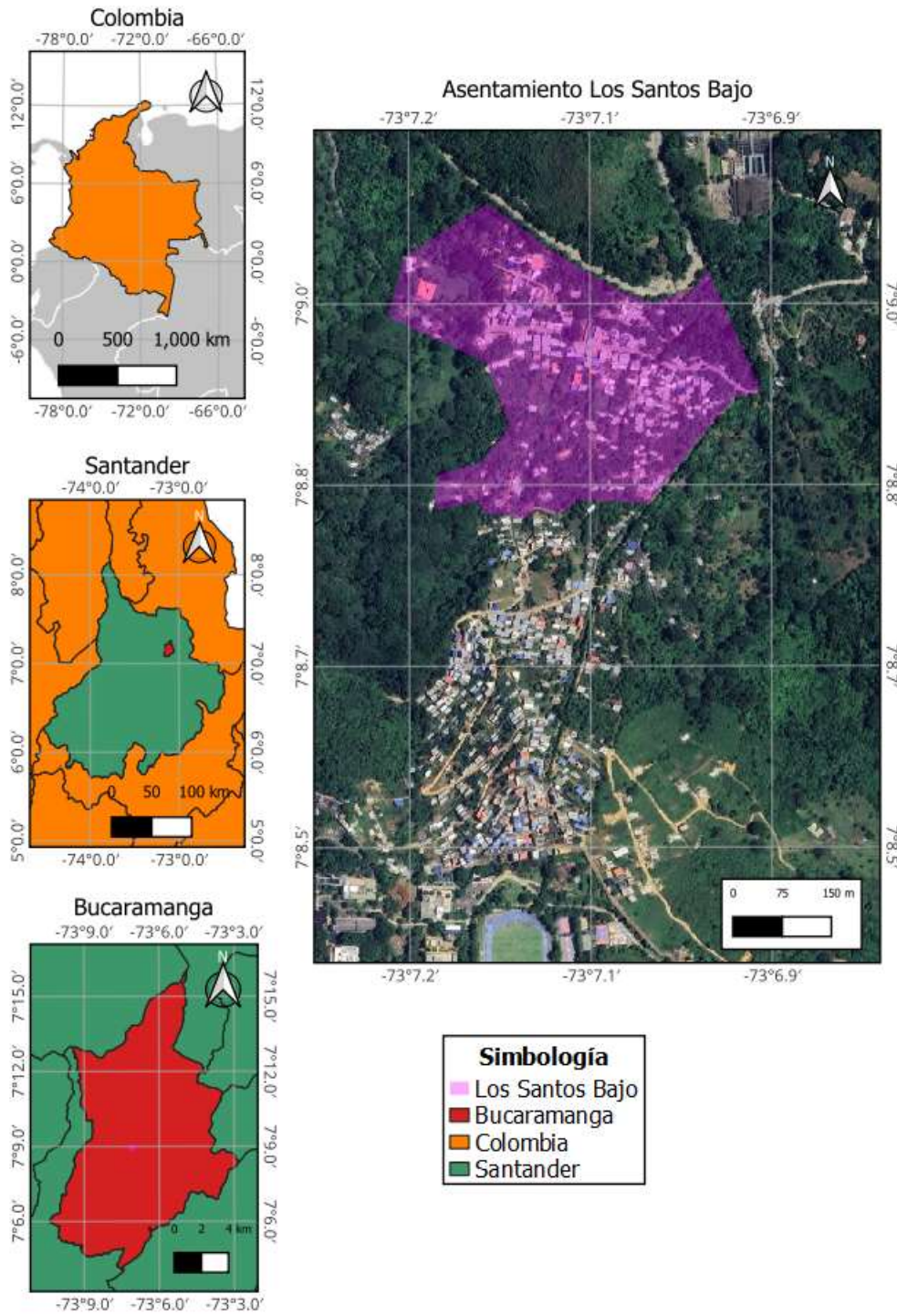
4.3 Validación la herramienta para la selección de STDAR en el asentamiento Los Santos Bajo (Bucaramanga, Santander, Colombia).

4.3.1 Conocimiento del contexto: Caracterización de asentamiento

En concordancia con el protocolo establecido en la fase II, la implementación de la herramienta inició con una fase de caracterización del asentamiento. En el Anexo 8 se detalla la recopilación de información, conforme al formato de caracterización propuesto.

Con base en estos datos, se determinó que el asentamiento Los Santos Bajo actualmente comprende 283 viviendas, evidenciando una tasa de crecimiento anual del 28.7%. Ubicado en los cerros orientales de Bucaramanga, en proximidad al área urbana, el asentamiento presenta predominio de zonas con baja pendiente (0-3%).

Figura 6
Localización general del asentamiento los Santos Bajo



Respecto a la calidad del AR vertida, la Tabla 17 exhibe los parámetros determinados durante jornadas de muestreo. Las jornadas de aforo revelaron que el volumen de agua generado por la población alcanza los 4.35 L/s. El vertimiento de AR fluye hacia el río Suratá, sin que aguas abajo se identifiquen estructuras para la captación con fines de consumo humano. Además, el caudal del cuerpo de agua garantiza una adecuada dilución del vertido. Se subraya que este proyecto presupone una actualización del sistema de alcantarillado de AR para cumplir con los requerimientos técnicos.

En relación con las características ambientales de la zona, se trata de un área cálida semihúmeda, con una precipitación anual promedio de 1300 mm y una temperatura media de 22 °C, según el Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica (POMCA) del río Suratá (CDMB, 2019). En términos económicos, el 55% de la población local cuenta con ingresos mensuales inferiores a un salario mínimo legal vigente. Para la operación y mantenimiento de la planta de TDAR, se asume que una entidad prestadora de servicios públicos de Bucaramanga se hará cargo de garantizar el correcto funcionamiento del sistema propuesto. Se presuponen buenas condiciones geotécnicas y un nivel freático por debajo de los 3.5 m de profundidad, aunque la información disponible al respecto es limitada. Dada la clasificación de la zona como destinada a la protección y restauración, se destacan posibles conflictos de uso del suelo.

Respecto a las condiciones de construcción y operación, la cercanía a una ciudad principal elimina problemas relativos a la disponibilidad de materiales de construcción y repuestos, así como a los servicios para la reparación de equipos electromecánicos.

Tabla 17*Caracterización de aguas residuales generadas por la comunidad de Los Santos Bajo*

| Parámetro | Unidad | Valor |
|------------------------------|---------------|------------------|
| Sólidos suspendidos totales: | mg/L | 34 ± 40 |
| DBO ₅ | mg/L | 69 ± 48 |
| DQO | mg/L | 140 ± 156 |
| DBO/DQO | Adimensional | 69/140 |
| NT | mg/L | 10.7 ± 3.8 |
| PT | mg/L | 4.76 ± 1.49 |
| NH ₃ -N | mg/L | 3.7 ± 3.9 |
| Coliformes fecales | NMP/100 mL | 2.9 ± 2.8 (10E6) |

Fuente: UIS & amb (2023)

4.3.2 Definición de metas y objetivos

En el marco de la definición de metas y objetivos, se propone un horizonte de diseño de 25 años, conforme a la normativa local (Resolución 330 de 2017). En lo que respecta al vertimiento de AR, la Resolución 631 de 2015 establece que el AR tratada para vertimiento debe cumplir con los estándares presentados en la

Tabla 18. En dicha tabla se detallan las cargas de vertimientos, las cuales se fundamentan en concentraciones y volúmenes previamente determinados. Es importante señalar que las concentraciones obtenidas durante el proceso de caracterización son notablemente bajas, probablemente debido a la presencia de alcantarillados inadecuados con sistemas combinados o a la dilución en cuerpos de agua durante el transporte. En consecuencia, se han empleado

concentraciones típicas del agua residual de carga media, conforme a lo establecido por la Resolución 330 de 2017, con el propósito de evitar el subdimensionamiento de las unidades.

Tabla 18

Eficiencia de remoción de contaminantes requerida para el tren de tratamiento descentralizado en el asentamiento Los Santos Bajo

| Parámetro | Concentración inicial asumida ¹ | Concentración final requerida ² | Eficiencia requerida [%] |
|------------|--|--|--------------------------|
| DBO [mg/L] | 250.0 | 90.0 | 64.0 |
| DQO [mg/L] | 400.0 | 180.0 | 55.0 |
| SST [mg/L] | 400.0 | 90.0 | 77.5 |

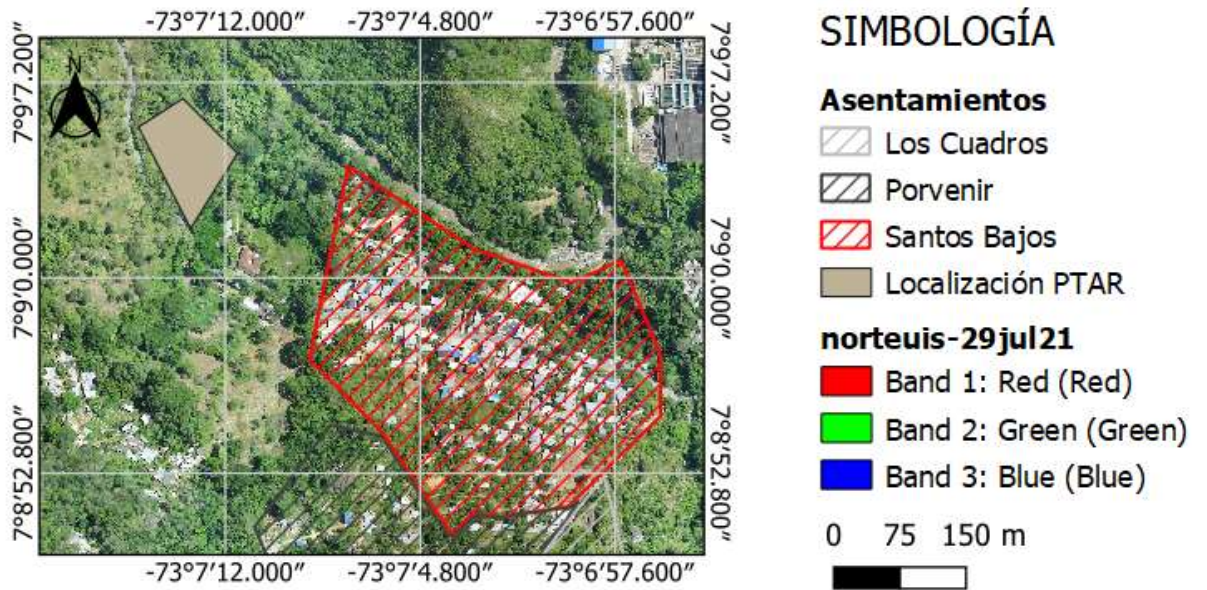
Fuente: ¹Resolución 330 de 2017, ²Resolución 631, 2015

En cuanto al emplazamiento de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), se recomienda su construcción en la zona presentada en la Figura 7. Esta área se caracteriza por una superficie disponible de 8000 m², pendientes relativamente bajas inferiores al 1%, y distancias adecuadas de 80 m al punto de vertido y 150 m a la comunidad, según lineamientos planteados en la Resolución 799 de 2021.

En relación con el reúso de AR, se plantea la utilización del AR tratada para riego destinado a la reforestación o agricultura, siguiendo las directrices establecidas por diversas entidades encargadas, en consonancia con el uso de suelo establecido para la población (CDMB, 2019) y posibilidades de reúso estipuladas en la normativa Resolución 1256 de 2021.

Figura 7

Potencial localización de la planta de tratamiento descentralizada de Los Santos Bajo



Fuente: Elaboración propia

4.3.3 Análisis de factores limitantes

En la Tabla 19 se presenta de manera sistematizada el análisis de factores limitantes acorde con la información presentada en la sección 4.2.3 y la información recopilada durante la ejecución de 4.3.1.

Tabla 19

Análisis de factores limitantes para el asentamiento Los Santos Bajo

| Factor limitante | Análisis | Trenes tecnológicos descartados |
|--|---|--|
| Grado de consolidación tecnológica | Debido a que no aparece reglamentada su implementación en el Anexo 2 del título E de RAS (MVCT, 2021), se descarta la implementación de trenes tecnológicos que incluyan reactores anaerobios con deflectores. | T14, T15, T16, T17, T18, T19 |
| Complejidad técnica de operación y mantenimiento | Se asume que la entidad operativa local (amb) con la capacidad técnica necesaria, la cual dispone de técnicos especializados capaces de llevar a cabo las labores de operación y mantenimiento, o brindar respaldo en dichas actividades. | Ninguno |
| Requerimiento energético | Debido a que existe suministro de energía eléctrica aproximadamente constante (>95% del tiempo), además de su proximidad a zonas con servicio de energía eléctrica, no se considera el requerimiento energético un factor limitante. Sin embargo, se descartan trenes con aireación mecánica debido a su alto consumo energético. | T30, T31 |
| Potencial de mejora | No hay restricciones en este sentido en el contexto de aplicación. | Ninguno |
| Remociones de carga contaminante | Cada tren debe satisfacer los estándares de calidad establecidos (Resolución 631 de 2015), que actúa como un factor restrictivo, donde los límites máximos determinados aplican a todos los parámetros. | Se presenta análisis en la Tabla 20 |
| Área disponible | La disponibilidad de espacio se ve restringida, convirtiéndose en un factor limitante, ya que la zona de estudio está ubicada en un Distrito de Manejo Regional Integrado (DMRI) (CDMB, 2019). Por esta razón, se descartan trenes con tecnologías extensivas para el tratamiento y se establece un límite de 0.9 m ² por habitante en consonancia con lo presentado en la Figura 7. | Se presenta análisis en la Tabla 21 |

| Factor limitante | Análisis | Trenes tecnológicos descartados |
|--|--|---------------------------------|
| Costos de operación y mantenimiento | Se asume que, la entidad operativa local (amb) con la capacidad institucional necesaria para la gestión de subsidios sobre los costos de operación y mantenimiento. | Ninguno |
| Inversión inicial | Es asumido que los costos de construcción y puesta en marcha provengan de fondos públicos. Por ende, la inversión inicial no se considera un factor limitante. | Ninguno |
| Aprovechamiento de subproductos: AR tratada | Es deseable que el esquema cuente con la posibilidad del aprovechamiento de este subproducto. Sin embargo, no se considera un factor limitante. | Ninguno |
| Aprovechamiento de subproductos: biogás | Es deseable que el esquema cuente con la posibilidad del aprovechamiento de este subproducto. Sin embargo, no se considera un factor limitante. No hay restricciones en este sentido en el contexto de aplicación. | Ninguno |
| Aprovechamiento de subproductos: Lodos generados | Es deseable que el esquema cuente con la posibilidad del aprovechamiento de este subproducto. Sin embargo, no se considera un factor limitante. No hay restricciones en este sentido en el contexto de aplicación. | Ninguno |
| Emisiones de GEI | No hay restricciones en este sentido en el contexto de aplicación. | Ninguno |
| Generación de olores | No hay restricciones en este sentido en el contexto de aplicación. | Ninguno |
| Generación de ruidos | No hay restricciones en este sentido en el contexto de aplicación. | Ninguno |

| Factor limitante | Análisis | Trenes tecnológicos descartados |
|--------------------------|--|---------------------------------|
| Integración paisajística | No hay restricciones en este sentido en el contexto de aplicación. | Ninguno |

La Tabla 20 exhibe los rendimientos esperados de los diversos trenes de procesos de tratamiento propuestos aplicables al contexto colombiano que fueron estudiados en la primera fase de este estudio. Se observa que todos los trenes de tratamiento propuestos podrían satisfacer los estándares colombianos respecto a la eliminación de materia en suspensión y materia orgánica.

Tabla 20

Análisis de las remociones de los distintos trenes de tratamiento para el Asentamiento Los Santos Bajo

| Tren | Componentes | Remoción SST (%) | Remoción DBO ₅ (%) | Remoción DQO (%) | Cumple |
|------|-----------------------|------------------|-------------------------------|------------------|--------|
| T1 | TS/TI+LF | 70 - 80 | 80 - 85 | 70 - 80 | Sí |
| T2 | TS/TI+LF+LM | 77.5 - 86 | 86 - 91 | 76 - 86 | Sí |
| T3 | TS/TI+HA FSSH | 90 - 94 | 88 - 93 | 80 - 86 | Sí |
| T4 | TS/TI+HA FSSH+LM | 92.5 - 95.8 | 91.6 - 95.8 | 84 - 90.2 | Sí |
| T5 | TS/TI+FAFA | 60 - 90 | 40 - 75 | 40 - 75 | Sí |
| T6 | TS/TI+FAFA+LF | 70 - 80 | 75 - 85 | 70 - 80 | Sí |
| T7 | TS/TI+FAFA+HA FSSH | 92 - 98.5 | 91 - 97.5 | 85 - 95 | Sí |
| T8 | TS/TI+FAFA+CL | 60 - 90 | 40 - 75 | 40 - 75 | Sí |
| T9 | TS/TI+HA FSSV+HA FSSH | 98 - 99.1 | 98.2 - 99.3 | 95 - 97.2 | Sí |
| T10 | TI+FP | 85 - 95 | 85 - 90 | 80 - 85 | Sí |
| T11 | TI+FP+CL | 85 - 95 | 85 - 90 | 80 - 85 | Sí |
| T12 | TI+CBR | 85 - 95 | 85 - 90 | 80 - 85 | Sí |
| T13 | TI+CBR+CL | 85 - 95 | 85 - 90 | 80 - 85 | Sí |
| T20 | RAFA+HA FSSV | 92 - 99 | 91 - 98 | 85 - 95 | Sí |
| T21 | RAFA+HA FSSV+HA FSSH | 96 - 97 | 96 - 97 | 94 - 97 | Sí |
| T22 | RAFA+HA FSSH | 92 - 99 | 91 - 98 | 85 - 95 | Sí |
| T23 | RAFA+HA FSSH+LM | 90 - 94 | 94 - 96 | 90 - 93 | Sí |
| T24 | RAFA+CBR | 85 - 95 | 85 - 90 | 80 - 85 | Sí |
| T25 | RAFA+CBR+CL | 86 - 95 | 86 - 90 | 81 - 85 | Sí |

| Tren | Componentes | Remoción SST (%) | Remoción DBO ₅ (%) | Remoción DQO (%) | Cumple |
|------|-------------|------------------|-------------------------------|------------------|--------|
| T26 | RAFA+LF | 70 - 80 | 75 - 85 | 75 - 85 | Sí |
| T27 | RAFA+LF+LM | 75 - 84 | 80 - 89 | 74 - 84 | Sí |
| T28 | RAFA+FP | 85 - 95 | 85 - 90 | 80 - 85 | Sí |
| T29 | RAFA+FP+CL | 86 - 95 | 86 - 90 | 81 - 85 | Sí |

Nota: TS = Tanque Séptico; TI = Tanque de Imhoff; RAD: Reactor Anaerobio con Deflectores; RAFA= Reactor Anaerobio de flujo ascendente; FP= Filtro Percolador; CBR= Contactor Biológico Rotativo; FA= Filtro Anaerobio; LF= Laguna Facultativa; AE = Aireación Extendida; HA FSSH= Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Horizontal; HA FSSV= Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Vertical; LM= Laguna de Maduración; CL= Cloración

Con el propósito de realizar una evaluación más detallada de las restricciones asociadas a los requisitos de superficie para los trenes de tratamiento analizados, así como su comparación con la disponibilidad de espacio (0.9 m²/hab), se presenta en la Tabla 21 la superficie requerida por habitante para los distintos trenes de tratamiento. Esta información se obtuvo mediante predimensionamientos llevados a cabo considerando las condiciones de caudal, concentración y temperatura específicas del entorno del asentamiento Los Santos Bajo.

Tabla 21

Análisis de áreas requeridas por los distintos trenes de tratamiento para el asentamiento Los Santos Bajo

| Notación | Tecnología primaria | Tecnología secundaria | Tecnología terciaria | Área total tren de tratamiento [m ²] | Es aplicable al contexto |
|----------|--------------------------------------|---|----------------------|--|--------------------------|
| T1 | Tanque Séptico / Tanque de Imhoff | Laguna Facultativa | - | 1.98 | No |
| T2 | Tanque Séptico / Tanque de Imhoff | Laguna Facultativa | Laguna de Maduración | 5.15 | No |
| T3 | Tanque Séptico / Tanque de Imhoff | Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Horizontal | - | 3.40 | No |

| | | | | | |
|-----|---|--|--|------|----|
| T4 | Tanque Séptico / Tanque de Imhoff | Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Horizontal | Laguna de Maduración | 6.57 | No |
| T5 | Tanque Séptico / Tanque de Imhoff | Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente | - | 0.18 | Sí |
| T6 | Tanque Séptico / Tanque de Imhoff | Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente | Laguna Facultativa | 0.98 | No |
| T7 | Tanque Séptico / Tanque de Imhoff | Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente | Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Horizontal | 1.07 | No |
| T8 | Tanque Séptico / Tanque de Imhoff | Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente | Cloración | 0.19 | Sí |
| T9 | Tanque Séptico / Tanque de Imhoff | Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Vertical | Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Horizontal | 2.88 | No |
| T10 | Tanque de Imhoff | Filtro Percolador | - | 0.04 | Sí |
| T11 | Tanque de Imhoff | Filtro Percolador | Cloración | 0.06 | Sí |
| T12 | Tanque de Imhoff | Contactador Biológico Rotativo | - | 0.07 | Sí |
| T13 | Tanque de Imhoff | Contactador Biológico Rotativo | Cloración | 0.09 | Sí |
| T20 | Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente | Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial Vertical | - | 1.13 | No |
| T21 | Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente | Humedales artificiales de flujo subsuperficial Vertical | Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Horizontal | 2.03 | No |
| T22 | Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente | Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Horizontal | - | 2.38 | No |

| | | | | | |
|-----|---------------------------------------|---|----------------------|------|----|
| T23 | Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente | Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Horizontal | Laguna de Maduración | 5.55 | No |
| T24 | Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente | Contactador Biológico Rotativo | - | 0.07 | Sí |
| T25 | Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente | Contactador Biológico Rotativo | Cloración | 0.09 | Sí |
| T26 | Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente | Laguna Facultativa | - | 1.01 | No |
| T27 | Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente | Laguna Facultativa | Laguna de Maduración | 4.18 | No |
| T28 | Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente | Filtro Percolador | - | 0.03 | Sí |
| T29 | Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente | Filtro Percolador | Cloración | 0.05 | Sí |

Este proceso de análisis de factores limitantes generó el listado final de trenes a evaluar para la selección en el asentamiento Los Santos Bajo. Estos trenes son presentados en la Tabla 22.

Tabla 22

Trenes aplicables al asentamiento Los Santos Bajo resultado del análisis de factores limitantes

| Notación | Tecnología primaria | Tecnología secundaria | Tecnología terciaria |
|----------|---------------------|--------------------------------------|----------------------|
| T5 | Tanque Séptico | Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente | - |
| T8 | Tanque Séptico | Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente | Cloración |
| T10 | Tanque de Imhoff | Filtro Percolador | - |
| T11 | Tanque de Imhoff | Filtro Percolador | Cloración |

| Notación | Tecnología primaria | Tecnología secundaria | Tecnología terciaria |
|----------|---------------------------------------|--------------------------------|----------------------|
| T12 | Tanque de Imhoff | Contactador Biológico Rotativo | - |
| T13 | Tanque de Imhoff | Contactador Biológico Rotativo | Cloración |
| T24 | Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente | Contactador Biológico Rotativo | - |
| T25 | Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente | Contactador Biológico Rotativo | Cloración |
| T28 | Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente | Filtro Percolador | - |
| T29 | Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente | Filtro Percolador | Cloración |

4.3.4 Estimación de implicaciones

Una vez identificados los trenes aplicables en el contexto del asentamiento Los Santos Bajo, la estimación de las implicaciones requiere completar la matriz de decisión destinada a evaluar dichos trenes. Con este propósito, se emplearon como insumos la caracterización previamente realizada en la fase anterior y las escalas difusas de evaluación presentadas con anterioridad. En la Tabla 23,

Tabla 24 y

Tabla 25 se presenta la matriz de decisión utilizada para la evaluación de alternativas.

Tabla 23

Matriz inicial para la selección de un sistema descentralizado en el asentamiento Los Santos Bajo, alternativas caracterizadas respecto al criterio técnico

| Alternativa | | Técnico | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------|-------------|--|-------|----------------------------------|------|-------|-------|------|------------------------|------|------|-----------|------|------|-----------|------|------|-----------|------|------|-----------|------|------|--|------|------|-----------|------|--|
| | | Facilidad de operación y mantenimiento (cualitativo) | | Consumo de energía (Cualitativo) | | | | | Eficiencia de remoción | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | SST (%) | | | DBO (%) | | | DQO (%) | | | NT (%) | | | PT (%) | | | Coliformes (Unidades logarítmicas removidas) | | | | | |
| | | | | | | | | | Maximizar | | | Minimizar | | | Maximizar | | | Maximizar | | | Maximizar | | | Maximizar | | | Maximizar | | |
| min | med | max | min | med | max | min | med | max | min | med | max | min | med | max | min | med | max | min | med | max | min | med | max | min | med | max | | | |
| | | 10.53 | 14.97 | 21.32 | 7.46 | 10.17 | 13.90 | 1.69 | 2.40 | 3.39 | 1.69 | 2.40 | 3.39 | 1.69 | 2.40 | 3.39 | 1.69 | 2.40 | 3.39 | 1.69 | 2.40 | 3.39 | 1.69 | 2.40 | 3.39 | 1.69 | 2.40 | 3.39 | |
| | | % | % | % | % | % | % | % | % | % | % | % | % | % | % | % | % | % | % | % | % | % | % | % | % | % | % | % | |
| TS/TF+FAFA | T5 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 60 | 75 | 90 | 40 | 57.5 | 75 | 40 | 57.5 | 75 | 0 | 5 | 10 | 0 | 2.5 | 5 | 0 | 0.5 | 1 | | | | |
| TS/TF+FAFA+CL | T8 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 60 | 75 | 90 | 40 | 57.5 | 75 | 40 | 57.5 | 75 | 0 | 5 | 10 | 0 | 2.5 | 5 | 3 | 3.5 | 4 | | | | |
| | TI+FP | T10 | 2 | 3 | 3 | 2 | 3 | 4 | 85 | 90 | 95 | 85 | 87.5 | 90 | 80 | 82.5 | 85 | 20 | 27.5 | 35 | 20 | 25 | 30 | 1 | 1 | 1 | | | |
| | TI+FP+CL | T11 | 2 | 3 | 3 | 2 | 3 | 4 | 85 | 90 | 95 | 85 | 87.5 | 90 | 80 | 82.5 | 85 | 20 | 27.5 | 35 | 20 | 25 | 30 | 4 | 4.5 | 5 | | | |
| | TI+CBR | T12 | 1 | 2 | 3 | 2 | 3 | 4 | 85 | 90 | 95 | 85 | 87.5 | 90 | 80 | 82.5 | 85 | 20 | 27.5 | 35 | 20 | 25 | 30 | 1 | 1.5 | 2 | | | |
| | TI+CBR+CL | T13 | 1 | 2 | 3 | 2 | 3 | 4 | 85 | 90 | 95 | 85 | 87.5 | 90 | 80 | 82.5 | 85 | 20 | 27.5 | 35 | 20 | 25 | 30 | 4 | 4.5 | 5 | | | |
| | RAFA+CBR | T24 | 1 | 2 | 3 | 2 | 3 | 4 | 85 | 90 | 95 | 85 | 87.5 | 90 | 80 | 82.5 | 85 | 20 | 27.5 | 35 | 10 | 15 | 20 | 1 | 1.5 | 2 | | | |
| | RAFA+CBR+CL | T25 | 1 | 2 | 3 | 2 | 3 | 4 | 86 | 90.5 | 95 | 86 | 88 | 90 | 81 | 83 | 85 | 21 | 28 | 35 | 10 | 15 | 20 | 4 | 4.5 | 5 | | | |
| | RAFA+FP | T28 | 1 | 3 | 3 | 2 | 3 | 4 | 85 | 90 | 95 | 85 | 87.5 | 90 | 80 | 82.5 | 85 | 20 | 27.5 | 35 | 10 | 15 | 20 | 1 | 1 | 1 | | | |
| | RAFA+FP+CL | T29 | 1 | 3 | 3 | 2 | 3 | 4 | 86 | 90.5 | 95 | 86 | 88 | 90 | 81 | 83 | 85 | 21 | 28 | 35 | 10 | 15 | 20 | 4 | 4.5 | 5 | | | |

Nota: TS = Tanque Séptico; TI = Tanque de Imhoff; RAD: Reactor Anaerobio con Deflectores; RAFA= Reactor Anaerobio de flujo ascendente; FP= Filtro Percolador; CBR= Contactor Biológico Rotativo; FA= Filtro Anaerobio; LF= Laguna Facultativa; AE = Aireación Extendida; HA FSSH= Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Horizontal; HA FSSV= Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Vertical; LM= Laguna de Maduración; CL= Cloración

Tabla 24

Matriz inicial para la selección de un sistema descentralizado en el asentamiento Los Santos Bajo, alternativas caracterizadas respecto al criterio económico

| Alternativa | | Económico | | | | | |
|---------------|-----|-----------------------------|--------|--------|---|--------|--------|
| | | Inversión inicial (USD/hab) | | | Costos de operación y mantenimiento (USD/hab-año) | | |
| | | Min | | | Min | | |
| | | min | med | max | min | med | max |
| | | 8.52% | 11.84% | 16.69% | 8.58% | 11.92% | 16.80% |
| TS/TI+FAFA | T5 | 105.63 | 140.84 | 176.05 | 8.80 | 11.44 | 14.08 |
| TS/TI+FAFA+CL | T8 | 112.67 | 151.41 | 190.14 | 9.51 | 12.85 | 16.20 |
| TI+FP | T10 | 95.07 | 126.76 | 158.45 | 8.80 | 11.44 | 14.08 |
| TI+FP+CL | T11 | 102.11 | 137.32 | 172.53 | 9.51 | 12.85 | 16.20 |
| TI+CBR | T12 | 95.07 | 126.76 | 158.45 | 8.80 | 11.44 | 14.08 |
| TI+CBR+CL | T13 | 102.11 | 137.32 | 172.53 | 9.51 | 12.85 | 16.20 |
| RAFA+CBR | T24 | 95.07 | 126.76 | 158.45 | 10.56 | 13.20 | 15.84 |
| RAFA+CBR+CL | T25 | 102.11 | 137.32 | 172.53 | 11.27 | 14.61 | 17.96 |
| RAFA+FP | T28 | 95.07 | 126.76 | 158.45 | 10.56 | 13.20 | 15.84 |
| RAFA+FP+CL | T29 | 102.11 | 137.32 | 172.53 | 11.27 | 14.61 | 17.96 |

Nota: TS = Tanque Séptico; TI = Tanque de Imhoff; RAD: Reactor Anaerobio con Deflectores; RAFA= Reactor Anaerobio de flujo ascendente; FP= Filtro Percolador; CBR= Contactor Biológico Rotativo; FA= Filtro Anaerobio; LF= Laguna Facultativa; AE = Aireación Extendida; HA FSSH= Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Horizontal; HA FSSV= Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Vertical; LM= Laguna de Maduración; CL= Cloración

Tabla 25

Matriz inicial para la selección de un sistema descentralizado en el asentamiento Los Santos Bajo, alternativas caracterizadas respecto al criterio ambiental

| Alternativa | | Ambiental | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------|-----|---|--------|--------|-------|--------|--------|-------|-------|--------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---|-------|-------|--|--|--|--|--|--|-----------------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|
| | | Potencial Reúso de biosólidos (cualitativo) | | | | | | | | | Potencial de recuperación de biogás (cualitativo) | | | | | | | | | Potencial reúso de agua tratada (cualitativo) | | | | | | | | | índice de impacto ambiental | | | | | | | | |
| | | Max | | | Max | | | Max | | | Min | | | Min | | | Min | | | Min | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | min | med | max | min | med | max | min | med | max | min | med | max | min | med | max | min | med | max | min | med | max | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 7.18% | 11.62% | 18.34% | 6.08% | 10.02% | 16.19% | 5.20% | 8.43% | 13.81% | 1.00% | 1.65% | 2.75% | 1.00% | 1.65% | 2.75% | 1.00% | 1.65% | 2.75% | 1.00% | 1.65% | 2.75% | | | | | | | | | | | | | | | |
| TS/TI+FAFA | T5 | 2 | 3 | 4 | 1 | 1 | 2 | 1 | 2 | 3 | 3 | 4 | 5 | 1 | 2 | 3 | 3 | 4 | 5 | 3 | 4 | 5 | | | | | | | | | | | | | | | |
| TS/TI+FAFA+CL | T8 | 2 | 3 | 4 | 1 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 3 | 4 | 5 | 1 | 2 | 3 | 3 | 4 | 5 | 3 | 4 | 5 | | | | | | | | | | | | | | | |
| TI+FP | T10 | 2 | 3 | 4 | 1 | 1 | 2 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 3 | 4 | 5 | 1 | 2 | 3 | 2 | 3 | 4 | | | | | | | | | | | | | | | |
| TI+FP+CL | T11 | 2 | 3 | 4 | 1 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 1 | 2 | 3 | 3 | 4 | 5 | 1 | 2 | 3 | 2 | 3 | 4 | | | | | | | | | | | | | | | |
| TI+CBR | T12 | 2 | 3 | 4 | 1 | 1 | 2 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 3 | 4 | 5 | 1 | 2 | 3 | 2 | 3 | 4 | | | | | | | | | | | | | | | |
| TI+CBR+CL | T13 | 2 | 3 | 4 | 1 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 1 | 2 | 3 | 3 | 4 | 5 | 1 | 2 | 3 | 2 | 3 | 4 | | | | | | | | | | | | | | | |
| RAFA+CBR | T24 | 2 | 3 | 4 | 4 | 5 | 5 | 2 | 3 | 4 | 4 | 5 | 5 | 3 | 4 | 5 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | | | | | | | | | | | | | | | |
| RAFA+CBR+CL | T25 | 2 | 3 | 4 | 4 | 5 | 5 | 3 | 4 | 5 | 4 | 5 | 5 | 3 | 4 | 5 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | | | | | | | | | | | | | | | |
| RAFA+FP | T28 | 2 | 3 | 4 | 4 | 5 | 5 | 2 | 3 | 4 | 4 | 5 | 5 | 3 | 4 | 5 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | | | | | | | | | | | | | | | |
| RAFA+FP+CL | T29 | 2 | 3 | 4 | 4 | 5 | 5 | 3 | 4 | 5 | 4 | 5 | 5 | 3 | 4 | 5 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | | | | | | | | | | | | | | | |

Nota: TS = Tanque Séptico; TI = Tanque de Imhoff; RAD: Reactor Anaerobio con Deflectores; RAFA= Reactor Anaerobio de flujo ascendente; FP= Filtro Percolador; CBR= Contactor Biológico Rotativo; FA= Filtro Anaerobio; LF= Laguna Facultativa; AE = Aireación Extendida; HA FSSH= Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Horizontal; HA FSSV= Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Vertical; LM= Laguna de Maduración; CL= Cloración

4.3.5 Evaluación de compensaciones y selección

Finalmente, la matriz de decisión obtenida fue procesada utilizando el método Fuzzy-TOPSIS como se detalla en el Anexo 7, producto de este proceso se obtuvo el listado de tecnologías clasificadas según su coeficiente de proximidad que representa la distancia de cada alternativa respecto a la solución ideal. La clasificación final de alternativas es presentada en la

Tabla 26.

Tabla 26

Clasificación final de alternativas utilizando para el asentamiento Los Santos Bajo Fuzzy-TOPSIS

| Tren | Notación | CC | Clasificación |
|-------------|----------|--------|---------------|
| RAFA+FP+CL | T29 | 66.048 | 1 |
| RAFA+CBR+CL | T25 | 63.923 | 2 |
| AE+CL | T31 | 61.387 | 3 |
| RAFA+FP | T28 | 54.47 | 4 |
| RAFA+CBR | T24 | 52.851 | 5 |
| AE | T30 | 49.361 | 6 |
| TI+FP+CL | T11 | 49.135 | 7 |
| TI+CBR+CL | T13 | 46.02 | 8 |
| TS+FAFA+CL | T8 | 39.113 | 9 |
| TI+FP | T10 | 36.976 | 10 |
| TI+CBR | T12 | 34.343 | 11 |
| TS +FAFA | T5 | 23.112 | 12 |

Nota: TS = Tanque Séptico; TI = Tanque de Imhoff; RAFA= Reactor Anaerobio de flujo ascendente; FP= Filtro Percolador; CBR= Contactor Biológico Rotativo; FA= Filtro Anaerobio; AE = Aireación Extendida; CL= Cloración

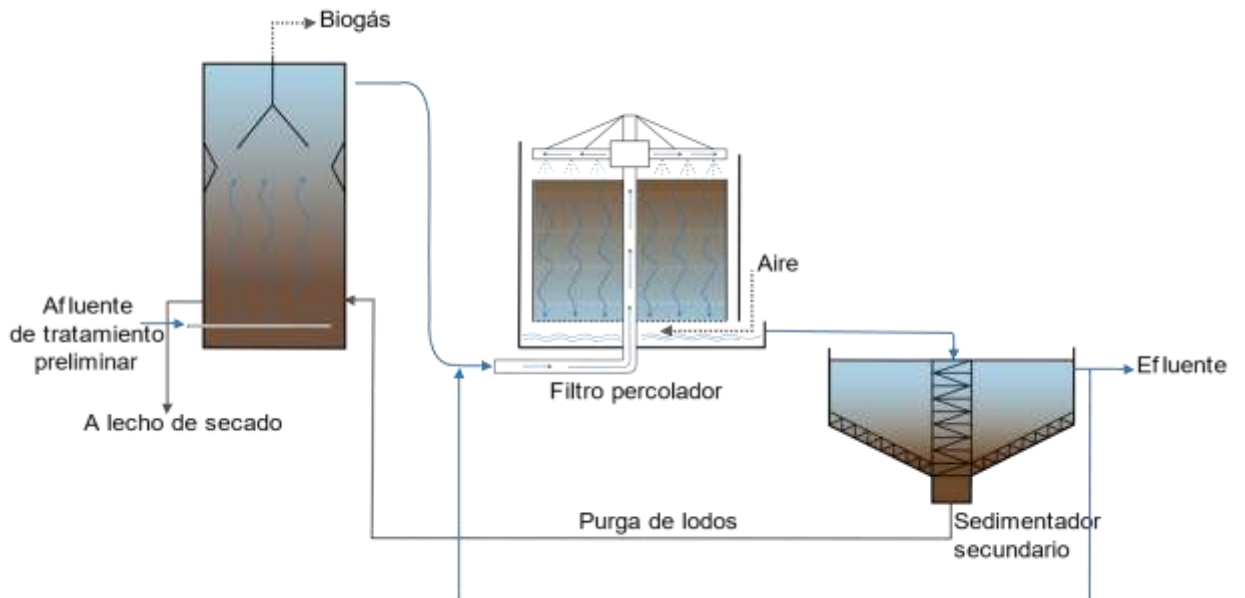
La clasificación previa destaca al T29 como la opción más cercana a la solución óptima. El esquema del tren priorizado es presentado en la Figura 8. El esquema del tren priorizado se muestra en la Figura 8, compuesto por un RAFA en el tratamiento primario, seguido de un filtro percolador en el tratamiento secundario. Se sugiere que este filtro sea de alta tasa para evitar la

generación de olores, fomentar la nitrificación del efluente y optimizar el proceso de cloración (CENTA, 2021). Como tratamiento terciario, se propone la cloración mediante hipoclorito de sodio y bombas dosificadoras, debido a su facilidad de dosificación y aplicación (CENTA, 2021). Es importante recalcar que a las tecnologías que componen este tren de tratamiento cuentan con una extendida aplicación a escala real en diferentes contextos de países tropicales en desarrollo (CENTA, 2021; MARN, 2016; Tilley et al., 2014; Von Sperling, 2007c).

Aunque el tren priorizado conlleva implicaciones negativas en términos de consumo energético, complejidad operativa y mantenimiento, estos factores podrían ser compensados por los beneficios derivados del potencial aprovechamiento de subproductos, como el biogás y el agua tratada, gracias a sus notables remociones.

Figura 8

Esquema para el tren de tratamiento descentralizado de aguas residuales priorizado para la comunidad de Los Santos Bajo



Fuente: Elaboración propia

En segunda posición se ubica el T25, que difiere del T29 al emplear CBR en lugar de FP. A pesar de similitudes en las implicaciones de implementación, su desventaja podría estar relacionada con la facilidad de operación y mantenimiento, junto con su elevado consumo energético.

Los trenes T28 y T24, comparten las mismas tecnologías primarias y secundarias que los T29 y T25, excluyendo la cloración como tecnología terciaria. A pesar de reducir el potencial de aprovechamiento de agua tratada, la utilización de biogás junto con altas remociones de materia orgánica y nutrientes hace que la herramienta considere competitiva su implementación.

En las posiciones subsiguientes se encuentran los trenes T11 y T13, conformados por FP y CBR para el tratamiento secundario, y cloración para la desinfección, utilizando TI como tecnología primaria. A pesar de que los TI tienen requisitos de área bajos y operación y mantenimiento menos complejos en comparación con el RAFA, su menor remoción de materia orgánica y sólidos suspendidos, junto con la imposibilidad de recolección de biogás, penalizan su evaluación.

El tren T8 presenta el Filtro Anaerobio como tecnología secundaria, complementada con cloración para el aprovechamiento de agua tratada. Aunque cuenta con un consumo energético reducido y menor complejidad operativa y de mantenimiento que los trenes T11 y T13, sus limitadas remociones de materia orgánica y nutrientes, junto con la imposibilidad de aprovechamiento de biogás y las altas emisiones de olores y gases de efecto invernadero debido a tecnologías exclusivamente anaerobias, lo hacen menos competitivo.

En las últimas tres posiciones se sitúan los trenes T10, T12 y T15, que comparten las mismas tecnologías primarias y secundarias, excluyendo las tecnologías de desinfección. Similar

a la situación de los trenes T29 y T25, la herramienta considera que los beneficios derivados de la simplificación técnica y la reducción de costos de operación y mantenimiento no compensan la disminución de coliformes fecales en el efluente y el potencial de aprovechamiento del agua tratada.

4.3.6 Análisis de la herramienta para la selección de trenes descentralizados para el tratamiento de aguas residuales propuesta

A continuación, se presentan lecciones aprendidas a partir de la aplicación de la herramienta para la selección de trenes para el TDAR en la comunidad de Los Santos Bajo, llevada a cabo con el propósito de verificar su validez. La herramienta se destaca por proporcionar una evaluación sistemática de alternativas para el TDAR, considerando la incertidumbre inherente a los asentamientos no planificados de países tropicales en desarrollo. Los principales insumos comprenden: (i) un formato para la caracterización del asentamiento, (ii) una biblioteca de alternativas caracterizadas de trenes aplicables a estos contextos y sus posibles, (iii) un listado de factores limitantes para la depuración de alternativas, (iv) una lista de criterios clave priorizados para la selección, y (v) una caracterización de los trenes planteados frente a los criterios clave de selección. Además, la herramienta proporciona hojas de cálculo que facilitan la realización del proceso sistemático de selección.

Inicialmente, en la fase de conocimiento del contexto, el formato de caracterización se revela como un insumo fundamental al proporcionar las pautas necesarias para una recopilación sistemática de información. Su estructura facilita la obtención de datos esenciales para un análisis detallado de la situación. Este formato demuestra su versatilidad al ser lo suficientemente genérico como para adaptarse a diferentes contextos y normativas de diversos países tropicales en desarrollo. Su capacidad de ajuste contribuye a su utilidad en una variedad de escenarios,

permitiendo la recopilación de información relevante y específica para cada contexto donde la herramienta es aplicada.

En el transcurso de la fase de recopilación de información para la aplicación de la herramienta en Los Santos Bajo, se encontraron limitaciones que impidieron la obtención completa de datos. A pesar de ello, se logró recopilar la información esencial necesaria para la toma de decisiones y el establecimiento de objetivos. Esta adaptación a la realidad específica del contexto demuestra la flexibilidad de la herramienta para operar efectivamente incluso en situaciones donde la recopilación integral de información puede presentar desafíos.

En la fase de definición de objetivos y metas se destaca que uno de los principales desafíos en la implementación de herramientas SDM reside en la traducción efectiva de problemas a objetivos (Spuhler et al., 2020). La herramienta propuesta aborda este desafío al incorporar un protocolo que facilita la traducción de los problemas identificados durante la fase de conocimiento del contexto hacia una serie de objetivos técnicos y ambientales, tales como el efluente requerido y las posibilidades de aprovechamiento, adaptándose así al contexto de aplicación.

La herramienta proporciona estándares para la formulación de proyectos, contribuyendo a establecer metas concisas, lo cual es esencial para una toma de decisiones efectiva (Haag et al., 2019; Marttunen et al., 2019). Sin embargo, es importante destacar que diversos actores podrían establecer metas adicionales. Esto se debe a que las metas no se definen únicamente en función de los problemas, sino también considerando los principios de los diferentes actores involucrados (Spuhler et al., 2020). Por ende, en futuras versiones de la herramienta, se sugiere buscar métodos para la integración de diversas perspectivas de los actores para establecer objetivos de manera coherente y concisa. Esta integración es crucial para la formulación de objetivos robustos que

permitan la definición de metas precisas en fases posteriores, contribuyendo así a una implementación más efectiva (Parkinson & Tayler, 2003; Spuhler et al., 2020).

En sincronía con lo presentado anteriormente, la aplicación de la herramienta en Los Santos Bajo ha permitido la identificación de múltiples factores sociales, normativos e institucionales que podrían representar obstáculos para el establecimiento de metas en la selección de tratamientos. Por ejemplo, la presencia de conflictos por el uso del suelo en el asentamiento implica que diversos actores, como la comunidad, las entidades encargadas de la planificación y los proveedores de servicios, mantienen diferentes visiones sobre el proyecto. Estos conflictos pueden añadir complejidad a la definición de metas, ya que cada actor involucrado puede tener perspectivas distintas en este aspecto. Como ejemplo adicional se encuentra la implementación de esquemas de aprovechamiento de subproductos. A pesar de que socialmente la comunidad muestra apertura hacia la adopción de esquemas de reúso de agua tratada, la normativa colombiana relacionada con este propósito aún se encuentra en una etapa temprana de desarrollo, lo que limita la utilización de este recurso para la irrigación.

En la fase de depuración de alternativas, uno de los principales desafíos de las herramientas es proporcionar un método de preselección que no influya en la toma de decisiones final (Siebert & Keeney, 2015). En este contexto, tanto el listado de factores limitantes como la biblioteca de trenes para el TDAR propuestos permiten la evaluación de alternativas adaptadas a cada contexto específico, con la posibilidad de ampliar la lista según las particularidades encontradas. Esto facilita la reflexión sobre la conveniencia sin realizar una priorización temprana de alternativas.

Asimismo, la biblioteca de trenes para el TDAR en asentamientos no planificados de países tropicales en desarrollo proporciona una lista de alternativas compuesta por diversas tecnologías. Inicialmente, se planteó considerando tecnologías consolidadas, dejando de lado

aquellas descartadas o en desarrollo con potencial de aplicación en estos contextos. No obstante, la herramienta cuenta con la flexibilidad necesaria para la inclusión y evaluación sistemática de estas alternativas si se considera pertinente.

La estimación de implicaciones se lleva a cabo en función de los criterios de selección establecidos durante la formulación de la herramienta. Los criterios elegidos para la toma de decisiones aseguran un análisis adecuado de las alternativas sin volverse excesivamente amplios, considerando que un número excesivo de criterios podría hacer que los resultados de la evaluación de alternativas sean indistinguibles (Chambers et al., 2022; Spuhler et al., 2020). El número de criterios de selección propuestos también confiere flexibilidad a la herramienta. Aunque la herramienta sugiere inicialmente coeficientes iniciales para la evaluación, su diseño permite la reevaluación durante la implementación, lo que facilita la participación de los actores involucrados. Esta característica contribuye a la adaptabilidad de la herramienta, permitiendo ajustes según las necesidades y perspectivas específicas del asentamiento de aplicación.

La utilización de métodos difusos en la herramienta permite un análisis más preciso de las posibles implicaciones, teniendo en cuenta las limitaciones de información en el contexto. Durante la ejecución de la herramienta en el asentamiento Los Santos Bajo, la caracterización de los insumos de trenes para el TDAR permitió una ejecución rápida de esta fase, logrando así obtener la matriz de decisión difusa para las fases posteriores de la herramienta. Sin embargo, es crucial destacar que la robustez de la herramienta podría mejorarse mediante estimaciones más exhaustivas de diferentes aspectos, como las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) a través del análisis de ciclo de vida o las implicaciones económicas mediante modelos financieros de esquemas de pago y reúso.

La evaluación a nivel de sistema de las diversas alternativas para el TDAR permitió discernir las distintas interacciones entre factores económicos, ambientales y esquemas de reúso. Se observó cómo la implementación de sistemas técnicamente más complejos puede recibir calificaciones superiores debido a los beneficios potenciales del reúso. Asimismo, la aplicación de lógica difusa permitió abordar de manera más efectiva la incertidumbre presente en estos contextos, originada por la falta de información y la variabilidad inherente. De esta manera, se pudo determinar que, al concluir la aplicación de la herramienta propuesta en el saneamiento Los Santos Bajo para su validación, el tren para el TDAR con mayor potencial de aplicabilidad en el asentamiento Los Santos Bajo consta de un filtro Percolador.

Es imperativo destacar que los procesos de planificación y toma de decisiones a menudo no son tan racionales y estructurados como se presenta en la literatura, sino que son procesos políticos y dependientes de actores locales (Spuhler et al., 2020). Esto constituye una barrera significativa para la toma de decisiones estructuradas en el contexto del planeamiento estructurado (Kennedy-Walker et al., 2013; Spuhler et al., 2020). Sin embargo, herramientas como la propuesta en este estudio aportan de manera significativa al establecimiento de visiones comunes para la selección de tecnologías en asentamientos no planificados de países tropicales en desarrollo. Esto contribuye a la creación de una cultura de planificación en asentamientos no planificados (Tayler & Parkinson, 2005).

Finalmente, a pesar de que el tren 29 haya sido el escogido por la aplicación del método multicriterio, es importante que el proceso de selección final podría ser complementada a través de la aplicación de un panel con la comunidad para la discusión y selección final. El panel propuesto podría incluir la socialización de las tres alternativas con mejor puntaje de acuerdo con la herramienta previamente aplicada y sus potenciales indicaciones. Este proceso podría llevar no

solo al tren tecnológico con mejor desempeño técnico, económico y ambiental, si no también, al tren con mayor aceptabilidad social. A pesar, de los beneficios obtenidos por este proceso, su aplicación no fue posible en el marco de la ejecución de este proyecto. Se recomienda que para futuras aplicaciones de la herramienta propuesta se incluya este proceso con el fin de realizar una validación más exhaustiva de la herramienta. En esta línea, se recomienda incorporar en la herramienta módulos que consideren aspectos como el ACV, análisis costo-beneficio y la documentación detallada de experiencias de implementación de las tecnologías escogidas con el fin de precisar valores cuantitativos asociados a cada criterio considerado.

CONCLUSIONES

La herramienta propuesta sobresale al proporcionar una evaluación sistemática de alternativas para el Tratamiento Descentralizado de Aguas Residuales (TDAR), considerando aspectos técnicos y económicos para el proceso de selección que posteriormente podría ser complementado a través de actividades participativas con comunidades de asentamientos no planificados.

- En concordancia con el primer objetivo específico, a partir de la revisión del estado del arte, se caracterizaron 31 trenes tecnológicos provenientes de 12 tecnologías aplicables para el TDAR en asentamientos no planificados de países tropicales en desarrollo. El planteamiento de trenes se realizó a partir directrices planteadas en la literatura como sinergias entre tecnologías intensivas y extensivas, simplicidad de operación y mantenimiento y costos de operación. De igual manera, 23 de los trenes planteados fueron caracterizados en relación con su potencial para la implementación de esquemas de

economía circular y fueron determinados los posibles subproductos aprovechables generados

- Respecto al segundo objetivo, la herramienta de selección de trenes para el tratamiento descentralizado de aguas residuales consideró el enfoque de toma de decisiones estructurado, debido a que permite su reproducibilidad, y la aplicación de análisis difuso para el manejo de incertidumbre en este proceso. La herramienta consideró 9 criterios clave en aspectos técnicos, económicos y ambientales. Mientras que, se propone abordar problemas sociales desde una perspectiva participativa. La aplicación del método multicriterio Fuzzy-AHP permitió determinar la importancia relativa del criterio técnico, ambiental y económico con pesos ponderados de 39.53%, 36.67% y 23.80% respectivamente. De igual manera, los subcriterios con mayor importancia relativa fueron la facilidad de operación y mantenimiento y la remoción de carga contaminante con pesos ponderado de 14.97% y 14.40%. Finalmente, es importante recalcar que no se presentaron criterios dictadores, debido a que no hubo grandes diferencias entre los valores de importancia relativa de los criterios y subcriterios priorizados.
- Respecto al tercer objetivo, la aplicación de la herramienta en el asentamiento Los Santos Bajo permitió identificar el tren de tratamiento con mayor potencial de aplicación, siendo este un tren conformado por un Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente seguido de un Filtro Percolador y Cloración. Además, fruto del proceso de aplicación, se observó que la implementación de sistemas técnicamente más complejos podría recibir calificaciones superiores debido a los beneficios potenciales del reúso. Se identificó que la herramienta es de fácil aplicación y permite la sistematización del proceso de toma de decisiones. Sin embargo, a pesar de que la herramienta permite abordar la incertidumbre asociada a la falta

de información, se identificó como desventaja la limitada definición de criterios para la evaluación como impacto ambiental, costos de operación y mantenimiento e inversión inicial. Esto debido a que para este caso fue utilizada únicamente información secundaria para la definición de estos aspectos mencionados anteriormente.

La herramienta propuesta permite abordar el problema de la selección de tecnologías para asentamientos no planificados desde una perspectiva más holística, tratando las incertidumbres asociadas a la falta de información en estos contextos. Para los profesionales responsables de garantizar el acceso a servicios de saneamiento, ofrece un listado inicial de alternativas para el tratamiento descentralizado de aguas residuales en asentamientos no planificados en países en desarrollo, considerando las particularidades del contexto.

Asimismo, se alinea con los nuevos paradigmas presentando soluciones basadas en esquemas de economía circular, identificando retos como la estimación de implicaciones ambientales y evidenciando la necesidad de marcos regulatorios flexibles que permitan dar soluciones de saneamiento en estos contextos. Para los consultores, la herramienta proporciona un protocolo de selección con diversos insumos que facilitan una toma de decisiones más sistemática. Además, las deficiencias encontradas en la primera aplicación de la herramienta revelan a los investigadores vacíos como la estimación de implicaciones de la implementación de sistemas de tratamiento descentralizado de aguas residuales (TDAR) y esquemas de economía circular en los asentamientos no planificados.

Finalmente, esta investigación contribuye significativamente al establecimiento de visiones comunes para la selección de tecnologías en asentamientos no planificados de países tropicales en desarrollo, permitiendo involucrar a las comunidades en el proceso de selección de soluciones y así seleccionar tecnologías adaptables a estos contextos.

LIMITACIONES Y TRABAJO FUTURO

Como limitaciones principales de la investigación se tiene que:

- El desarrollo del proyecto se hizo bajo el supuesto de que el sistema de alcantarillado de la comunidad los Santos bajo es adecuado para la recolección de aguas residuales generadas por la comunidad.

De igual manera, como potenciales trabajos futuros se encuentran:

- La implementación de la herramienta propuesta en otros asentamientos no planificados de países tropicales en desarrollo con el fin de realizar una validación más robusta de la misma
- Utilización de herramientas para un análisis exhaustivo de las diferentes implicaciones de los trenes de tratamiento para el TDAR evaluados. Este análisis exhaustivo incluye la aplicación de herramientas como el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) y análisis de costo-beneficio.

REFERENCIAS

Abd El-Azeem, S. A. M. (2023). *Cost-efficient wastewater treatment technologies: Engineered systems* (M. Nasr & A. Negm, Eds.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-12902-5>

AECID. (2022). *RECOMENDACIONES PARA PROYECTOS DE SANEAMIENTO Y TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES*. Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo.

Alcaldía de Bucaramanga. (2020). *Plan De Desarrollo Bucaramanga (2020-2023)*.

Alderson, M. P., dos Santos, A. B., & Mota Filho, C. R. (2015). Reliability analysis of low-cost, full-scale domestic wastewater treatment plants for reuse in aquaculture and agriculture. *Ecological Engineering*, 82, 6–14. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.04.081>

Almuktar, S. A. A. N., Abed, S. N., & Scholz, M. (2018). Wetlands for wastewater treatment and subsequent recycling of treated effluent: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(24), 23595–23623. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2629-3>

Al-Sa'ed, R., & Tomaleh, N. (2012). Performance Evaluation of a Full-Scale Extended Aeration System in Al-Bireh City, Palestine. *CLEAN – Soil, Air, Water*, 40(11), 1250–1256. <https://doi.org/10.1002/clen.201000095>

Amaral, S. R., Dos Santos, L. V., Lima, L. M., Vich, D. V., & Queiroz, L. M. (2019). A modified upflow anaerobic sludge blanket reactor as an alternative for decentralized domestic wastewater treatment in developing countries. *Water Practice and Technology*, 14(2), 249–258. Scopus. <https://doi.org/10.2166/wpt.2019.009>

Anaokar, G. S., Khambete, A. K., & Christian, R. A. (2018a). EVALUATION OF A PERFORMANCE INDEX FOR MUNICIPAL WASTEWATER TREATMENT PLANTS USING MCDM - TOPSIS. *INTERNATIONAL JOURNAL OF TECHNOLOGY*, 9(4), 715–726. <https://doi.org/10.14716/ijtech.v9i4.102>

Anaokar, G. S., Khambete, A. K., & Christian, R. A. (2018b). EVALUATION OF A PERFORMANCE INDEX FOR MUNICIPAL WASTEWATER TREATMENT PLANTS USING MCDM - TOPSIS. *INTERNATIONAL JOURNAL OF TECHNOLOGY*, 9(4), Article 4. <https://doi.org/10.14716/ijtech.v9i4.102>

Andreadakis, A., Mamais, D., Christoulas, D., & Kabylafka, S. (1999). Ultraviolet disinfection of secondary and tertiary effluent in the Mediterranean region. *Water Science and Technology*, 40(4), 253–260. [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(99\)00506-5](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(99)00506-5)

Andreoli, C. V., Von Sperling, M., & Fernandes, F. (2007). *Sludge treatment and disposal*. IWA publ.

Arroyo, P., & Molinos-Senante, M. (2018a). Selecting appropriate wastewater treatment technologies using a choosing-by-advantages approach. *Science of the Total Environment*, 625, 819–827. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.331>

Arroyo, P., & Molinos-Senante, M. (2018b). Selecting appropriate wastewater treatment technologies using a choosing-by-advantages approach. *Science of the Total Environment*, 625, 819–827. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.331>

Avramenko, Y., Kamami, M., & Kraslawski, A. (2010a). Fuzzy performance indicators for decision making in selection of wastewater treatment methods. *Computer Aided Chemical Engineering*, 28(C), 127–132. [https://doi.org/10.1016/S1570-7946\(10\)28022-7](https://doi.org/10.1016/S1570-7946(10)28022-7)

Avramenko, Y., Kamami, M., & Kraslawski, A. (2010b). Fuzzy performance indicators for decision making in selection of wastewater treatment methods. *Computer Aided Chemical Engineering*, 28(C), Article C. [https://doi.org/10.1016/S1570-7946\(10\)28022-7](https://doi.org/10.1016/S1570-7946(10)28022-7)

Bajpai, M., Katoch, S. S., & Chaturvedi, N. K. (2019). Comparative study on decentralized treatment technologies for sewage and graywater reuse – A review. *Water Science and Technology*, 80(11), 2091–2106. <https://doi.org/10.2166/wst.2020.039>

Beavis, P., & Lundie, S. (2003). Integrated environmental assessment of tertiary and residuals treatment—LCA in the wastewater industry. *WATER SCIENCE AND TECHNOLOGY*, 47(7–8), 109–116. <https://doi.org/10.2166/wst.2003.0678>

Bernal, D., Restrepo, I., & Grueso-Casquete, S. (2021). Key criteria for considering decentralization in municipal wastewater management. *Heliyon*, 7(3), e06375. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06375>

Boleydei, H., Lemay, M.-J., Gagné, M.-J., Brassard, J., & Vaneeckhaute, C. (2024). Are lagoons efficient for summer wastewater treatment in northern decentralized communities to ensure environmental and human health? *Journal of Water Process Engineering*, 60, 105123. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105123>

Bottero, M., Comino, E., & Riggio, V. (2011). Application of the Analytic Hierarchy Process and the Analytic Network Process for the assessment of different wastewater treatment systems. *Environmental Modelling & Software*, 26(10), 1211–1224. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.04.002>

Brault, J.-M., Buchauer, K., & Martin, G. (2022). *Wastewater Treatment and Reuse: A Guide to Help Small Towns Select Appropriate Options*. International Bank for Reconstruction and Development / The World Bank.

Bressani-Ribeiro, T., Almeida, P. G. S., Volcke, E. I. P., & Chernicharo, C. A. L. (2018). Trickling filters following anaerobic sewage treatment: State of the art and perspectives. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 4(11), 1721–1738. <https://doi.org/10.1039/C8EW00330K>

Brix, H. (1994). Constructed wetlands for municipal wastewater treatment in Europe. *Global Wetlands; Old World and New*. Elsevier, Amsterdam, 325–334.

Brix, H., & Johansen, N. H. (2004). *Retningslinier for etablering af beplantede filteranlæg op til 30 PE*. Økologisk Byfornyelse og Spildevandsrensning. Miljøstyrelsen (in Danish) 52, 1-48.

Brix, H., Koottatep, T., Fryd, O., & Laugesen, C. H. (2010). Appropriate and sustainable wastewater management in developing countries by the use of constructed wetlands. *Proceedings of the 3rd IASTED African Conference on Water Resource Management, AfricaWRM 2010*, 175–180. <https://doi.org/10.2316/p.2010.686-075>

Brunner, N., Starkl, M., Kazmi, A. A., Real, A., Jain, N., & Mishra, V. (2018). Affordability of decentralized wastewater systems: A case study in integrated planning from INDIA. *Water (Switzerland)*, 10(11). <https://doi.org/10.3390/w10111644>

Buckley, J. J. (1985). Fuzzy hierarchical analysis. *Fuzzy Sets and Systems*, 17(3), 233–247. [https://doi.org/10.1016/0165-0114\(85\)90090-9](https://doi.org/10.1016/0165-0114(85)90090-9)

Bulc, T. G. (2006). Long term performance of a constructed wetland for landfill leachate treatment. *Ecological Engineering*, 26(4), 365–374. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2006.01.003>

Buttenheim, A. M. (2008). The sanitation environment in urban slums: Implications for child health. *Population and Environment*, 30(1–2), 26–47. <https://doi.org/10.1007/s11111-008-0074-9>

Butterworth, E., Richards, A., Jones, M., Dotro, G., & Jefferson, B. (2016). Assessing the potential for tertiary nitrification in sub-surface flow constructed wetlands. *Environmental Technology Reviews*, 5(1), 68–77. <https://doi.org/10.1080/21622515.2016.1188998>

Çalik, N. Y. P., Turan Paksoy, Ahmet. (2017). Comparison of Methods in FAHP with Application in Supplier Selection. In *Fuzzy Analytic Hierarchy Process*. Chapman and Hall/CRC.

Capodaglio, A. G. (2017). Integrated, decentralized wastewater management for resource recovery in rural and peri-urban areas. *Resources*, 6(2). <https://doi.org/10.3390/resources6020022>

Capodaglio, A. G., Callegari, A., Ceconet, D., & Molognoni, D. (2017). Sustainability of decentralized wastewater treatment technologies. *Water Practice and Technology*, 12(2), Article 2. <https://doi.org/10.2166/wpt.2017.055>

Cashman, S., Ma, X., Mosley, J., Garland, J., Crone, B., & Xue, X. (2018). Energy and greenhouse gas life cycle assessment and cost analysis of aerobic and anaerobic membrane bioreactor systems: Influence of scale, population density, climate, and methane recovery. *Bioresource Technology*, 254, 56–66. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.01.060>

Castañer, C. M., Bellver-Domingo, Á., & Hernández-Sancho, F. (2020). Environmental and Economic Approach to Assess a Horizontal Sub-Surface Flow Wetland in Developing Area.

Water Resources Management, 34(12), 3761–3778. Scopus. <https://doi.org/10.1007/s11269-020-02629-x>

Castellar, J. A. C., Torrens, A., Buttiglieri, G., Monclús, H., Arias, C. A., Carvalho, P. N., Galvao, A., & Comas, J. (2022). Nature-based solutions coupled with advanced technologies: An opportunity for decentralized water reuse in cities. *Journal of Cleaner Production*, 340. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130660>

Castillo, A., Cheali, P., Gómez, V., Comas, J., Poch, M., & Sin, G. (2016a). An integrated knowledge-based and optimization tool for the sustainable selection of wastewater treatment process concepts. *Environmental Modelling and Software*, 84, 177–192. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.06.019>

Castillo, A., Cheali, P., Gómez, V., Comas, J., Poch, M., & Sin, G. (2016b). An integrated knowledge-based and optimization tool for the sustainable selection of wastewater treatment process concepts. *Environmental Modelling and Software*, 84, 177–192. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.06.019>

CDMB. (2019). *Actualización Plan De Ordenación Y Manejo De La Cuenca Hidrográfica Río Alto Lebrija*. Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga.

Ceconet, D., Callegari, A., & Capodaglio, A. G. (2022). UASB Performance and Perspectives in Urban Wastewater Treatment at Sub-Mesophilic Operating Temperature. *Water*, 14(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/w14010115>

CENTA. (2021). *Guía técnica para la selección y diseño de líneas de tratamiento de aguas residuales*. Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua.

CEPAL. (2018). *Segundo informe anual sobre el progreso y los desafíos regionales de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible en América Latina y el Caribe*.

Chambers, K. G., Sheridan, P. M., & Cook, S. M. (2022). Sanitation criteria: A comprehensive review of existing sustainability and resilience evaluation criteria for sanitation systems. *Environmental Science and Technology Letters*, 9(7), 583–591. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.2c00267>

Chen, C.-T. (2000). Extensions of the TOPSIS for group decision-making under fuzzy environment. *Fuzzy Sets and Systems*, 114(1), 1–9. [https://doi.org/10.1016/S0165-0114\(97\)00377-1](https://doi.org/10.1016/S0165-0114(97)00377-1)

Cheng, F., Wang, C., Wen, C., Wang, S., Cheng, H., Shen, S., & Lu, X. (2022). Full-scale application and performance of a low-consuming system for decentralized village domestic wastewater treatment. *Journal of Water Process Engineering*, 46, 102594. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102594>

Cheng, H., Lin, H., Wei, W., Xu, S.-S., & Xu, Y.-N. (2011). Application research of anoxic-aerobic biofilter on removing xanthate from beneficiation wastewater. *2011 International Conference on Electronics, Communications and Control, ICECC 2011 - Proceedings*, 3575–3577. <https://doi.org/10.1109/ICECC.2011.6068043>

Chernicharo, C. a. L., & Almeida, P. G. S. (2011). Feasibility of UASB/trickling filter systems without final clarifiers for the treatment of domestic wastewater in small communities in Brazil. *Water Science and Technology: A Journal of the International Association on Water Pollution Research*, 64(6), 1347–1354. <https://doi.org/10.2166/wst.2011.389>

Chernicharo, C. A. L., van Lier, J. B., Noyola, A., & Bressani Ribeiro, T. (2015). Anaerobic sewage treatment: State of the art, constraints and challenges. *REVIEWS IN ENVIRONMENTAL SCIENCE AND BIO-TECHNOLOGY*, 14(4, SI), 649–679. <https://doi.org/10.1007/s11157-015-9377-3>

Chua, H., Hu, W. F., Yu, P. H. F., & Cheung, M. W. L. (1997). Responses of an anaerobic fixed-film reactor to hydraulic shock loadings. *Bioresource Technology*, 61(1), 79–83. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(97\)84702-5](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(97)84702-5)

Collivignarelli, M. C., Abbà, A., Miino, M. C., Caccamo, F. M., Torretta, V., Rada, E. C., & Sorlini, S. (2020). Disinfection of Wastewater by UV-Based Treatment for Reuse in a Circular Economy Perspective. Where Are We at? *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(1), 77. <https://doi.org/10.3390/ijerph18010077>

Colmenarejo, M. F., Rubio, A., Sánchez, E., Vicente, J., García, M. G., & Borja, R. (2006). Evaluation of municipal wastewater treatment plants with different technologies at Las Rozas, Madrid (Spain). *Journal of Environmental Management*, 81(4), 399–404. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2005.11.007>

Conroy, M. J., & Peterson, J. T. (2013). *Decision making in natural resource management: A structured, adaptive approach*. Wiley.

Cossio, C., McConville, J., Rauch, S., Wilén, B.-M., Dalahmeh, S., Mercado, A., & Romero, A. M. (2018). Wastewater management in small towns—understanding the failure of small treatment plants in Bolivia. *Environmental Technology (United Kingdom)*, 39(11), 1393–1403. <https://doi.org/10.1080/09593330.2017.1330364>

Crini, G., & Lichtfouse, E. (2019). Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment. *Environmental Chemistry Letters*, *17*(1), 145–155. <https://doi.org/10.1007/s10311-018-0785-9>

da Costa, J. F., de Paoli, A. C., Seidl, M., & von Sperling, M. (2013). Performance and behaviour of planted and unplanted units of a horizontal subsurface flow constructed wetland system treating municipal effluent from a UASB reactor. *Water Science and Technology*, *68*(7), 1495–1502. <https://doi.org/10.2166/wst.2013.391>

Danshita, T., Yoochatchaval, W., Takemura, Y., Miyaoka, Y., Kada, M., Tepjun, W., Thonglee, S., Sonaka, H., Yamaguchi, T., Tomioka, N., Banjongproo, P., Okadera, T., Ebie, Y., & Syutsubo, K. (2020). Performance evaluation of a down-flow hanging sponge (DHS) reactor as a decentralized domestic wastewater treatment system in tropical regions. *Journal of Environmental Science and Health - Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, *55*(7), 847–857. <https://doi.org/10.1080/10934529.2020.1748472>

Datta, A., Singh, H. O., Raja, S. K., & Dixit, S. (2021). Constructed wetland for improved wastewater management and increased water use efficiency in resource scarce SAT villages: A case study from Kothapally village, in India. *International Journal of Phytoremediation*, *23*(10), 1067–1076. Scopus. <https://doi.org/10.1080/15226514.2021.1876627>

De, I., Hasan, R., & Iqbal, M. (2022). Natural Treatment Systems and Importance of Social Cost Benefit Analysis in Developing Countries: A Critical Review. *SUSTAINABILITY*, *14*(7). <https://doi.org/10.3390/su14073913>

de Oliveira Cruz, L. M., Gomes, B. G. L. A., Tonetti, A. L., & Figueiredo, I. C. S. (2019). Using coconut husks in a full-scale decentralized wastewater treatment system: The influence of

an anaerobic filter on maintenance and operational conditions of a sand filter. *Ecological Engineering*, 127, 454–459. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.12.021>

de Oliveira Cruz, L. M., Stefanutti, R., Coraucci Filho, B., & Tonetti, A. L. (2013). Coconut shells as filling material for anaerobic filters. *SPRINGERPLUS*, 2. <https://doi.org/10.1186/2193-1801-2-655>

Decezaró, S. T., Wolff, D. B., Araújo, R. K., Faccenda, H. B., Perondi, T., & Sezerino, P. H. (2018). Vertical flow constructed wetland planted with *Heliconia psittacorum* used as decentralized post-treatment of anaerobic effluent in Southern Brazil. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 53(13), 1131–1138. <https://doi.org/10.1080/10934529.2018.1530106>

del Castillo, A., Garibay, M., Senes-Guerrero, C., Orozco-Nunnelly, D., de Anda, J., & Gradilla-Hernandez, M. (2022). A review of the sustainability of anaerobic reactors combined with constructed wetlands for decentralized wastewater treatment. *JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION*, 371. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133428>

Dewalkar, S. V., & Shastri, S. S. (2022). Integrated Life Cycle Assessment and Life Cycle Cost Assessment based fuzzy multi-criteria decision-making approach for selection of appropriate wastewater treatment system. *Journal of Water Process Engineering*, 45. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102476>

Diana, M., Felipe-Sotelo, M., & Bond, T. (2019). Disinfection byproducts potentially responsible for the association between chlorinated drinking water and bladder cancer: A review. *Water Research*, 162, 492–504. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.07.014>

Dias, D. F. C., Possmoser-Nascimento, T. E., Rodrigues, V. A. J., & von Sperling, M. (2014). Overall performance evaluation of shallow maturation ponds in series treating UASB

reactor effluent: Ten years of intensive monitoring of a system in Brazil. *Ecological Engineering*, 71, 206–214. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.07.044>

DNP. (2018). *Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022*. <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Prensa/Resumen-PND2018-2022-final.pdf>

Dotro, G., Langergraber, G., Molle, P., Nivala, J., Puigagut, J., & Stein, O. (2017). *Biological Wastewater Treatment Series, Volume 7: Treatment Wetlands*.

D'Silva, T. C., Ahmad, M., Nazim, M., Mirza, M. W., Arafat, T., Ashraf, M. A., Hasan, M. N., Gaur, R. Z., Tyagi, V. K., Mutiyar, P. K., Lew, R. G., Lew, B., & Khan, A. A. (2021a). Performance and sustainability assessment of full-scale sewage treatment plants in northern india using multiple-criteria decision-making methods. *JOURNAL OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING*, 147(12). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0001941](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001941)

D'Silva, T. C., Ahmad, M., Nazim, M., Mirza, M. W., Arafat, T., Ashraf, M. A., Hasan, M. N., Gaur, R. Z., Tyagi, V. K., Mutiyar, P. K., Lew, R. G., Lew, B., & Khan, A. A. (2021b). Performance and sustainability assessment of full-scale sewage treatment plants in northern india using multiple-criteria decision-making methods. *JOURNAL OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING*, 147(12), Article 12. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0001941](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001941)

DWA-A 262. (2017). *Principles for Dimensioning, Construction and Operation of Wastewater Treatment Plants with Planted and Unplanted Filters for Treatment of Domestic and Municipal Wastewater*.

Emrouznejad, A., & Ho, W. (Eds.). (2017). *Fuzzy analytic hierarchy process*. CRC Press.

EPA, U. S. E. P. A. (2012a). *2012 Guidelines for Water Reuse*.

EPA, U. S. E. P. A. (2012b). *2012 Guidelines for Water Reuse*.

Ergaieg, K., & Ben Miled, T. (2021). Full-scale hybrid constructed wetlands monitoring for decentralized tertiary treatment of municipal wastewater. *Arabian Journal of Geosciences*, *14*(14). <https://doi.org/10.1007/s12517-021-07776-y>

Ergaieg, K., Msaddek, M. H., Kallel, A., & Trabelsi, I. (2021). Monitoring of horizontal subsurface flow constructed wetlands for tertiary treatment of municipal wastewater. *Arabian Journal of Geosciences*, *14*(19), 2045. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-08419-y>

Eseoglu, G., Yapsakli, K., Tozan, H., & Vayvay, O. (2022). A novel fuzzy framework for technology selection of sustainable wastewater treatment plants based on TODIM methodology in developing urban areas. *Scientific Reports*, *12*(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-12643-1>

European Parliament and of The Council. (2020). *REGULATION (EU) 2020/741 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL*.

Ezemagu, I. G., Ejimofor, M. I., Menkiti, M. C., & Diyoke, C. (2021). Biofertilizer production via composting of digestate obtained from anaerobic digestion of post biocoagulation sludge blended with saw dust: Physiochemical characterization and kinetic study. *Environmental Challenges*, *5*, 100288. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100288>

Fadanelli, Lis Eveline Athaydes, A. F., Alceu Gomes de, Wiecheteck, Giovana Kátie, Döll, Maria Magdalena Ribas. (2019). Considerations on design and implementation parameters of domestic wastewater treatment by subsurface flow constructed wetlands. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, *24*, 809–819. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522019102334>

FAO, F. A. A. O. O. T. U. N. (1992a). *Wastewater treatment and use in agriculture*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

FAO, F. A. A. O. O. T. U. N. (1992b). *Wastewater treatment and use in agriculture*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Fernandes, H., Jungles, M. K., Hoffmann, H., Antonio, R. V., & Costa, R. H. R. (2013). Full-scale sequencing batch reactor (SBR) for domestic wastewater: Performance and diversity of microbial communities. *Bioresource Technology*, *132*, 262–268. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.01.027>

Ferreira, M. M., Fiore, F. A., Saron, A., & da Silva, G. H. R. (2021). Systematic review of the last 20 years of research on decentralized domestic wastewater treatment in Brazil: State of the art and potentials. *Water Science and Technology*, *84*(12), 3469–3488. <https://doi.org/10.2166/wst.2021.487>

Gajewska, M., & Skrzypiec, K. (2018). Kinetics of nitrogen removal processes in constructed wetlands. *E3S Web of Conferences*, *26*, 00001. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20182600001>

Gallego-Schmid, A., & Tarpani, R. R. Z. (2019). Life cycle assessment of wastewater treatment in developing countries: A review. *Water Research*, *153*, 63–79. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.01.010>

Galvão, A., Matos, J., Rodrigues, J., & Heath, P. (2005a). Sustainable sewage solutions for small agglomerations. *Water Science and Technology*, *52*(12), 25–32. <https://doi.org/10.2166/wst.2005.0420>

Galvão, A., Matos, J., Rodrigues, J., & Heath, P. (2005b). Sustainable sewage solutions for small agglomerations. *Water Science and Technology*, 52(12), Article 12. <https://doi.org/10.2166/wst.2005.0420>

Garcia, D., Munoz Melendez, G., Arteaga, A., Ojeda-Revah, L., & Mladenov, N. (2022). Greening Urban Areas with Decentralized Wastewater Treatment and Reuse: A Case Study of Ecoparque in Tijuana, Mexico. *WATER*, 14(4). <https://doi.org/10.3390/w14040596>

García, J., Mujeriego, R., Bourrouet, A., Peñuelas, G., & Freixes, A. (2000). Wastewater treatment by pond systems: Experiences in Catalonia, Spain. *Water Science and Technology*, 42(10–11), 35–42. <https://doi.org/10.2166/wst.2000.0603>

Geetha Varma, V., Jha, S., Himesh Karthik Raju, L., Lalith Kishore, R., & Ranjith, V. (2022). A review on decentralized wastewater treatment systems in India. *Chemosphere*, 300, 134462. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134462>

Geneletti, D. (2019). *Multicriteria analysis for environmental decision making*. Anthem Press.

Ghazy, M. M. E.-D., El-Senousy, W. M., Abdel-Aatt, Azza. M., & Kamel, M. (2008). Performance Evaluation of a Waste Stabilization Pond in a Rural Area in Egypt. *American Journal of Environmental Sciences*, 4(4), 316–325. <https://doi.org/10.3844/ajessp.2008.316.325>

Gherghel, A., Teodosiu, C., & De Gisi, S. (2019). A review on wastewater sludge valorisation and its challenges in the context of circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 228, 244–263. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.240>

Goffi, A. S., Trojan, F., de Lima, J. D., Lizot, M., & Thesari, S. S. (2018). Economic feasibility for selecting wastewater treatment systems. *Water Science and Technology*, 78(12), 2518–2531. <https://doi.org/10.2166/wst.2019.012>

Gregory, R. (Ed.). (2012). *Structured decision making: A practical guide to environmental management choices*. Wiley-Blackwell.

Haag, F., Zürcher, S., & Lienert, J. (2019). Enhancing the elicitation of diverse decision objectives for public planning. *European Journal of Operational Research*, 279(3), 912–928. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.06.002>

Hafeez, A., Shamair, Z., Shezad, N., Javed, F., Fazal, T., Rehman, S. U., Bazmi, A. A., & Rehman, F. (2021). Solar powered decentralized water systems: A cleaner solution of the industrial wastewater treatment and clean drinking water supply challenges. *Journal of Cleaner Production*, 289. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125717>

Hajkowitz, S., & Collins, K. (2007). A Review of Multiple Criteria Analysis for Water Resource Planning and Management. *Water Resources Management*, 21(9), 1553–1566. <https://doi.org/10.1007/s11269-006-9112-5>

Hušek, M., Moško, J., & Pohořelý, M. (2022). Sewage sludge treatment methods and P-recovery possibilities: Current state-of-the-art. *Journal of Environmental Management*, 315, 115090. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115090>

Hwang, C.-L., & Yoon, K. (1981). *Multiple Attribute Decision Making* (Vol. 186). Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9>

I. Abdel-Shafy, H., & A. El-Khateeb, M. (2013). Integration of septic tank and constructed wetland for the treatment of wastewater in Egypt. *Desalination and Water Treatment*, 51(16–18), 3539–3546. <https://doi.org/10.1080/19443994.2012.749585>

Igos, E., Benetto, E., Venditti, S., Kohler, C., Cornelissen, A., Moeller, R., & Biwer, A. (2012). Is it better to remove pharmaceuticals in decentralized or conventional wastewater treatment plants? A life cycle assessment comparison. *Science of the Total Environment*, 438, 533–540. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.08.096>

Ilyas, H., & Masih, I. (2017). Intensification of constructed wetlands for land area reduction: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(13), 12081–12091. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8740-z>

Institut National de la Normalisation et de la Propriété. (1989). *Norme tunisienne homologuée NT 106.03(1989): Protection de l'environnement—Utilisation des eaux usées traitées à des fins agricoles: Spécifications physico-chimiques et biologiques.*

IPPC. (2014). *2013 supplement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: Wetlands: methodological guidance on lands with wet and drained soils, and constructed wetlands for wastewater treatment.* Ippc, Intergovernmental Panel on Climate Change.

Iribarnegaray, M. A., Rodriguez-Alvarez, M. S., Moraña, L. B., Tejerina, W. A., & Seghezze, L. (2018). Management challenges for a more decentralized treatment and reuse of domestic wastewater in metropolitan areas. *Journal of Water Sanitation and Hygiene for Development*, 8(1), 113–122. <https://doi.org/10.2166/washdev.2017.092>

ISO (16075), I. O. for S. (2020). *Guidelines for treated wastewater use for irrigation projects.*

ISO, I. O. for S. (2023). *UNE ISO 16075-1:2023—Guidelines for treated wastewater use for irrigation projects Part 1: The basis of a reuse project for irrigation*.

Jinadasa, K. B. S. N., Tanaka, N., Mowjood, M. I. M., & Werellagama, D. R. I. B. (2006). Free water surface constructed wetlands for domestic wastewater treatment: A tropical case study. *Chemistry and Ecology*, 22(3), 181–191. <https://doi.org/10.1080/02757540600658849>

Jordão, E. P., Pessoa, C. A., & Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. (1995). *Tratamento de esgotos domésticos*. ABES.

Józwiakowski, K., Mucha, Z., Generowicz, A., Baran, S., Bielińska, J., & Wójcik, W. (2015a). The use of multi-criteria analysis for selection of technology for a household WWTP compatible with sustainable development. *Archives of Environmental Protection*, 41(3), 76–82. <https://doi.org/10.1515/aep-2015-0033>

Józwiakowski, K., Mucha, Z., Generowicz, A., Baran, S., Bielińska, J., & Wójcik, W. (2015b). The use of multi-criteria analysis for selection of technology for a household WWTP compatible with sustainable development. *Archives of Environmental Protection*, 41(3), Article 3. <https://doi.org/10.1515/aep-2015-0033>

Juznic-Zonta, Z., Guisasola, A., & Baeza, J. A. (2022a). Smart-Plant Decision Support System (SP-DSS): Defining a multi-criteria decision-making framework for the selection of WWTP configurations with resource recovery. *JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION*, 367. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132873>

Juznic-Zonta, Z., Guisasola, A., & Baeza, J. A. (2022b). Smart-Plant Decision Support System (SP-DSS): Defining a multi-criteria decision-making framework for the selection of

WWTP configurations with resource recovery. *JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION*, 367. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132873>

Kacprzak, M., Neczaj, E., Fijałkowski, K., Grobelak, A., Grosser, A., Worwag, M., Rorat, A., Brattebo, H., Almås, Å., & Singh, B. R. (2017). Sewage sludge disposal strategies for sustainable development. *Environmental Research*, 156, 39–46. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.03.010>

Kalbar, P. P., Karmakar, S., & Asolekar, S. R. (2012). Selection of an appropriate wastewater treatment technology: A scenario-based multiple-attribute decision-making approach. *Journal of Environmental Management*, 113, 158–169. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.08.025>

Kalbar, P. P., Karmakar, S., & Asolekar, S. R. (2013a). Assessment of wastewater treatment technologies: Life cycle approach. *Water and Environment Journal*, 27(2), 261–268. <https://doi.org/10.1111/wej.12006>

Kalbar, P. P., Karmakar, S., & Asolekar, S. R. (2013b). Assessment of wastewater treatment technologies: Life cycle approach. *Water and Environment Journal*, 27(2), Article 2. <https://doi.org/10.1111/wej.12006>

Kalbar, P. P., Karmakar, S., & Asolekar, S. R. (2013c). The influence of expert opinions on the selection of wastewater treatment alternatives: A group decision-making approach. *Journal of Environmental Management*, 128, 844–851. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.06.034>

Kalbar, P. P., Karmakar, S., & Asolekar, S. R. (2016). Life cycle-based decision support tool for selection of wastewater treatment alternatives. *Journal of Cleaner Production*, 117, 64–72. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.01.036>

Kamami, M. I., Ndegwa, G. M., & Home, P. G. (2011a). Fuzzy based decision support method for selection of sustainable wastewater treatment technologies. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 4(1). <https://doi.org/10.3965/j.issn.1934-6344.2011.01.0-0>

Kamami, M. I., Ndegwa, G. M., & Home, P. G. (2011b). Fuzzy based decision support method for selection of sustainable wastewater treatment technologies. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 4(1), Article 1. <https://doi.org/10.3965/j.issn.1934-6344.2011.01.0-0>

Kamble, S. J., Singh, A., & Kharat, M. G. (2017). A hybrid life cycle assessment based fuzzy multi-criteria decision making approach for evaluation and selection of an appropriate municipal wastewater treatment technology. *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*, 2(1), 9. <https://doi.org/10.1007/s41207-017-0019-8>

Katukiza, A. Y., Ronteltap, M., Niwagaba, C. B., Foppen, J. W. A., Kansime, F., & Lens, P. N. L. (2012). Sustainable sanitation technology options for urban slums. *Biotechnology Advances*, 30(5), 964–978. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2012.02.007>

Kennedy-Walker, R., Evans, B., Amezaga, J., & Paterson, C. (2013). Challenges for the future of urban sanitation planning: Critical analysis of John Kalbermatten's influence. *Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development*, 4(1), 1–14. <https://doi.org/10.2166/washdev.2013.164>

Kerstens, S. M., Legowo, H. B., & Hendra Gupta, I. B. (2012). Evaluation of DEWATS in java, indonesia. *Journal of Water Sanitation and Hygiene for Development*, 2(4), 254–265. <https://doi.org/10.2166/washdev.2012.065>

Khattiyavong, C., & Lee, H. S. (2019a). Performance simulation and assessment of an appropriate wastewater treatment technology in a densely populated growing city in a developing country: A case study in Vientiane, Laos. *Water (Switzerland)*, *11*(5). Scopus. <https://doi.org/10.3390/w11051012>

Khattiyavong, C., & Lee, H. S. (2019b). Performance simulation and assessment of an appropriate wastewater treatment technology in a densely populated growing city in a developing country: A case study in Vientiane, Laos. *Water (Switzerland)*, *11*(5), Article 5. Scopus. <https://doi.org/10.3390/w11051012>

Kobayashi, H. A., Stenstrom, M. K., & Mah, R. A. (1983). Treatment of low strength domestic wastewater using the anaerobic filter. *Water Research*, *17*(8), 903–909. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(83\)90164-1](https://doi.org/10.1016/0043-1354(83)90164-1)

Kotti, I. P., Gikas, G. D., & Tsihrintzis, V. A. (2010). Effect of operational and design parameters on removal efficiency of pilot-scale FWS constructed wetlands and comparison with HSF systems. *Ecological Engineering*, *36*(7), 862–875. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2010.03.002>

Kumari, A., Maurya, N. S., Kumar, A., Yadav, R. K., Kumar, A., Kumari, A., Maurya, N. S., Kumar, A., Yadav, R. K., & Kumar, A. (2023). Options for the Disposal and Reuse of Wastewater Sludge, Associated Benefit, and Environmental Risk. In *Sewage Management*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.109410>

Kuttuva, P., Lele, S., & Mendez, G. V. (2018). Decentralized wastewater systems in bengaluru, india: Success or failure? *Water Economics and Policy*, *4*(2). <https://doi.org/10.1142/S2382624X16500430>

Ladu, J. L. C., & Lü, X. (2014). Effects of hydraulic retention time, temperature, and effluent recycling on efficiency of anaerobic filter in treating rural domestic wastewater. *Water Science and Engineering*, 7(2), 168–182. <https://doi.org/10.3882/j.issn.1674-2370.2014.02.005>

Lazarova, V., Savoye, P., Janex, M. L., Blatchley, E. R., III, & Pommeputy, M. (1999). Advanced Wastewater Disinfection Technologies: State of the Art and Perspectives. *Water Science and Technology*, 40(4–5), 203–213. <https://doi.org/10.2166/wst.1999.0593>

Lemos Chernicharo, C. A. de. (2007). *Anaerobic reactors*. IWA Publ. [u.a.].

Li, H., Cao, Y., Su, L., & Wang, F. (2022). Selecting a project delivery system for wastewater treatment plants with related-indicators under a pythagorean fuzzy environment. *FRONTIERS IN ENVIRONMENTAL SCIENCE*, 10. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.883630>

Li, J., Tang, W. Z., & Gu, L. (2023). Energy efficiency assessment of China wastewater treatment plants by unit energy consumption per kg COD removed. *ENVIRONMENTAL TECHNOLOGY*, 44(2), Article 2. <https://doi.org/10.1080/09593330.2021.1969596>

Liang, X., & Van Dijk, M. P. (2010). Financial and economic feasibility of decentralized wastewater reuse systems in Beijing. *Water Science and Technology*, 61(8), 1965–1973. <https://doi.org/10.2166/wst.2010.105>

Libralato, G., Volpi Ghirardini, A., & Avezzù, F. (2012). To centralise or to decentralise: An overview of the most recent trends in wastewater treatment management. *Journal of Environmental Management*, 94(1), 61–68. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.07.010>

Lienhoop, N., Al-Karablieh, E. K., Salman, A. Z., & Cardona, J. A. (2014). Environmental cost-benefit analysis of decentralised wastewater treatment and re-use: A case study of rural

Jordan. *Water Policy: Official Journal of the World Water Council*, 16(2), 323–339.
<https://doi.org/10.2166/wp.2013.026>

Liu, Y., Eckert, C. M., & Earl, C. (2020). A review of fuzzy AHP methods for decision-making with subjective judgements. *Expert Systems with Applications*, 161, 113738.
<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113738>

Lizot, M., Goffi, A. S., Thesari, S. S., Trojan, F., Afonso, P. S. L. P., & Ferreira, P. F. V. (2021). Multi-criteria methodology for selection of wastewater treatment systems with economic, social, technical and environmental aspects. *Environment, Development and Sustainability*, 23(7), 9827–9851. <https://doi.org/10.1007/s10668-020-00906-8>

Lopes, L. S., Rosa, A. P., Marco, J. S., Possetti, G. R. C., & Mesquita, T. C. R. (2020). Energy potential of biogas and sludge from UASB reactors in the state of Paraná, Brazil. *Revista Ambiente & Água*, 15, e2398. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2398>

Machado, A. I., Beretta, M., Fragoso, R., & Duarte, E. (2017). Overview of the state of the art of constructed wetlands for decentralized wastewater management in Brazil. *Journal of Environmental Management*, 187, 560–570. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.11.015>

Mainardis, M., Buttazzoni, M., & Goi, D. (2020). Up-flow anaerobic sludge blanket (Uasb) technology for energy recovery: A review on state-of-the-art and recent technological advances. *Bioengineering*, 7(2). <https://doi.org/10.3390/bioengineering7020043>

Mara, D., Drangert, J.-O., Viet Anh, N., Tonderski, A., Gulyas, H., & Tonderski, K. (2007). Selection of sustainable sanitation arrangements. *Water Policy*, 9(3), 305–318.
<https://doi.org/10.2166/wp.2007.009>

Markov, Z., Jovanoski, I., & Dimitrovski, D. (2017). MULTI-CRITERIA ANALYSIS APPROACH FOR SELECTION OF THE MOST APPROPRIATE TECHNOLOGY FOR MUNICIPAL WASTEWATER TREATMENT. *JOURNAL OF ENVIRONMENTAL PROTECTION AND ECOLOGY*, 18(1), 289–303.

MARN, M. de M. A. y R. N. (2016). *Recomendaciones para la selección de tratamientos de depuración de aguas residuales urbanas en la República de El Salvador*. Unidad Ejecutora de Programas Hídricos.

Márquez, P., Gutiérrez, M. C., Toledo, M., Alhama, J., Michán, C., & Martín, M. A. (2022). Activated sludge process versus rotating biological contactors in WWTPs: Evaluating the influence of operation and sludge bacterial content on their odor impact. *Process Safety and Environmental Protection*, 160, 775–785. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.02.071>

Marttunen, M., Haag, F., Belton, V., Mustajoki, J., & Lienert, J. (2019). Methods to inform the development of concise objectives hierarchies in multi-criteria decision analysis. *European Journal of Operational Research*, 277(2), 604–620. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.02.039>

Mason, N., Oyaya, C., & Boulenouar, J. (2020). Reforming urban sanitation under decentralization: Cross-country learning for Kenya and beyond. *Development Policy Review*, 38(1), 42–63. <https://doi.org/10.1111/dpr.12408>

Masoud, A. M. N., Belotti, M., Alfarra, A., & Sorlini, S. (2022). Multi-criteria analysis for evaluating constructed wetland as a sustainable sanitation technology, jordan case study. *Sustainability (Switzerland)*, 14(22). <https://doi.org/10.3390/su142214867>

Massoud, M. A., Tarhini, A., & Nasr, J. A. (2009). Decentralized approaches to wastewater treatment and management: Applicability in developing countries. *Journal of Environmental Management*, 90(1), 652–659. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.07.001>

Maynard, H. E., Ouki, S. K., & Williams, S. C. (1999). Tertiary lagoons: A review of removal mechanisms and performance. *Water Research*, 33(1), 1–13. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(98\)00198-5](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(98)00198-5)

Mburu, N., Tebitendwa, S. M., Rousseau, D. P. L., van Bruggen, J. J. A., & Lens, P. N. L. (2013). Performance Evaluation of Horizontal Subsurface Flow–Constructed Wetlands for the Treatment of Domestic Wastewater in the Tropics. *Journal of Environmental Engineering*, 139(3), 358–367. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0000636](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000636)

McCarty, P. L., Bae, J., & Kim, J. (2011). Domestic Wastewater Treatment as a Net Energy Producer—Can This be Achieved? *Environmental Science & Technology*, 45(17), 7100–7106. <https://doi.org/10.1021/es2014264>

Measures, Limits and Procedures for Reuse of Treated Wastewater., Common Ministerial Decision No 145116 (354B)/08.03.11 (2011).

Melin, T., Jefferson, B., Bixio, D., Thoeye, C., De Wilde, W., De Koning, J., van der Graaf, J., & Wintgens, T. (2006). Membrane bioreactor technology for wastewater treatment and reuse. *Desalination*, 187(1–3), 271–282. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.04.086>

Mena-Ulecia, K., & Hernández, H. H. (2015a). Decentralized peri-urban wastewater treatment technologies assessment integrating sustainability indicators. *Water Science and Technology*, 72(2), 214–222. <https://doi.org/10.2166/wst.2015.209>

Mena-Ulecia, K., & Hernández, H. H. (2015b). Decentralized peri-urban wastewater treatment technologies assessment integrating sustainability indicators. *Water Science and Technology*, 72(2), Article 2. <https://doi.org/10.2166/wst.2015.209>

Ministerio de la Presidencia. (2007). *Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas.*

Ministry of Water and Irrigation. (2016). *National Water Strategy of Jordan, 2016- 2025.*

Molinos-Senante, M., Gómez, T., Caballero, R., Hernández-Sancho, F., & Sala-Garrido, R. (2015). Assessment of wastewater treatment alternatives for small communities: An analytic network process approach. *Science of The Total Environment*, 532, 676–687. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.06.059>

Mongeon, P., & Paul-Hus, A. (2016). The journal coverage of Web of Science and Scopus: A comparative analysis. *Scientometrics*, 106(1), 213–228. <https://doi.org/10.1007/s11192-015-1765-5>

Muga, H. E., & Mihelcic, J. R. (2008a). Sustainability of wastewater treatment technologies. *Journal of Environmental Management*, 88(3), 437–447. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.03.008>

Muga, H. E., & Mihelcic, J. R. (2008b). Sustainability of wastewater treatment technologies. *Journal of Environmental Management*, 88(3), Article 3. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.03.008>

Munier, N. (2011). *A Strategy for Using Multicriteria Analysis in Decision-Making.* Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-1512-7>

Musazura, W., Odindo, A. O., Tesfamariam, E. H., Hughes, J. C., & Buckley, C. A. (2018). Decentralised wastewater treatment effluent fertigation: Preliminary technical assessment. *WATER SA*, 44(2), 250–257. <https://doi.org/10.4314/wsa.v44i2.10>

Mutikanga, H. E., Sharma, S. K., & Vairavamoorthy, K. (2011). Multi-criteria Decision Analysis: A Strategic Planning Tool for Water Loss Management. *Water Resources Management*, 25(14), 3947. <https://doi.org/10.1007/s11269-011-9896-9>

Muzioreva, H., Gumbo, T., Kavishe, N., Moyo, T., & Musonda, I. (2022). Decentralized wastewater system practices in developing countries: A systematic review. *UTILITIES POLICY*, 79. <https://doi.org/10.1016/j.jup.2022.101442>

MVCT, M. de V., Ciudad y Territorio. (2021). *Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS): TÍTULO E. Tratamiento de Aguas Residuales*. Viceministerio de Agua y Saneamiento Básico.

Nada, T., Moawad, A., El-Gohary, F. A., & Farid, M. N. (2011). Full-scale municipal wastewater treatment by up-flow anaerobic sludge blanket (UASB) in Egypt. *Desalination and Water Treatment*, 30(1–3), 134–145. <https://doi.org/10.5004/dwt.2011.2577>

Nguyen, T. M. H., Suwan, P., Koottatep, T., & Beck, S. E. (2019). Application of a novel, continuous-feeding ultraviolet light emitting diode (UV-LED) system to disinfect domestic wastewater for discharge or agricultural reuse. *Water Research*, 153, 53–62. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.01.006>

Nikmanesh, M. S., Eslami, H., Momtaz, S. M., Biabani, R., Mohammadi, A., Shiravand, B., & Zarei Mahmoudabadi, T. (2018). Performance Evaluation of the Extended Aeration Activated Sludge System in the Removal of Physicochemical and Microbial Parameters of

Municipal Wastewater: A Case Study of Nowshahr Wastewater Treatment Plant. *Journal of Environmental Health and Sustainable Development*, 3(2), 509–517.

Noyola, A., Morgan-Sagastume, J. M., Hernández Padilla, F., Rivera, A. P., Estrada, C. C., Cisneros Ortiz, M. E., & Villalba Pastrana, M. E. (2013). *Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales: Guía de apoyo para ciudades pequeñas y medianas*. Instituto de Ingeniería, UNAM.

Oakley, S. M., Pocasangre, A., Flores, C., Monge, J., & Estrada, M. (2000). Waste stabilization pond use in central america: The experiences of el salvador, guatemala, honduras and nicaragua. *Water Science and Technology*, 42(10–11), 51–58.
<https://doi.org/10.2166/wst.2000.0607>

Okubo, T., Onodera, T., Uemura, S., Yamaguchi, T., Ohashi, A., & Harada, H. (2015). On-site evaluation of the performance of a full-scale down-flow hanging sponge reactor as a post-treatment process of an up-flow anaerobic sludge blanket reactor for treating sewage in India. *Bioresource Technology*, 194. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.07.015>

Oladoja, N. A. (2017). Appropriate technology for domestic wastewater management in under-resourced regions of the world. *Applied Water Science*, 7(7), 3391–3406.
<https://doi.org/10.1007/s13201-016-0495-z>

Omran, I. I., Al-Saati, N. H., Al-Saati, H. H., Hashim, K. S., & Al-Saati, Z. N. (2021a). Sustainability assessment of wastewater treatment techniques in urban areas of iraq using multi-criteria decision analysis (McdA). *Water Practice and Technology*, 16(2), 648–660.
<https://doi.org/10.2166/wpt.2021.013>

Omran, I. I., Al-Saati, N. H., Al-Saati, H. H., Hashim, K. S., & Al-Saati, Z. N. (2021b). Sustainability assessment of wastewater treatment techniques in urban areas of Iraq using multi-criteria decision analysis (McdA). *Water Practice and Technology*, 16(2), Article 2. <https://doi.org/10.2166/wpt.2021.013>

Onodera, T., Tandukar, M., Sugiyana, D., Uemura, S., Ohashi, A., & Harada, H. (2014). Development of a sixth-generation down-flow hanging sponge (DHS) reactor using rigid sponge media for post-treatment of UASB treating municipal sewage. *Bioresource Technology*, 152, 93–100. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.10.106>

ÖNORM B 2505. (2009). *Stations d'épuration—Sols filtrants végétaux alimentés de manière intermittente (installations d'épuration végétales)—Application, conception, installation, service et inspection*. Australian Standards.

Ortega de Miguel, E. (2010). *Manual para la implantación de sistemas de depuración en pequeñas poblaciones*. Ministerio Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.

Otter, P., Hertel, S., Ansari, J., Lara, E., Cano, R., Arias, C., Gregersen, P., Grischek, T., Benz, F., Goldmaier, A., & Alvarez, J. A. (2020). Disinfection for decentralized wastewater reuse in rural areas through wetlands and solar driven onsite chlorination. *SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT*, 721. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137595>

Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *Systematic Reviews*, 10(1), 89. <https://doi.org/10.1186/s13643-021-01626-4>

Pandey, V., Komal, & Dincer, H. (2023). A review on TOPSIS method and its extensions for different applications with recent development. *Soft Computing*, 27(23), 18011–18039. <https://doi.org/10.1007/s00500-023-09011-0>

Pang, J., Yang, M., Tong, D., Fu, X., Huang, L., Sun, B., & Pan, J. (2020). Does influent C/N ratio affect pollutant removal and greenhouse gas emission in wastewater ecological soil infiltration systems with/without intermittent aeration? *Water Science and Technology*, 81(4), 668–678. <https://doi.org/10.2166/wst.2020.141>

Papathanasiou, J., & Ploskas, N. (2018). TOPSIS. In J. Papathanasiou & N. Ploskas (Eds.), *Multiple Criteria Decision Aid: Methods, Examples and Python Implementations* (pp. 1–30). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-91648-4_1

Parkinson, J., & Tayler, K. (2003). Decentralized wastewater management in peri-urban areas in low-income countries. *Environment and Urbanization*, 15(1), 75–89. <https://doi.org/10.1177/095624780301500119>

Parkinson, J., Tayler, K., & Mark, O. (2007). Planning and design of urban drainage systems in informal settlements in developing countries. *Urban Water Journal*, 4(3), 137–149. <https://doi.org/10.1080/15730620701464224>

Pedrycz, W., Ekel, P., & Parreiras, R. (2011). *Fuzzy multicriteria decision-making: Models, methods and applications* (1st ed). Wiley.

Peña, M., Rodriguez, J., Mar, D., & Sepulveda, M. (2000). UASBs or anaerobic ponds in warm climates? A preliminary answer from Colombia. *Water Science and Technology*, 42. <https://doi.org/10.2166/wst.2000.0609>

Pinninti, R., Kasi, V., Landa, S. R., Rathinasamy, M., Sangamreddi, C., & Radha, P. R. D. (2021). Investigating the working efficiency of natural wastewater treatment systems: A step towards sustainable systems. *Water Practice and Technology*, *16*(3), 1012–1025. <https://doi.org/10.2166/wpt.2021.049>

Prescott, M. F., Dobbie, M. F., & Ramirez-Lovering, D. (2021). Green infrastructure for sanitation in settlements in the global south: A narrative review of socio-technical systems. *Sustainability (Switzerland)*, *13*(4), 1–20. <https://doi.org/10.3390/su13042071>

PSATS, T. P. S. A. of T. S. (2016). *Wastewater Treatment Plant Operator Certification Training. Module 5: Disinfection and Chlorination*. Penn State Harrisburg Environmental Training Center.

Purvis, B., Mao, Y., & Robinson, D. (2019). Three pillars of sustainability: In search of conceptual origins. *Sustainability Science*, *14*(3), 681–695. <https://doi.org/10.1007/s11625-018-0627-5>

Quevauviller, P., Thomas, O., & Beken, A. van der (Eds.). (2006). *Wastewater quality monitoring and treatment*. Wiley.

Raheem, A., Sikarwar, V. S., He, J., Dastyar, W., Dionysiou, D. D., Wang, W., & Zhao, M. (2018). Opportunities and challenges in sustainable treatment and resource reuse of sewage sludge: A review. *Chemical Engineering Journal*, *337*, 616–641. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.12.149>

Ramprasad, C., Smith, C. S., Memon, F. A., & Philip, L. (2017). Removal of chemical and microbial contaminants from greywater using a novel constructed wetland. *Ecological Engineering*, *106*(A), 55–65. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.05.022>

Ren, J., & Liang, H. (2017a). Multi-criteria group decision-making based sustainability measurement of wastewater treatment processes. *Environmental Impact Assessment Review*, 65, 91–99. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2017.04.008>

Ren, J., & Liang, H. (2017b). Multi-criteria group decision-making based sustainability measurement of wastewater treatment processes. *Environmental Impact Assessment Review*, 65, 91–99. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2017.04.008>

Resolución 330 de 2017, Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS) y se derogan las Resoluciones números 1096 de 2000, 0424 de 2001, 0668 de 2003, 1459 de 2005, 1447 de 2005 y 2320 de 2009 § Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2017).

Resolución 330 de 2017, Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS) y se derogan las Resoluciones números 1096 de 2000, 0424 de 2001, 0668 de 2003, 1459 de 2005, 1447 de 2005 y 2320 de 2009 § Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2017).

Resolución 631 De 2015, Ministerio De Ambiente Y Desarrollo Sostenible § Ministerio De Ambiente Y Desarrollo Sostenible (2015).

Resolución 631 de 2015, Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones § Ministerio De Ambiente Y Desarrollo Sostenible (2015).

Resolución 799 de 2021, Por la cual se modifica la Resolución 0330 de 2017 § Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio (2021).

Resolución 1256 de 2021, Por la cual se reglamenta el uso de las aguas residuales y se adoptan otras disposiciones § Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2021).

Riffat, R. (2013). *Fundamentals of wastewater treatment and engineering*. CRC Press/Taylor & Francis.

Rodrigues Mesquita, T. C., Pereira Rosa, A., de Oliveira Santos, T. F., Carraro Borges, A., Calijuri, M. L., & de Paula Souza, F. M. (2021). Decentralized management of sewage using septic tanks and anaerobic filters and its potential to comply with required standards in a developing country: A case study in Brazil. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(36), 50001–50016. Scopus. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14172-2>

Rodríguez Arenas, S. M. (2019). *Selección de tecnología para el tratamiento de aguas residuales en condominios residenciales: Caso Mensulí* [Trabajo de Grado para Optar el título de Magíster en Recursos Hídricos y Saneamiento]. Universidad Industrial de Santander.

Rodríguez-Castillo, M., Bolívar-Paypay, V., Poganietz, W.-R., & Prieto, A. L. (2023a). Indicators for the sustainability assessment of MBR technologies for wastewater reuse in Chile: The good, the bad, and the ugly. *MethodsX*, 10. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2023.102111>

Rodríguez-Castillo, M., Bolívar-Paypay, V., Poganietz, W.-R., & Prieto, A. L. (2023b). Indicators for the sustainability assessment of MBR technologies for wastewater reuse in Chile: The good, the bad, and the ugly. *MethodsX*, 10. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2023.102111>

Rodriguez-Garcia, G., Molinos-Senante, M., Hospido, A., Hernández-Sancho, F., Moreira, M. T., & Feijoo, G. (2011). Environmental and economic profile of six typologies of wastewater treatment plants. *Water Research*, 45(18), 5997–6010. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.08.053>

Runge, M. C. (Ed.). (2020). *Structured decision making: Case studies in natural resource management*. Johns Hopkins University Press.

Russell, R. (2014). Waste not, want not? Evaluating the urban sustainability implications of centralized versus decentralized wastewater treatment in Tijuana, Mexico. *Urban Geography*, 35(6), 805–821. <https://doi.org/10.1080/02723638.2014.917909>

Saaty, T. L. (1977). A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology*, 15(3), 234–281. [https://doi.org/10.1016/0022-2496\(77\)90033-5](https://doi.org/10.1016/0022-2496(77)90033-5)

Secretaría de Medio & Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. (1998). *NOM-003-SEMARNAT-1997—Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público*.

SgROI, M., Vagliasindi, F. G. A., & Roccaro, P. (2018). Feasibility, sustainability and circular economy concepts in water reuse. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 2, 20–25. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2018.01.004>

Shaw, K., & C. Dorea, C. (2021). Biodegradation mechanisms and functional microbiology in conventional septic tanks: A systematic review and meta-analysis. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 7(1), 144–155. <https://doi.org/10.1039/D0EW00795A>

Shen, X., Huang, D., Zhang, C., & Hu, K. (2018a). Performance evaluation of constructed wetlands treating wastewater treatment plant effluent in taihu lake, china. *CLEAN-SOIL AIR WATER*, 46(1). <https://doi.org/10.1002/clen.201600442>

Shen, X., Huang, D., Zhang, C., & Hu, K. (2018b). Performance evaluation of constructed wetlands treating wastewater treatment plant effluent in taihu lake, china. *CLEAN-SOIL AIR WATER*, 46(1), Article 1. <https://doi.org/10.1002/clen.201600442>

Shoushtarian, F., & Negahban-Azar, M. (2020). Worldwide Regulations and Guidelines for Agricultural Water Reuse: A Critical Review. *Water*, 12(4), Article 4. <https://doi.org/10.3390/w12040971>

Siebert, J., & Keeney, R. L. (2015). Creating More and Better Alternatives for Decisions Using Objectives. *Operations Research*, 63(5), 1144–1158. <https://doi.org/10.1287/opre.2015.1411>

Singh, A., Sawant, M., Kamble, S. J., Herlekar, M., Starkl, M., Aymerich, E., & Kazmi, A. (2019). Performance evaluation of a decentralized wastewater treatment system in India. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(21), 21172–21188. Scopus. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05444-z>

Singh, N. K., & Kazmi, A. A. (2018). Performance and cost analysis of decentralized wastewater treatment plants in Northern India: Case study. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 144(3). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)wr.1943-5452.0000886](https://doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000886)

Singh, N. K., Kazmi, A. A., & Starkl, M. (2015). A review on full-scale decentralized wastewater treatment systems: Techno-economical approach. *Water Science and Technology*, 71(4), 468–478. <https://doi.org/10.2166/wst.2014.413>

Singhirunnusorn, W., & Stenstrom, M. K. (2009a). Appropriate wastewater treatment systems for developing countries: Criteria and indicator assessment in Thailand. *Water Science and Technology*, 59(9), 1873–1884. <https://doi.org/10.2166/wst.2009.215>

Singhirunnusorn, W., & Stenstrom, M. K. (2009b). Appropriate wastewater treatment systems for developing countries: Criteria and indicator assessment in Thailand. *Water Science and Technology*, 59(9), Article 9. <https://doi.org/10.2166/wst.2009.215>

Singhirunnusorn, W., & Stenstrom, M. K. (2010a). A critical analysis of economic factors for diverse wastewater treatment processes: Case studies in Thailand. *Sustainable Environment Research*, 20(4), 263–268.

Singhirunnusorn, W., & Stenstrom, M. K. (2010b). A critical analysis of economic factors for diverse wastewater treatment processes: Case studies in Thailand. *Sustainable Environment Research*, 20(4), Article 4.

Song, H.-L., Li, X.-N., Lu, X.-W., & Inamori, Y. (2009). Investigation of microcystin removal from eutrophic surface water by aquatic vegetable bed. *Ecological Engineering*, 35(11), 1589–1598. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.04.005>

Søvik, A. K., & Kløve, B. (2007). Emission of N₂O and CH₄ from a constructed wetland in southeastern Norway. *Science of The Total Environment*, 380(1–3), 28–37. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.10.007>

Spellman, F. R. (1999). *Spellman's standard handbook for wastewater operators*. Technomic Pub. Co.

Spuhler, D., Germann, V., Kassa, K., Ketema, A. A., Sherpa, A. M., Sherpa, M. G., Maurer, M., Lüthi, C., & Langergraber, G. (2020). Developing sanitation planning options: A tool for systematic consideration of novel technologies and systems. *Journal of Environmental Management*, 271, 111004. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111004>

Standards for the Reuse of Treated Wastewater for Irrigation, no. 296/03.06.05 Decree (2005).

Starkl, M., Brunner, N., Das, S., & Singh, A. (2022a). Sustainability Assessment for Wastewater Treatment Systems in Developing Countries. *Water*, 14(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/w14020241>

Starkl, M., Brunner, N., Das, S., & Singh, A. (2022b). Sustainability Assessment for Wastewater Treatment Systems in Developing Countries. *Water*, 14(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/w14020241>

Superservicios. (2020). *Informe Nacional De Coberturas De Los Servicios Públicos De Acueducto, Alcantarillado Y Aseo*. Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. https://www.superservicios.gov.co/sites/default/files/inline-files/informe_nacional_de_coberturas_de_los_servicios_publicos_aaa_2020_vf_a%20%281%29.pdf

SuSanA. (2008). *Towards more sustainable sanitation solutions—SuSanA Vision Document*. Sustainable Sanitation Alliance (SuSanA).

Taylor, K., & Parkinson, J. (2005). Strategic planning for urban sanitation—A 21st century development priority? *Water Policy*, 7(6), 569–580. <https://doi.org/10.2166/wp.2005.0034>

Tchobanoglous, G., Stensel, H. D., Tsuchihashi, R., Burton, F. L., Abu-Orf, M., Bowden, G., Pfrang, W., & Metcalf & Eddy (Eds.). (2014). *Wastewater engineering: Treatment and resource recovery* (Fifth edition). McGraw-Hill Education.

Thalla, A., C P, D., Anagh, K., & Sony, E. (2019). Performance evaluation of horizontal and vertical flow constructed wetlands as tertiary treatment option for secondary effluents. *Applied Water Science*, 9, 1–9. <https://doi.org/10.1007/s13201-019-1014-9>

Tilley, E., Ulrich, L., Luthi, C., Reymond, P., & Zurbrügg, C. (2014). *Compendium of Sanitation Systems and Technologies*.

Tilmans, S., Diaz-Hernandez, A., Nyman, E., & Davis, J. (2014). The potential for financing small-scale wastewater treatment through resource recovery: Experience from Bocas del Toro, Panama. *Journal of Water Sanitation and Hygiene for Development*, 4(3), 449–459. <https://doi.org/10.2166/washdev.2014.138>

Tjandraatmadja, G., Sharma, A. K., Grant, T., & Pamminger, F. (2013a). A decision support methodology for integrated urban water management in remote settlements. *Water Resources Management*, 27(2), 433–449. <https://doi.org/10.1007/s11269-012-0195-x>

Tjandraatmadja, G., Sharma, A. K., Grant, T., & Pamminger, F. (2013b). A decision support methodology for integrated urban water management in remote settlements. *Water Resources Management*, 27(2), Article 2. <https://doi.org/10.1007/s11269-012-0195-x>

Tonetti, A. L., Figueiredo, I. C. S., Madrid, F. J. P. L., Magalhães, T. M., & Miyazaki, C. K. (2021). Cost confrontation study for decentralized wastewater treatment: When to adopt a cluster or onsite system? *International Journal of Environmental Science and Technology*. Scopus. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03327-w>

Uemura, S., & Harada, H. (2010). Application of UASB technology for sewage treatment with a novel post-treatment process. In *Environmental Anaerobic Technology* (pp. 91–112). Imperial College Press. https://doi.org/10.1142/9781848165434_0005

UIS, & amb. (2023). *Documento de análisis del impacto de los vertimientos de aguas residuales de asentamientos periurbanos no planificados sobre el servicio hidrológico de suministro de las cuencas receptoras en tres comunidades caso de estudio*. Bucaramanga.

UN-Habitat. (2003). *The Challenge of Slums. Global Report on Human Settlements*. Earthscan Publications Ltd.

UN-HABITAT. (2003). *The challenge of slums: Global report on human settlements 2003* /: *United Nations Human Settlements Programme*. Earthscan Publications,. <https://digitallibrary.un.org/record/504984>

Unión Europea. (2020). *REGLAMENTO (UE) 2020/741 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 25 de mayo de 2020 relativo a los requisitos mínimos para la reutilización del agua*.

United Nations. (2019). *World urbanization prospects: The 2018 revision*. United Nations.

USEPA. (2000). *Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters*. United States Environment Protection Agency.

USEPA. (2002). *Onsite Wastewater Treatment treatment treatment Systems Manual Systems Manual*. United States Environment Protection Agency.

van Laarhoven, P. J. M., & Pedrycz, W. (1983). A fuzzy extension of Saaty's priority theory. *Fuzzy Sets and Systems*, 11(1), 229–241. [https://doi.org/10.1016/S0165-0114\(83\)80082-7](https://doi.org/10.1016/S0165-0114(83)80082-7)

Vera, I., Jorquera, C., López, D., & Vidal, G. (2016). Constructed wetlands for wastewater treatment and reuse in Chile: Reflections [Humedales construidos para tratamiento y reúso de aguas servidas en Chile: Reflexiones]. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 7(3), 19–35.

Von Sperling, M. (2007a). *Activated sludge and aerobic biofilm reactors*. IWA publ.

Von Sperling, M. (2007b). *Waste Stabilisation Ponds*.

Von Sperling, M. (2007c). *Wastewater Characteristics, Treatment and Disposal*. IWA Publishing. <http://www.oapen.org/download?type=document&docid=640137>

Von Sperling, M., & Chernicharo, C. A. de L. (2005). *Biological wastewater treatment in warm climate regions*. IWA publishing.

Vymazal, J. (2010). Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. *Water*, 2(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/w2030530>

Vymazal, J. (2013). The use of hybrid constructed wetlands for wastewater treatment with special attention to nitrogen removal: A review of a recent development. *Water Research*, 47(14), 4795–4811. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.05.029>

Vymazal, J., Brix, H., Čížková, H., & Cooper, M. B. (1998). *Constructed Wetlands for Wastewater Treatment in Europe*. - Backhuys Publishers, Leiden, 366 pages. ISBN 90-73348-72-2. 1998. *International Review of Hydrobiology*, 83(5–6), 500–500. <https://doi.org/10.1002/iroh.19980830517>

Vymazal, J., & Kröpfelová, L. (2008). *Wastewater treatment in constructed wetlands with horizontal sub-surface flow*. Springer.

Wang, X., Liu, J., Ren, N.-Q., Yu, H.-Q., Lee, D.-J., & Guo, X. (2012a). Assessment of multiple sustainability demands for wastewater treatment alternatives: A refined evaluation scheme and case study. *Environmental Science and Technology*, 46(10), 5542–5549. <https://doi.org/10.1021/es300761x>

Wang, X., Liu, J., Ren, N.-Q., Yu, H.-Q., Lee, D.-J., & Guo, X. (2012b). Assessment of multiple sustainability demands for wastewater treatment alternatives: A refined evaluation scheme and case study. *Environmental Science and Technology*, 46(10), Article 10. <https://doi.org/10.1021/es300761x>

Waqas, S., Bilad, M. R., Man, Z. B., Klaysom, C., Jaafar, J., & Khan, A. L. (2020). An integrated rotating biological contactor and membrane separation process for domestic wastewater treatment. *Alexandria Engineering Journal*, 59(6), 4257–4265. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.07.029>

Waqas, S., Bilad, M. R., Man, Z. B., Suleman, H., Hadi Nordin, N. A., Jaafar, J., Dzarfan Othman, M. H., & Elma, M. (2021). An energy-efficient membrane rotating biological contactor for wastewater treatment. *Journal of Cleaner Production*, 282, 124544. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124544>

WHO, W. H. O. (2006a). *Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater. 4: Excreta and greywater use in agriculture*. World Health Organization.

WHO, W. H. O. (2006b). *Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater. 4: Excreta and greywater use in agriculture*. World Health Organization.

Yulistyorini, A., Camargo-Valero, M. A., Sukarni, S., Suryoputro, N., Mujiyono, M., Santoso, H., & Tri Rahayu, E. (2019). Performance of Anaerobic Baffled Reactor for Decentralized Wastewater Treatment in Urban Malang, Indonesia. *Processes*, 7(4), Article 4. <https://doi.org/10.3390/pr7040184>

Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3), 338–353. [https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X)

Zhong, F., Yu, C., Chen, Y., Wu, X., Wu, J., Liu, G., Zhang, J., Deng, Z., & Cheng, S. (2020). Nutrient Removal Process and Cathodic Microbial Community Composition in Integrated Vertical-Flow Constructed Wetland – Microbial Fuel Cells Filled With Different Substrates. *Frontiers in Microbiology*, *11*, 1896. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.01896>

APÉNDICES

Apéndice A. Diferentes tecnologías aplicadas para el tratamiento descentralizado de aguas residuales

En la A.1. presentada a continuación aparecen distintos trenes para el tratamiento descentralizado de aguas residuales encontrados en países tropicales en desarrollo.

Tabla A1. *Trenes de tratamiento para el tratamiento de aguas residuales recopilados durante la primera revisión de literatura*

| Fuente | Tecnología primaria | Tecnología secundaria | Tecnología terciaria |
|----------------------------|---------------------|-----------------------|----------------------|
| Brunner et al. (2018) | TI | FP | - |
| | RAFA | HA FSH | - |
| Cardona et al. (2017) | - | HA FSH | LM |
| | - | HA FSH | LM |
| Ergaieg et al. (2021) | RAFA | HA | - |
| | FA | HA | - |
| Datta et al. (2021) | RAD | HA | - |
| | SP | HA | LM |
| del Castillo et al. (2022) | - | LAC | - |
| | RAD | FA | - |
| del Castillo et al. (2022) | - | SBR | - |
| | - | AE | - |
| del Castillo et al. (2022) | - | LAC | - |
| | TS | SBR | D-UV |
| Garcia et al. (2022) | RAD | FA | HA |
| | TS | FA | - |
| Kerstens et al. (2012) | CBR | - | - |
| | FP | - | - |
| Kerstens et al. (2012) | - | AE | CL |
| | - | SBR | CL |
| Kuttuva et al. (2018) | - | MBR | CL |
| | RAD | HAD | - |
| Kuttuva et al. (2018) | TS | FA | - |

Nota: TS = Tanque Séptico; TI = Tanque de Imhoff; RAD: Reactor Anaerobio con Deflectores; RAFA= Reactor Anaerobio de flujo ascendente; FP= Filtro Percolador; CBR= Contactor Biológico Rotativo; FA= Filtro Anaerobio; LF= Laguna Facultativa; LFA = Laguna Facultativa Aireada; RST= Reactor Secuencial por Tandas; HA= Humedal Artificial; LM= Laguna de maduración; CL= Cloración; D-UV: desinfección UV; SP= sedimentador primario; LAC= lodos activados convencionales; MBR = Biorreactores de membrana.

REFERENCIAS

- Brunner, N., Starkl, M., Kazmi, A. A., Real, A., Jain, N., & Mishra, V. (2018). Affordability of decentralized wastewater systems: A case study in integrated planning from INDIA. *Water (Switzerland)*, 10(11). <https://doi.org/10.3390/w10111644>
- Cardona, J. A., Segovia, O. C., Boettger, S., Medellin Castillo, N. A., Cavallo, L., Ribeiro, I. E., & Schlueter, S. (2017). Reuse-oriented decentralized wastewater and sewage sludge treatment for rural settlements in Brazil: A cost-benefit analysis. *DESALINATION AND WATER TREATMENT*, 91, 82–92. <https://doi.org/10.5004/dwt.2017.21421>
- Datta, A., Singh, H. O., Raja, S. K., & Dixit, S. (2021). Constructed wetland for improved wastewater management and increased water use efficiency in resource scarce SAT villages: A case study from Kothapally village, in India. *International Journal of Phytoremediation*, 23(10), 1067–1076. Scopus. <https://doi.org/10.1080/15226514.2021.1876627>
- del Castillo, A., Garibay, M., Senes-Guerrero, C., Orozco-Nunnelly, D., de Anda, J., & Gradilla-Hernandez, M. (2022). A review of the sustainability of anaerobic reactors combined with constructed wetlands for decentralized wastewater treatment. *JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION*, 371. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133428>
- Ergaieg, K., Msaddek, M. H., Kallel, A., & Trabelsi, I. (2021). Monitoring of horizontal subsurface flow constructed wetlands for tertiary treatment of municipal wastewater. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(19), 2045. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-08419-y>
- Garcia, D., Munoz Melendez, G., Arteaga, A., Ojeda-Revah, L., & Mladenov, N. (2022). Greening Urban Areas with Decentralized Wastewater Treatment and Reuse: A Case Study of Ecoparque in Tijuana, Mexico. *WATER*, 14(4). <https://doi.org/10.3390/w14040596>

- Kerstens, S. M., Legowo, H. B., & Hendra Gupta, I. B. (2012). Evaluation of DEWATS in java, indonesia. *Journal of Water Sanitation and Hygiene for Development*, 2(4), 254–265. <https://doi.org/10.2166/washdev.2012.065>
- Kuttuva, P., Lele, S., & Mendez, G. V. (2018). Decentralized wastewater systems in bengaluru, india: Success or failure? *Water Economics and Policy*, 4(2). <https://doi.org/10.1142/S2382624X16500430>
- Lienhoop, N., Al-Karablieh, E. K., Salman, A. Z., & Cardona, J. A. (2014). Environmental cost-benefit analysis of decentralised wastewater treatment and re-use: A case study of rural Jordan. *Water Policy: Official Journal of the World Water Council*, 16(2), 323–339. <https://doi.org/10.2166/wp.2013.026>
- Musazura, W., Odindo, A. O., Tesfamariam, E. H., Hughes, J. C., & Buckley, C. A. (2018). Decentralised wastewater treatment effluent fertigation: Preliminary technical assessment. *WATER SA*, 44(2), 250–257. <https://doi.org/10.4314/wsa.v44i2.10>
- Rodrigues Mesquita, T. C., Pereira Rosa, A., de Oliveira Santos, T. F., Carraro Borges, A., Calijuri, M. L., & de Paula Souza, F. M. (2021). Decentralized management of sewage using septic tanks and anaerobic filters and its potential to comply with required standards in a developing country: A case study in Brazil. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(36), 50001–50016. Scopus. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14172-2>
- Russell, R. (2014). Waste not, want not? Evaluating the urban sustainability implications of centralized versus decentralized wastewater treatment in Tijuana, Mexico. *Urban Geography*, 35(6), 805–821. <https://doi.org/10.1080/02723638.2014.917909>

- Singh, N. K., & Kazmi, A. A. (2018). Performance and cost analysis of decentralized wastewater treatment plants in Northern India: Case study. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 144(3). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)wr.1943-5452.0000886](https://doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000886)
- Singh, N. K., Kazmi, A. A., & Starkl, M. (2015). A review on full-scale decentralized wastewater treatment systems: Techno-economical approach. *Water Science and Technology*, 71(4), 468–478. <https://doi.org/10.2166/wst.2014.413>
- Singh, S., Haberl, R., Moog, O., Shrestha, R. R., Shrestha, P., & Shrestha, R. (2009). Performance of an anaerobic baffled reactor and hybrid constructed wetland treating high-strength wastewater in Nepal-A model for DEWATS. *Ecological Engineering*, 35(5), 654–660. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.10.019>
- Tonetti, A. L., Figueiredo, I. C. S., Madrid, F. J. P. L., Magalhães, T. M., & Miyazaki, C. K. (2021). Cost confrontation study for decentralized wastewater treatment: When to adopt a cluster or onsite system? *International Journal of Environmental Science and Technology*. Scopus. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03327-w>

Apéndice B. Fichas de caracterización de tecnologías para el tratamiento descentralizado de aguas residuales en asentamientos no planificados de países tropicales en desarrollo

A continuación, se presentan fichas elaboradas para la caracterización de tecnologías para el tratamiento descentralizado de aguas residuales en asentamientos no planificados de países tropicales en desarrollo

B.1. Ficha 1- TANQUE SÉPTICO

B.1.1. GENERALIDADES

DESCRIPCIÓN

Los tanques sépticos son ampliamente utilizados como dispositivos para el tratamiento a pequeña escala de aguas residuales (AR) (Brault et al., 2022). Este dispositivo se compone de una cámara cerrada e impermeable, generalmente enterrada, en la cual las aguas residuales son depuradas mediante el proceso de sedimentación y biodegradación anaerobia (Tilley et al., 2014). En esta tecnología, los sólidos se acumulan en la parte inferior del tanque, mientras que los aceites y grasas se acumulan en la parte superior (Tilley et al., 2014).

COMPONENTES

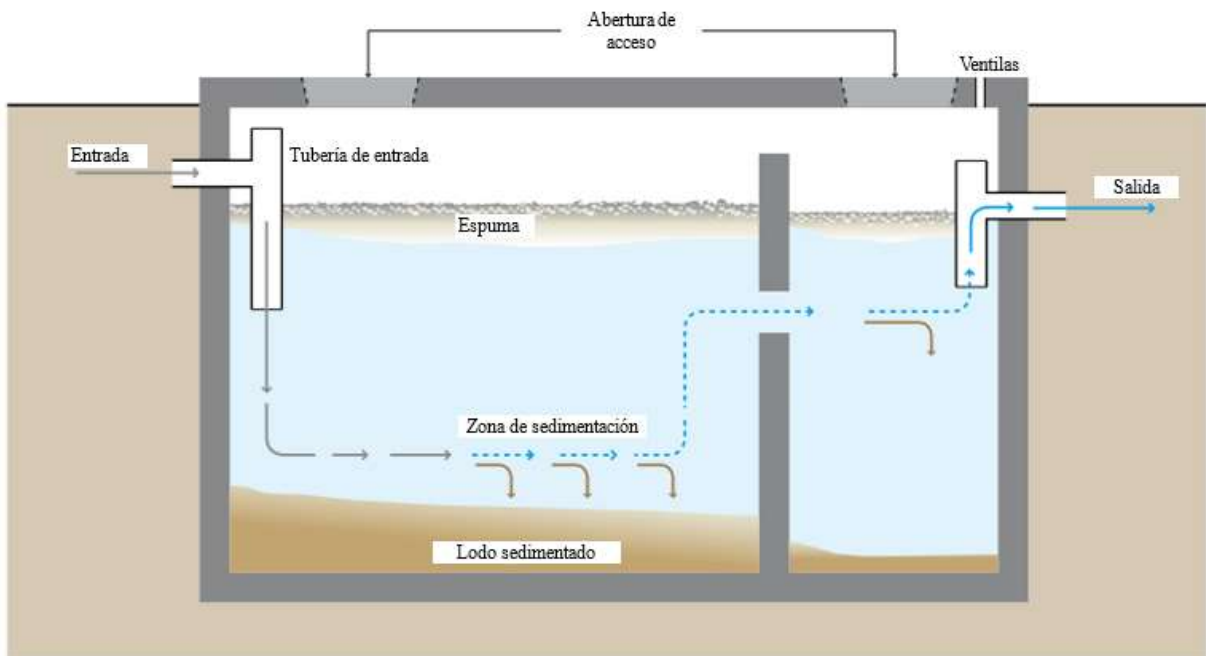
En la Figura B se puede observar el esquema típico de un tanque séptico. A continuación, se presenta la descripción de sus componentes principales.

- **Tubería de entrada:** Se suelen emplear tuberías en forma de "T" en las cuales la parte superior debe elevarse por encima de la capa de espuma (USEPA, 2002). La sección descendente de la tubería "T" debe extenderse por debajo de la capa de espuma hasta alcanzar aproximadamente un 30%-40% del volumen del líquido (USEPA, 2002).
- **Cámaras de sedimentación:** Por lo general, los tanques sépticos están compuestos por dos compartimentos en serie, los cuales cuentan con un borde libre. Estos compartimentos están conectados en un punto intermedio entre las capas flotantes con el fin de evitar el arrastre de sedimentos (Ortega de Miguel, 2010; USEPA, 2002).
- **Tubería de salida:** Usualmente es una tubería en forma de "T", se debe asegurar que la parte superior se por encima de la capa de espuma (USEPA, 2002). La parte descendente de la tubería "T" debe extenderse por debajo de la capa de espuma hasta aproximadamente

un 30%-40% del volumen del líquido (USEPA, 2002). Además, es recomendable colocar filtros de malla antes de la tubería de salida para prevenir el arrastre de sólidos (Ortega de Miguel, 2010).

- **Aberturas de acceso:** Se debe colocar al menos una abertura de acceso en el tanque para facilitar las labores de mantenimiento. Estas aberturas suelen ubicarse sobre las estructuras de entrada, salida y a la mitad del tanque (USEPA, 2002).
- **Ventilación:** Se recomienda instalar ductos de ventilación en cada compartimento del tanque para permitir la liberación de los gases generados (USEPA, 2002).

Figura B9. Esquema tanque séptico



Tomado de: Tilley et al. (2014)

B.1.2. ASPECTOS TÉCNICOS

A continuación, se presentan distintos aspectos técnicos de los tanques sépticos.

NIVEL DE TRATAMIENTO RECOMENDADO

Los tanques sépticos son utilizados mayoritariamente para el tratamiento primario de AR (Lemos Chernicharo, 2007).

POBLACIÓN RECOMENDADA

Se recomienda que la aplicación de tanques sépticos no exceda los 200 habitantes equivalentes (Brault et al., 2022; Ortega de Miguel, 2010).

ÁREA SUPERFICIAL

La superficie requerida por habitante equivalente puede variar entre 0.4 y 1.1 m², dependiendo de la población a la que se brinde servicio (Ortega de Miguel, 2010).

REMOCIÓN DE CONTAMINANTES

En la Tabla B1, Tabla B2 y Tabla B3 se presentan distintas eficiencias remoción de sólidos suspendidos, materia orgánica, nutrientes y microorganismos patógenos encontradas para los tanques sépticos.

Tabla B1. Remociones de sólidos suspendidos y materia orgánica en tanques sépticos

| Parámetro | | | SST (mg/l-1) | | | | DBO ₅ (mg/l-1) | | | | DQO (mg/l-1) | | | |
|---------------------------------|----------------------|--------|--------------|--------|------------|--------|---------------------------|--------|------------|--------|--------------|--------|------------|--------|
| Fuente | Nivel de tratamiento | Escala | Entrada | Salida | % remoción | N | Entrada | Salida | % remoción | N | Entrada | Salida | % remoción | N |
| Decezaró et al. (2021) | Primario | Real | 723.00 | 510.00 | 29.46 | 25 | 678.00 | 252.00 | 62.83 | 25 | 1186.00 | 530.00 | 55.31 | 25 |
| Franceschini et al. (2021) | Primario | Piloto | 382.35 | 93.29 | 75.60 | 17 | 398.00 | 165.57 | 58.40 | 20 | 898.00 | 346.63 | 61.40 | 20 |
| Nasr & Mikhaeil (2013) | Primario | Piloto | 295.00 | 115.00 | 61.02 | D.N.R. | 450.00 | 164.00 | 63.56 | D.N.R. | 960.00 | 380.00 | 60.42 | D.N.R. |
| Abdel-Shafy & El-Khateeb (2013) | Primario | Real | 136.00 | 54.00 | 60.29 | D.N.R. | 329.00 | 178.00 | 45.90 | D.N.R. | 588.00 | 348.00 | 40.82 | D.N.R. |

Notas: SST=Sólidos Suspendidos Totales; DBO₅=Demanda Bioquímica de Oxígeno; DQO= Demanda Química de Oxígeno; D.N.R.: Dato no reportado; N= número de muestra.

Tabla B2. Remociones de nutrientes en tanques sépticos

| Parámetro | | | NH ₄ -N (mg/l-1) | | | | NT (mg/l-1) | | | | PT (mg/l-1) | | | |
|---------------------------------|----------------------|--------|-----------------------------|--------|------------|--------|-------------|--------|------------|--------|-------------|--------|------------|--------|
| Fuente | Nivel de tratamiento | Escala | Entrada | Salida | % remoción | N | Entrada | Salida | % remoción | N | Entrada | Salida | % remoción | N |
| Decezaró et al. (2021) | Primario | Real | 71.00 | 60.00 | 15.49 | 25 | 111.00 | 80.00 | 27.93 | 25 | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. |
| Nasr & Mikhaeil (2013) | Primario | Piloto | 26.20 | 27.10 | -3.44 | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | 4.44 | 3.00 | 32.43 | D.N.R. |
| Abdel-Shafy & El-Khateeb (2013) | Primario | Real | 44.00 | 45.00 | -2.27 | D.N.R. | 55.00 | 49.00 | 10.91 | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. |

Nota: NH₄-N = Nitrógeno amoniacal; NT=Nitrógeno total; PT=Fosforo total; D.N.R.: Dato no reportado; N= número de muestra.

Tabla B3. Remociones de patógenos en tanques sépticos

| Parámetro | | | Coliformes fecales UFC 100 ml-1 | | | |
|---------------------------------|----------------------|--------|---------------------------------|----------|------------|--------|
| Fuente | Nivel de tratamiento | Escala | Entrada | Salida | % remoción | N |
| Nasr & Mikhaeil (2013) | Primario | Piloto | 2.70E+09 | 6.75E+08 | 75.00 | D.N.R. |
| Abdel-Shafy & El-Khateeb (2013) | Primario | Real | 9.00E+08 | 8.00E+07 | 91.11 | D.N.R. |

Nota: D.N.R.: Dato no reportado; N= número de muestra.

OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

A continuación, se presentan distintos aspectos de operación y mantenimiento de los tanques sépticos.

- **Puesta en marcha**

Los procesos de decantación se inician desde el momento en que las aguas residuales llegan al dispositivo (Ortega de Miguel, 2010). Por otro lado, la degradación de la materia orgánica comienza aproximadamente una semana después de que el sistema comienza a operar (Ortega de Miguel, 2010).

- **Actividades de operación y mantenimiento**

En la Tabla B4 se presentan las principales actividades de operación y mantenimiento en los tanques sépticos.

Tabla B4. Actividades de operación y mantenimiento en tanques sépticos

| Descripción | Frecuencia |
|--|-------------------|
| Inspección y medición de espesores flotantes y fangos ¹ | 1 vez al año |
| Extracción y gestión de fangos y flotantes ¹ | 1 vez al año |
| Mantenimiento de obra civil ¹ | 1 vez a la semana |

Fuente: ¹ Ortega de Miguel (2010)

- **Riesgos asociados**

Los principales riesgos asociados con la operación y mantenimiento de los tanques sépticos incluyen la generación de efluentes de baja calidad debido a sobrecargas hidráulicas y acumulación excesiva de lodos, así como la aparición de olores debido a una ventilación insuficiente del tanque (Ortega de Miguel, 2010).

- **Flexibilidad**

Los tanques sépticos, debido a su prolongado tiempo de retención hidráulica de varios días, son adecuados para hacer frente a picos de carga hidráulica y orgánica, siempre y cuando sean eventos aislados (Ortega de Miguel, 2010).

CRITERIOS DE DISEÑO

El diseño de los tanques sépticos se basa en factores como el número de usuarios, el consumo de agua por usuario, la temperatura promedio anual y las características de las aguas residuales (Tilley et al., 2014). Estos tanques están diseñados para garantizar un tiempo de retención hidráulica entre 1 y 3 días (Tilley et al., 2014). Por ejemplo, a continuación, se presentan las ecuaciones y valores de parámetros de diseño (ver Tabla B5, Tabla B6 y Tabla B7) por el reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico (RAS) para el contexto colombiano (MVCT, 2021):

$$V_u = 1000 + N_c(CT + kL_f)$$

Donde

V_u = Volumen útil del tanque en litros

N_c = Número de contribuyentes

C = Valor de contribución por persona en litros

T = Tiempo de retención hidráulica

k = Valor de tasa de acumulación de lodos digeridos

L_f = Litros de lodo fresco per cápita generados diariamente (L/día)

Tabla B5. Valor de contribución diaria de aguas residuales (C) y de lodo fresco generado por día (L_f)

| Predio | Unidad | Contribución de aguas residuales diaria C | Lodo fresco generado por día: L_f (L/día) |
|---------------------------|---------|---|---|
| Residencia de clase alta | Persona | 160 | 1 |
| Residencia de clase media | Persona | 130 | 1 |
| Residencia de clase baja | Persona | 100 | 1 |

Fuente: Adaptado de MVCT (2021)

Tabla B6. Tiempo de retención hidráulica (T) en función de la contribución diaria

| Contribución diaria (L) | T (días) | T (horas) |
|-------------------------|----------|-----------|
| Hasta 1500 | 1 | 24 |
| De 1501 a 3000 | 0.92 | 22 |
| De 3001 a 4500 | 0.83 | 20 |
| De 4501 a 6000 | 0.75 | 18 |
| De 6001 a 7500 | 0.67 | 16 |
| De 7501 a 9000 | 0.58 | 14 |
| Más de 9000 | 0.5 | 12 |

Fuente: Adaptado de MVCT (2021)

Tabla B7. Valor de acumulación de lodos digeridos (k) en función de la temperatura (t).

| Intervalo de limpieza (años) | t | | |
|------------------------------|----------|---------------|----------|
| | $t < 10$ | $10 < t < 20$ | $t > 20$ |
| 1 | 94 | 65 | 57 |
| 2 | 134 | 105 | 97 |
| 3 | 174 | 145 | 137 |
| 4 | 214 | 185 | 177 |
| 5 | 24 | 225 | 217 |

Fuente: Adaptado de MVCT (2021)

A partir del volumen generado puede realizarse el dimensionamiento utilizando la siguiente ecuación para determinar el área superficial y teniendo en cuenta las recomendaciones presentadas en la Tabla B9.

$$A_{superficial} = \frac{V_u}{1000H}$$

Donde

V_u =Volumen útil del tanque en litros

H = Profundidad útil del tanque en metros (ver Tabla B8).

Tabla B8. Valores de profundidad de tanques sépticos recomendados en función del volumen útil

| Volumen útil (m ³) | Profundidad útil mínima | Profundidad útil máxima |
|-----------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| hasta 6 | 1.2 | 2.2 |
| De 6 a 10 | 1.5 | 2.5 |
| Más de 10 | 1.8 | 2.8 |

Fuente: Adaptado de MVCT (2021)

Tabla B9. Recomendaciones para el dimensionamiento de tanques sépticos

| Parámetro | Recomendación |
|--|---------------|
| Diámetro interno mínimo (m) | 1.1 |
| Largo intento mínimo (m) | 0.8 |
| Relación ancho largo mínima | 2:1 |
| Relación ancho largo- máxima | 4:1 |
| Numero de cámaras en serie tanque cilíndrico | 3 |
| Numero de cámaras en serie tanque rectangular | 2 |

Fuente: Adaptado de MVCT (2021)

En cuanto a su ubicación, a pesar de estar impermeabilizados, es necesario colocar los tanques sépticos aguas abajo de fuentes hídricas y a una distancia mínima de 30 metros de estas (Ortega de Miguel, 2010).

POTENCIAL DE ACTUALIZACIÓN

En diversos estudios se han propuesto alteraciones en el diseño de los tanques sépticos con el objetivo de mejorar el rendimiento de los sistemas de tratamiento de aguas residuales en el lugar.

Por ejemplo, se han planteado cambios en los tiempos de retención del tanque séptico y la inclusión

de materiales de relleno, según se ha sugerido en investigaciones previas (Abbassi et al., 2018). Sin embargo, estas modificaciones no han tenido un gran impacto en el diseño general de los tanques sépticos (Jowett et al., 2017). Además, estas modificaciones no permiten obtener una remoción mejorada de nutrientes (Brault et al., 2022).

B.1.3. ASPECTOS ECONÓMICOS

A continuación, se presentan distintos aspectos económicos de los tanques sépticos.

- **Inversión Inicial:** La inversión requerida para los tanques sépticos es relativamente baja (Tilley et al., 2014). Los tanques con una capacidad inferior a 20,000 litros suelen ser prefabricados y fabricados en polietileno, mientras que los de mayor capacidad se construyen in situ utilizando concreto (USEPA, 2002). Según Von Sperling & Chernicharo (2005), el costo inicial estimado para en Brasil el año 2002 para esta tecnología varía entre 12 y 20 USD por habitante equivalente, aplicando factores de corrección, para el año 2023 estos valores oscilan entre 42.25 y 70.42 USD por habitante equivalente servido.
- **Costos aproximados de operación y mantenimiento:** Los costos de operación y mantenimiento de los tanques sépticos varían según el contexto local y factores como el salario de los trabajadores. En el caso de países en desarrollo con climas cálidos, Von Sperling & Chernicharo (2005) determinaron que los costos el año 2002 en Brasil pueden oscilar entre 0.5 y 1.0 USD por habitante equivalente al año. Por otro lado, Ortega de Miguel (2010) estimó que los costos de operación y mantenimiento de esta tecnología pueden variar entre 21 y 69 USD por habitante equivalente al año para el contexto español el año 2008. Realizando conversiones para obtener valores equivalentes el año 2023, en el Brasil estos costos podrían oscilar entre 1.76 y 3.52 USD por habitante equivalente al

año. Mientras que, para España estos valores podrían oscilar entre 27.45 y 90.20 USD por habitante equivalente al año.

B.1.4. ASPECTOS AMBIENTALES

A continuación, se presentan diferentes aspectos ambientales de la implementación de tanques sépticos.

CONSUMO ENERGÉTICO

Los tanques sépticos presentan un bajo consumo energético al no necesitar equipos mecánicos para su tratamiento y operar mediante el uso de la gravedad (Ortega de Miguel, 2010). En el caso de requerirse el uso de bombas, se utilizarán equipos de baja potencia (Ortega de Miguel, 2010).

GENERACIÓN DE OLORES

Si se lleva a cabo un mantenimiento adecuado, es baja la probabilidad de generar olores desagradables (Tilley et al., 2014).

PRODUCCIÓN DE LODOS

Se estima que los tanques sépticos generan un promedio aproximado de 110 a 360 litros por habitante por año (Ortega de Miguel, 2010).

GENERACIÓN DE RUIDOS

El nivel de ruido es prácticamente inexistente o muy bajo, ya que los tanques sépticos pueden funcionar sin la necesidad de equipos electromecánicos y, en los casos en que se requiere bombeo para el suministro de agua, la potencia necesaria es reducida (Ortega de Miguel, 2010).

EMISIONES GASES EFECTO INVERNADERO

Los tanques sépticos presentan emisiones estimadas de aproximadamente 0.3 kg de CH₄ por cada kilogramo de DBO tratado (Doorn et al., 2006).

OPORTUNIDADES APROVECHAMIENTO DE SUBPRODUCTOS

A continuación, se presentan oportunidades de aprovechamiento de los subproductos generados durante el tratamiento mediante tanques sépticos.

- **Biogás:** No se genera una cantidad suficiente de biogás para su reutilización (Brault et al., 2022).
- **Biomasa:** Los lodos generados suelen presentar un nivel bajo de estabilización, por lo tanto, es necesario someterlos a un tratamiento antes de su utilización (Andreoli et al., 2007).
- **Reúso del agua:** El efluente de los tanques sépticos requiere tratamiento adicional, lo que implica que no existe la posibilidad de reutilización cuando solo se aplica esta tecnología (Brault et al., 2022).

B.1.5. VENTAJAS Y DESVENTAJAS

En la Tabla B10 se muestran las principales ventajas y desventajas de utilizar tanques sépticos para el tratamiento de aguas residuales.

Tabla B10. Ventajas y desventajas tanques sépticos

| Ventajas | Desventajas |
|---|---|
| Tecnología simple y robusta | Bajas remociones de carga contaminante |
| Bajos costos de operación y mantenimiento | Generación de lodos que requieren tratamiento |
| Área requerida relativamente baja | Posible generación de malos olores |

REFERENCIAS

- Abbassi, B. E., Abuharb, R., Ammary, B., Almanaseer, N., & Kinsley, C. (2018). Modified Septic Tank: Innovative Onsite Wastewater Treatment System. *Water*, 10(5), Article 5. <https://doi.org/10.3390/w10050578>
- Andreoli, C. V., Von Sperling, M., & Fernandes, F. (2007). Sludge treatment and disposal. IWA publ.
- Brault, J.-M., Buchauer, K., & Martin, G. (2022). Wastewater Treatment and Reuse: A Guide to Help Small Towns Select Appropriate Options. International Bank for Reconstruction and Development / The World Bank.
- Decezaró, S. T., Wolff, D. B., de Araújo, R. K., de Carvalho Júnior, O., & Sezerino, P. H. (2021). Nitrification/denitrification potential of a septic tank and a constructed wetland with recirculation in the decentralized wastewater treatment from a housing development [Potencial de nitrificação/desnitrificação de tanque séptico e wetland construído com recirculação no tratamento descentralizado de esgoto de empreendimento habitacional]. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 26(4), 721–730. <https://doi.org/10.1590/S1413-415220200068>
- Doorn, M. R. J., Towprayoon, S., Vieira, S. M. M., Irving, W., Palmer, C., Pipatti, R., & Wang, C. (2006). Wastewater treatment and discharge, 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. *Intergov. Panel Clim. Change*, 61–628.
- Franceschini, G., Slompo, N. D. M., Rodrigues, S. A., Sarnighausen, V. C. R., & Lucas Junior, J. (2021). The efficiency of the economic septic tank in the treatment of domestic wastewater and black water in rural areas. *Research, Society and Development*, 10(8), e22910817232. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i8.17232>

- I. Abdel-Shafy, H., & A. El-Khateeb, M. (2013). Integration of septic tank and constructed wetland for the treatment of wastewater in Egypt. *Desalination and Water Treatment*, 51(16–18), 3539–3546. <https://doi.org/10.1080/19443994.2012.749585>
- Jowett, C., Kraemer, J., James, C., & Jowett, E. C. (2017, October 23). IMPROVING SEPTIC TANK PERFORMANCE BY ENHANCING ANAEROBIC DIGESTION.
- Lemos Chernicharo, C. A. de. (2007). *Anaerobic reactors*. IWA Publ. [u.a.].
- MVCT, M. de V., Ciudad y Territorio. (2021). *Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS): TÍTULO E. Tratamiento de Aguas Residuales / Viceministerio de Agua y Saneamiento Básico*.
- Nasr, F. A., & Mikhaeil, B. (2013). Treatment of domestic wastewater using conventional and baffled septic tanks. *Environmental Technology*, 34(16), 2337–2343. <https://doi.org/10.1080/09593330.2013.767285>
- Ortega de Miguel, E. (2010). *Manual para la implantación de sistemas de depuración en pequeñas poblaciones*. Ministerio Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.
- Tilley, E., Ulrich, L., Luthi, C., Reymond, P., & Zurbrügg, C. (2014). *Compendium of Sanitation Systems and Technologies*.
- USEPA. (2002). *Onsite Wastewater Treatment reatment reatmentreatment Systems Manual Systems Manual*. United States Environment Protection Agency.
- Von Sperling, M., & Chernicharo, C. A. de L. (2005). *Biological wastewater treatment in warm climate regions*. IWA publishing.

B.2. Ficha 3- TANQUE DE IMHOFF

B.2.1. GENERALIDADES

DESCRIPCIÓN

Los tanques de Imhoff son una tecnología utilizada para el tratamiento de aguas residuales (AR). Este dispositivo consta de una cámara cilíndrica dividida en dos secciones: una cámara superior con deflectores en forma de V, donde se lleva a cabo la sedimentación de sólidos suspendidos y la separación de la fase líquida y gaseosa, y una cámara inferior donde tiene lugar la degradación anaerobia de los sólidos sedimentados (Tilley et al., 2014). Durante el funcionamiento de esta tecnología, las AR fluyen a través de la cámara de sedimentación, donde los deflectores en forma de V mejoran el proceso de sedimentación al evitar que las burbujas de gas ascendentes arrastren partículas, lo que resulta en una mayor remoción de sólidos suspendidos (Brault et al., 2022). Las partículas sedimentadas son transportadas a la cámara inferior del tanque por efecto de la gravedad, donde serán digeridas por microorganismos anaerobios (MVCT, 2021).

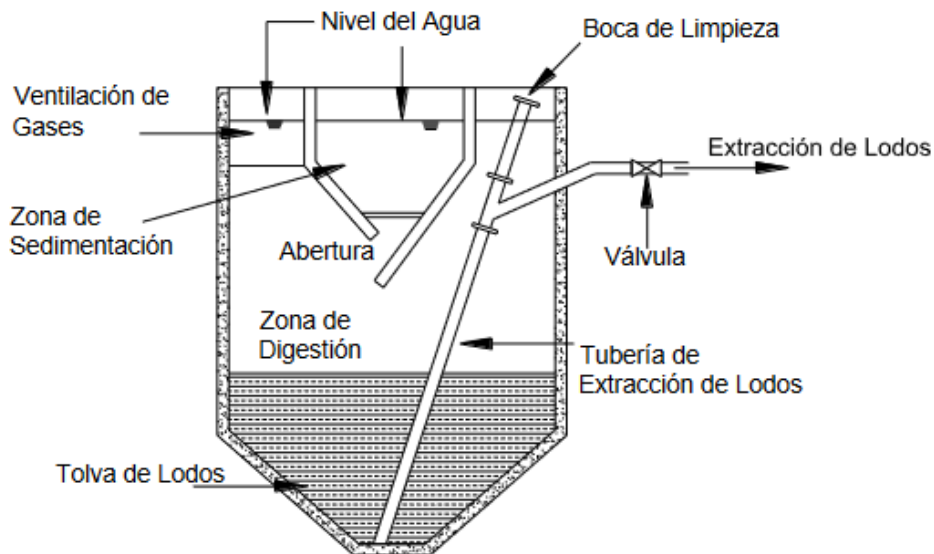
COMPONENTES

En la Figura B2 se puede observar el esquema típico de un filtro de Imhoff. Además, a continuación, se presentan los principales componentes de esta tecnología.

- **Tubería de entrada:** Se suele emplear tuberías en forma de T, donde se requiere que la parte superior de la misma se eleve y sumerja por encima de la superficie del reactor (Ortega de Miguel, 2010).
- **Cámara de sedimentación:** La cámara de sedimentación se compone de compartimentos separados con fondo inclinado para prevenir el arrastre de sólidos fuera del dispositivo. Estos compartimentos suelen tener paredes inclinadas en el fondo (Tilley et al., 2014).

- **Cámara de digestión:** La zona ubicada en la parte inferior del reactor donde son acumulados y digeridos los sólidos provenientes de la cámara de sedimentación (MVCT, 2021).
- **Tubos de ventilación:** La zona de ventilación recolecta y permite la salida de los gases generados y se recomienda que ocupe aproximadamente el 20% del área superficial total del sistema (Ortega de Miguel, 2010).
- **Tubería de salida:** se compone típicamente de tuberías en forma de T. La parte superior de esta tubería debe elevarse por encima de la capa de espuma (USEPA, 2002). Por otro lado, la parte descendente de la tubería T debe extenderse por debajo de la capa de espuma hasta alcanzar aproximadamente un 30% - 40% del volumen total del líquido (USEPA, 2002). Además, se recomienda la instalación de filtros de malla antes de la tubería de salida para evitar el arrastre de sólidos (Ortega de Miguel, 2010).

Figura B2. Esquema típico de un tanque de Imhoff



Tomado de: MVCT (2021)

B.2.2. ASPECTOS TÉCNICOS

A continuación, se presentan diferentes aspectos técnicos que presentan los tanques de Imhoff.

NIVEL DE TRATAMIENTO RECOMENDADO

Principalmente, los tanques de Imhoff son empleados para llevar a cabo el tratamiento primario de aguas residuales (AR) provenientes de comunidades con una población reducida (Ortega de Miguel, 2010).

POBLACIÓN RECOMENDADA

La capacidad de diseño máxima de esta tecnología generalmente se sitúa alrededor de 500 habitantes. No obstante, mediante la implementación de configuraciones en paralelo, es posible aumentar la capacidad hasta alcanzar los 1000 habitantes (Ortega de Miguel, 2010).

ÁREA SUPERFICIAL

Dependiendo de la población a la que se presta servicio el área superficial requerida puede variar entre los 0.2 a 1 m²/habitante-equivalente (Ortega de Miguel, 2010).

REMOCIÓN DE CONTAMINANTES

En las Tabla B11, Tabla B12 y Tabla B13 se presentan distintas eficiencias de remoción de sólidos suspendidos, materia orgánica, nutrientes y microorganismos patógenos encontradas para los tanques de Imhoff.

Tabla B11. Remociones de sólidos suspendidos y materia orgánica en tanques de Imhoff

| Parámetro | | | SST (mg/l-1) | | | | DBO ₅ (mg/l-1) | | | | DQO (mg/l-1) | | | |
|--------------------------------|----------------------|--------|--------------|--------|------------|--------|---------------------------|---------|------------|--------|--------------|---------|------------|--------|
| Fuente | Nivel de tratamiento | Escala | Entrada | Salida | % remoción | N | Entrada | Salida | % remoción | N | Entrada | Salida | % remoción | N |
| Mahlie (1939) | Primario | Real | 338.00 | 128.00 | 62.13 | D.N.R. | 374.00 | 274.00 | 26.74 | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. |
| Mikelonis et al. (2009) | Primario | Piloto | 190.00 | 140.00 | 26.32 | D.N.R. | 150.00 | 120.00 | 20.00 | D.N.R. | 320.00 | 260.00 | 18.75 | D.N.R. |
| Darvishmotevalli et al. (2019) | Primario | Real | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. |
| Ghrabi et al. (2011) | Primario | Real | 1851.00 | 679.00 | 63.32 | 5 | 1620.00 | 1350.00 | 16.67 | 4 | 3072.00 | 2876.00 | 6.38 | 8 |

Nota: SST=Sólidos Suspendidos Totales; DBO₅=Demanda Bioquímica de Oxígeno; DQO= Demanda Química de Oxígeno; D.N.R: Dato no reportado; N= número de muestra.

Tabla B12. Remociones de nutrientes en tanques de Imhoff

| Parámetro | | | NH ₄ -N (mg/l-1) | | | | NT (mg/l-1) | | | | PT (mg/l-1) | | | |
|----------------------|----------------------|--------|-----------------------------|--------|------------|--------|-------------|--------|------------|---|-------------|--------|------------|--------|
| Fuente | Nivel de tratamiento | Escala | Entrada | Salida | % remoción | N | Entrada | Salida | % remoción | N | Entrada | Salida | % remoción | N |
| Ghrabi et al. (2011) | Primario | Real | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | 125.00 | 120.00 | 4.00 | 5 | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. |

Nota: NH₄-N = Nitrógeno amoniacal; NT=Nitrógeno total; PT=Fosforo total; D.N.R: Dato no reportado; N= número de muestra.

Tabla B13. Remociones de patógenos en tanques de Imhoff

| Parámetro | | | Coliformes fecales UFC 100 ml-1 | | | | Coliformes Totales UFC 100 ml-1 | | | |
|--------------------------------|----------------------|--------|---------------------------------|----------|------------|--------|---------------------------------|----------|------------|--------|
| Fuente | Nivel de tratamiento | Escala | Entrada | Salida | % remoción | N | Entrada | Salida | % remoción | N |
| Darvishmotevalli et al. (2019) | Primario | Real | 5.00E+06 | 6.00E+05 | 88.00 | D.N.R. | 9.30E+08 | 6.10E+07 | 93.44 | D.N.R. |

Nota: D.N.R: Dato no reportado; N= número de muestra.

OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

A continuación, se presentan distintos aspectos de operación y mantenimiento de los tanques de Imhoff.

- **Puesta en marcha**

El proceso de decantación se inicia desde el momento en que las aguas residuales (AR) ingresan al dispositivo, mientras que la degradación de la materia orgánica comienza aproximadamente una semana después de que el sistema comienza a operar (Ortega de Miguel, 2010).

- **Actividades de operación y mantenimiento**

En la Tabla B14 se pueden observar las principales actividades de operación y mantenimiento de los tanques de Imhoff.

Tabla B14. *Actividades de operación y mantenimiento de los tanques de Imhoff*

| Descripción | Frecuencia |
|--|-------------------|
| Inspección y medición de espesores flotantes y fangos ¹ | 1 vez al año |
| Extracción y gestión de fangos y flotantes ¹ | 1 vez al año |
| Mantenimiento de obra civil ¹ | 1 vez a la semana |

Fuente: ¹ Ortega de Miguel (2010)

- **Riesgos asociados**

Los principales riesgos asociados con la operación y mantenimiento de Imhoff son la generación de efluentes de baja calidad debido a sobrecargas hidráulicas y acumulación excesiva de lodos, así como la posible generación de olores debido a una ventilación insuficiente del sistema (Ortega de Miguel, 2010).

- **Flexibilidad**

Si bien la tecnología demuestra resistencia ante los picos de carga orgánica, su capacidad para hacer frente a las sobrecargas hidráulicas es limitada (Brault et al., 2022).

CRITERIOS DE DISEÑO

El diseño de los tanques de Imhoff se basa en varios factores, como el número de usuarios, la cantidad de agua utilizada por usuario, los lodos generados, la temperatura promedio anual y las características de las aguas residuales (Tilley et al., 2014). En cuanto a su ubicación, a pesar de estar impermeabilizados, se recomienda que se sitúen por encima del nivel del agua subterránea y al menos a una distancia de 30 metros de fuentes hídricas (Brault et al., 2022; Ortega de Miguel, 2010). La dimensión de los tanques de Imhoff suele determinarse mediante la carga hidráulica superficial. En la Tabla 5 se encuentran diversos valores correspondientes a este y otros parámetros de diseño.

Tabla B15. Valores de parámetros de diseño recomendado para tanques de Imhoff

| Parámetro de diseño | Unidades | Valores recomendados |
|--|-------------------------------------|----------------------|
| Compartimiento de sedimentación | m ³ /m ² -día | 25 a 40 |
| Tiempo de retención hidráulica | | 2 a 4 |
| Relación largo ancho | | 2:1 - 5:1 |
| Pendiente del compartimiento sedimentación | | 1.25:1 - 1.75:1 |
| Ancho de ranuras | mm | 150 a 300 |
| Bafle de espumas debajo de la superficie | mm | 250 a 400 |
| Bafle de espuma encima de superficie | mm | 300 |
| Borde libre | mm | 450 a 600 |
| Área de la ventila total | % del área total | 15 a 30 |
| Ancho de ventilas | mm | 450 a 760 |
| Capacidad de almacenamiento de lodos | meses | 4 a 8 |
| Volumen de lodos acumulados | L/cápita | 600 a 1000 |
| Diámetro de tubería de extracción de lodos | mm | 200 a 300 |
| Profundidad total del agua | m | 7 a 9 |

Adaptado de: Crites & Tchobanoglous (1998) & MVCT (2021)

POTENCIAL DE ACTUALIZACIÓN

Los tanques de Imhoff presentan un potencial de actualización limitado, especialmente para la remoción mejorada de nutrientes (Brault et al., 2022).

B.2.3. ASPECTOS ECONÓMICOS

A continuación, se presentan distintos aspectos económicos de los tanques de Imhoff.

INVERSIÓN INICIAL

Acorde a estimaciones realizadas para el año 2008 en España, el costo de inversión de los Tanques Imhoff puede variar entre 110 USD y 200 USD por persona equivalente, dependiendo de la población cubierta (Ortega de Miguel, 2010). Utilizando factores de inflación, para el año 2023 se estima que estos valores podrían oscilar entre 130.73 y 261 USD por habitante equivalente.

COSTOS APROXIMADOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

De acuerdo con estimación realizada para España con precios del 2008, los costos estimados de los tanques de Imhoff varían entre 8 y 19 dólares dependiendo de la población atendida (Ortega de Miguel, 2010). Realizando conversiones a través de coeficientes de inflación, para el año 2003 estos valores oscilan entre 10.46 y 24.84 USD por habitante equivalente al año.

B.2.4. ASPECTOS AMBIENTALES

A continuación, se presentan diferentes aspectos ambientales que presentan los tanques de Imhoff.

CONSUMO ENERGÉTICO

El consumo de energía en los tanques de Imhoff es relativamente bajo, ya que no necesitan equipos mecánicos para el tratamiento y pueden operar por gravedad (Ortega de Miguel, 2010). En

situaciones donde se requiera utilizar bombas, se emplearán equipos de baja potencia (Ortega de Miguel, 2010).

GENERACIÓN DE OLORES

Si se realiza un mantenimiento adecuado, es poco probable que se generen olores desagradables (Tilley et al., 2014).

PRODUCCIÓN DE LODOS

Se estima que los tanques de Imhoff generan aproximadamente de 150 a 200 litros por habitante al año (Ortega de Miguel, 2010).

GENERACIÓN DE RUIDOS

La tecnología tiene un impacto sonoro nulo o muy bajo ya que puede operar sin equipos electromecánicos y en caso de requerir desbastes automáticos o alimentación mediante bombeo, la potencia instalada es muy baja (Ortega de Miguel, 2010).

EMISIONES GASES EFECTO INVERNADERO

Los tanques de Imhoff presentan emisiones estimadas de 0.3 kg de metano (CH₄) por kilogramo de DBO tratado (Noyola et al., 2016).

OPORTUNIDADES APROVECHAMIENTO DE SUBPRODUCTOS

A continuación, se presentan oportunidades de aprovechamiento de los subproductos generados durante el tratamiento mediante tanque de Imhoff.

- **Biogás:** No se produce la cantidad suficiente de biogás para su reutilización (Brault et al., 2022).

- **Biomasa:** La generación de lodos suele estar asociada a un nivel bajo de estabilización, lo cual requiere su tratamiento antes de su utilización (Andreoli et al., 2007).
- **Reúso del agua:** El efluente no cumple con los requisitos necesarios para su reutilización (Brault et al., 2022).

B.2.5. VENTAJAS Y DESVENTAJAS

En la Tabla B16 se muestran las principales ventajas y desventajas de utilizar tanques de Imhoff para el tratamiento de aguas residuales.

Tabla B16. Ventajas y desventajas tanques de Imhoff

| Ventajas | Desventajas |
|---|---|
| Tecnología simple y robusta | Bajas remociones de carga contaminante |
| Bajos costos de operación y mantenimiento | Generación de lodos que requieren tratamiento |
| Área requerida relativamente baja | Posible generación de malos olores |

REFERENCIAS

Andreoli, C. V., Von Sperling, M., & Fernandes, F. (2007). Sludge treatment and disposal. IWA publ.

Brault, J.-M., Buchauer, K., & Martin, G. (2022). Wastewater Treatment and Reuse: A Guide to Help Small Towns Select Appropriate Options. International Bank for Reconstruction and Development / The World Bank.

Crites, R., & Tchobanoglous, G. (1998). Small and decentralized wastewater management systems. WCB/McGraw-Hill.

Darvishmotevalli, M., Moradnia, M., Asgari, A., Noorisephr, M., & Mohammadi, H. (2019). Reduction of pathogenic microorganisms in an Imhoff tank-constructed wetland system. *DESALINATION AND WATER TREATMENT*, 154, 283–288. <https://doi.org/10.5004/dwt.2019.24044>

Ghrabi, A., Bousselmi, L., Masi, F., & Regelsberger, M. (2011). Constructed wetland as a low cost and sustainable solution for wastewater treatment adapted to rural settlements: The Chorfech wastewater treatment pilot plant. *Water Science and Technology*, 63(12), 3006–3012. <https://doi.org/10.2166/wst.2011.563>

Mahlie, W. S. (1939). A Comparison of the Performance of Imhoff Tanks against Primary Settling Tanks. *Sewage Works Journal*, 11(1), 68–71.

Mikelonis, A. M., Hodge, M. M., Adams, E. E., & Herrera, A. (2009). The Use of Chemically Enhanced Primary Treatment (CEPT) in Honduran Imhoff Tanks. *Proceedings of the*

Water Environment Federation, 2009(12), 3879–3891.
<https://doi.org/10.2175/193864709793953773>

MVCT, M. de V., Ciudad y Territorio. (2021). Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS): TÍTULO E. Tratamiento de Aguas Residuales. Viceministerio de Agua y Saneamiento Básico.

Noyola, A., Paredes, M. G., Morgan-Sagastume, J. M., & Güereca, L. P. (2016). Reduction of Greenhouse Gas Emissions From Municipal Wastewater Treatment in Mexico Based on Technology Selection: *Water. CLEAN - Soil, Air, Water*, 44(9), 1091–1098.
<https://doi.org/10.1002/clen.201500084>

Ortega de Miguel, E. (2010). Manual para la implantación de sistemas de depuración en pequeñas poblaciones. Ministerio Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.

Tilley, E., Ulrich, L., Luthi, C., Reymond, P., & Zurbrügg, C. (2014). *Compendium of Sanitation Systems and Technologies*.

B.3. Ficha 3- REACTOR ANAEROBIO CON DEFLECTORES

B.3.1. GENERALIDADES

DESCRIPCIÓN

El reactor anaerobio con deflectores, conocido como ABR (Anaerobic Baffled Reactor) en inglés, representa una mejora significativa del tanque séptico convencional mediante la incorporación de una serie de deflectores internos (Tilley et al., 2014). Estos deflectores permiten que el agua residual fluya de manera ascendente a través de compartimentos individuales entrando en contacto con la biomasa activa (Brault et al., 2022). Esta configuración promueve un mayor tiempo de contacto entre la biomasa activa y el agua residual, lo que favorece la degradación de la materia orgánica presente en el efluente (Von Sperling, 2007).

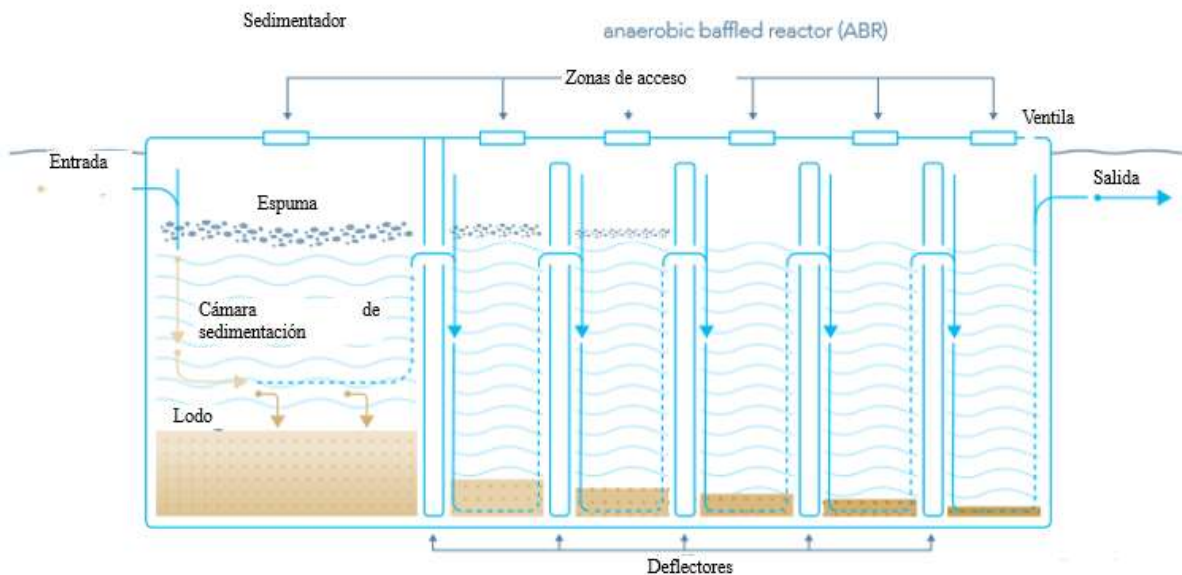
COMPONENTES

En la Figura B3 se puede observar el esquema típico de un reactor anaerobio con deflectores. A continuación, se presenta la descripción de sus componentes principales.

- **Zona de entrada:** La entrada a la cámara de sedimentación se realiza a través de una tubería en forma de T, similar a la utilizada en los tanques sépticos. Esta tubería se extiende por encima de la capa de espuma y se sumerge hasta la mitad de la altura del reactor, permitiendo el ingreso de los efluentes (Tilley et al., 2014).
- **Cámara de sedimentación:** La cámara de sedimentación desempeña un papel crucial en el proceso, ya que se encarga de la decantación de los sólidos de mayor tamaño presentes en el efluente. Esta etapa se basa en la sedimentación gravitacional de los sólidos suspendidos, facilitando su separación del líquido (Barber & Stuckey, 1999; Brault et al., 2022).

- **Deflectores:** Los deflectores son elementos utilizados para redirigir el flujo de los efluentes y favorecer el contacto con la biomasa activa. En el caso de los reactores ABR, suelen incorporarse hasta 8 compartimentos en serie, cada uno con deflectores ubicados para maximizar la interacción entre el efluente y la biomasa (Brault et al., 2022; Stuckey, 2010). La conexión entre los compartimentos se realiza mediante tuberías en forma de T, permitiendo el transporte de los efluentes desde la parte superior de un compartimento hasta la parte inferior del siguiente.
- **Zona de salida:** La salida del reactor se realiza a través de una tubería en forma de T, similar a la utilizada en la zona de entrada. Esta tubería se extiende por encima de la capa de espuma y se sumerge hasta la mitad de la altura del reactor, asegurando la adecuada salida de los efluentes tratados (Tilley et al., 2014).

Figura B3. Esquema reactor anaerobio con deflectores Fuente: Tomado de Brault et al. (2022)



B.3.2. ASPECTOS TÉCNICOS

A continuación, se presentan distintos aspectos técnicos de los ABR.

NIVEL DE TRATAMIENTO RECOMENDADO

A nivel de escala pequeña, esta tecnología es comúnmente utilizada como un único paso de tratamiento debido a su capacidad para lograr altas tasas de remoción de materia orgánica (Tilley et al., 2014).

POBLACIÓN RECOMENDADA

Los reactores anaerobios con deflectores son adecuados para tratar volúmenes de efluentes que oscilan entre 2 y 200 m³ por día (Tilley et al., 2014). Considerando que la generación per cápita de aguas residuales se estima en 300 a 380 litros según USEPA (2002), se puede inferir que estos reactores son recomendados para poblaciones de 7 a 700 personas.

ÁREA SUPERFICIAL

Al igual que los tanques sépticos, los reactores anaerobios con deflectores también tienen un bajo requerimiento de área (Brault et al., 2022). Se estima que el área necesaria para esta tecnología es de aproximadamente 0.2 a 0.5 m²/habitante-equivalente (Brault et al., 2022).

Remociones

En las Tabla B17, Tabla B18 y Tabla B19 se presentan distintas eficiencias remoción de sólidos suspendidos, materia orgánica, nutrientes y microorganismos patógenos encontradas para los reactores anaerobios con deflectores.

Tabla B17. Remociones de sólidos suspendidos y materia orgánica en reactores anaerobios con deflectores

| Parámetro | | | SST (mg/l-1) | | | | DBO ₅ (mg/l-1) | | | | DQO (mg/l-1) | | | |
|------------------------------|----------------------|-------------|--------------|--------|------------|--------|---------------------------|--------|------------|--------|--------------|---------|------------|--------|
| Fuente | Nivel de tratamiento | Escala | Entrada | Salida | % remoción | N | Entrada | Salida | % remoción | N | Entrada | Salida | % remoción | N |
| Ji et al. (2020) | Primario | Real | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | 1574.50 | 807.10 | 48.74 | D.N.R. |
| Gopala Krishna et al. (2008) | Primario | Laboratorio | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | 305.00 | 23.00 | 92.46 | D.N.R. | 504.00 | 38.00 | 92.46 | D.N.R. |
| Nguyen et al. (2020) | Primario | Laboratorio | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | 120.00 | 55.00 | 54.17 | D.N.R. | 260.00 | 105.00 | 59.62 | D.N.R. |
| Singh et al. (2009) | Primario | Real | 1506.30 | 322.20 | 78.61 | D.N.R. | 1593.80 | 686.00 | 56.96 | D.N.R. | 2914.20 | 1421.90 | 51.21 | D.N.R. |

Nota: SST= Sólidos Suspendidos Totales; DBO₅=Demanda Bioquímica de Oxígeno; DQO= Demanda Química de Oxígeno; D.N.R: Dato no reportado; N= número de muestra.

Tabla B18. Remociones de nutrientes en reactores anaerobios con deflectores

| Parámetro | | | NH ₄ -N (mg/l-1) | | | | NT (mg/l-1) | | | | PT (mg/l-1) | | | |
|---------------------|----------------------|--------|-----------------------------|--------|------------|--------|-------------|--------|------------|--------|-------------|--------|------------|--------|
| Fuente | Nivel de tratamiento | Escala | Entrada | Salida | % remoción | N | Entrada | Salida | % remoción | N | Entrada | Salida | % remoción | N |
| Singh et al. (2009) | Primario | Real | 142.00 | 209.30 | -47.39 | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | 24.40 | 28.40 | -16.39 | D.N.R. |

Nota: NH₄-N = Nitrógeno amoniacal; NT=Nitrógeno total; PT=Fosforo total; D.N.R: Dato no reportado; N= número de muestra.

Tabla B19. Remociones de patógenos en reactores anaerobios con deflectores

| Parámetro | | | Coliformes fecales UFC 100 ml-1 | | | | Coliformes Totales UFC 100 ml-1 | | | |
|---------------------|----------------------|--------|---------------------------------|----------|------------|--------|---------------------------------|--------|------------|--------|
| Fuente | Nivel de tratamiento | Escala | Entrada | Salida | % remoción | N | Entrada | Salida | % remoción | N |
| Singh et al. (2009) | Primario | Real | 7.50E+06 | 8.70E+05 | 88.40 | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. |

Nota: D.N.R: Dato no reportado; N= número de muestra.

OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

A continuación, se presentan distintos aspectos de operación y mantenimiento de los ABR.

- **Puesta en marcha**

Los ABR requieren meses para el comienzo del desarrollo de los microorganismos aerobios. Sin embargo, este proceso puede ser acelerado utilizando inóculos de otros reactores anaerobios (Tilley et al., 2014).

- **Actividades de operación y mantenimiento**

En la Tabla *B20* se pueden observar las principales actividades de operación y mantenimiento de los ABR.

Tabla B20. Activades de operación y mantenimiento en Reactores Anaerobios con Deflectores

| Descripción | Frecuencia |
|--|-------------------|
| Inspección y medición de espesores flotantes y fangos ¹ | 1 vez al año |
| Extracción y gestión de fangos y flotantes ¹ | 1 vez al año |
| Mantenimiento de obra civil ¹ | 1 vez a la semana |

Fuente: ¹ Lemos Chernicharo (2007)

- **Riesgos asociados**

Los reactores anaerobios con deflectores presentan varios riesgos asociados a su operación y mantenimiento. Dos de los principales riesgos son la generación de efluentes de baja calidad debido a sobrecargas hidráulicas y acumulación excesiva de lodos, así como la proliferación de olores debido a una ventilación inadecuada de la fosa (Tilley et al., 2014).

FLEXIBILIDAD

Los múltiples compartimientos de esta tecnología contribuyen a que esta tenga una alta resistencia a los picos de carga hidráulica y orgánica (Stuckey, 2010).

CRITERIOS DE DISEÑO

Los ABR suelen ser diseñados en función de la carga hidráulica, otros parámetros de entrada importantes son el tiempo de retención hidráulica, el número de recamaras y la velocidad ascensional del agua residual, los valores recomendados para distintos parámetros de los ABR son presentados en la Tabla B21.

Tabla B21. Distintos valores recomendados para el diseño de Reactores Anaerobios con Deflectores

| Parámetro | Unidad | Valor |
|---|----------------------------|-------------|
| Carga orgánica | kg DQO/m ³ -día | <5 |
| Tiempo de retención (cámara de sedimentación) | horas | 2 |
| Tiempo de detención entre deflectores | horas | 8 |
| Relación SS/DQO | Adimensional | 0.35 - 0.45 |
| Velocidad ascensional | m/hr | 1.4 - 2 |
| Número de recamaras | unidades | De 3 a 6 |

Fuente: Adaptado de Gutterer (2009)

POTENCIAL DE ACTUALIZACIÓN

Los ABR presentan un potencial de actualización limitado, especialmente para la remoción mejorada de nutrientes (Brault et al., 2022).

B.3.3. ASPECTOS ECONÓMICOS

A continuación, se presentan distintos aspectos económicos de los ABR.

INVERSIÓN INICIAL

Según Brault et al. (2022), la inversión inicial requerida para implementar esta tecnología varía entre 30 y 60 USD por habitante equivalente.

COSTOS APROXIMADOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

Los costos de operación y mantenimiento de los ABR pueden variar según el contexto local y factores como el salario de los trabajadores involucrados. En su estudio sobre países cálidos en

desarrollo, Brault et al. (2022) encontraron que estos costos oscilan entre 0.5 y 1.0 USD por habitante equivalente al año. Por otro lado, es importante tener en cuenta que estos valores pueden diferir en otras regiones o situaciones específicas.

B.3.4. ASPECTOS AMBIENTALES

A continuación, se presentan diferentes aspectos ambientales que presentan los ABR.

CONSUMO ENERGÉTICO

De acuerdo con Lemos Chernicharo (2007), los ABR se caracterizan por su bajo consumo energético, ya que su funcionamiento se basa en la gravedad y no requieren el uso de equipos mecánicos para el tratamiento de aguas residuales.

GENERACIÓN DE OLORES

Si no se realiza la remoción adecuada de lodos y no se garantiza una ventilación adecuada, se pueden generar problemas de proliferación de olores (Brault et al., 2022).

PRODUCCIÓN DE LODOS

El volumen de lodos generado por los reactores ABR es comparable al de los tanques sépticos (Brault et al., 2022). Por consiguiente, se estima que la producción de lodos oscila entre 110 y 360 litros por habitante por año.

GENERACIÓN DE RUIDOS

Al no requerir equipos mecánicos para su funcionamiento no se genera ruido considerable (Brault et al., 2022).

EMISIONES GASES EFECTO INVERNADERO

Los reactores anaerobios con deflectores tienen emisiones estimadas de 0.3 kg CH₃/ kg DBO tratado (Noyola et al., 2016).

OPORTUNIDADES APROVECHAMIENTO DE SUBPRODUCTOS

A continuación, se presentan oportunidades de aprovechamiento de los subproductos generados durante el tratamiento mediante ABR.

- **Biogás:** No se produce suficiente biogás para su reutilización (Brault et al., 2022).
- **Biomasa:** La biomasa presente en la cámara de sedimentación del ABR exhibe propiedades similares a la generada en los tanques sépticos. Además, la biomasa acumulada en los compartimentos del reactor muestra un nivel de estabilización relativamente alto (Brault et al., 2022).
- **Reúso del agua:** El efluente generado por el ABR no cumple con los requisitos para su reutilización directa (Brault et al., 2022).

B.3.5. VENTAJAS Y DESVENTAJAS

En Tabla B22 se pueden observar las principales ventajas y desventajas de los ABR para el tratamiento de AR.

Tabla B22. *Ventajas y desventajas reactores anaerobios con deflectores*

| Ventajas | Desventajas |
|---|---|
| Resistencia alta a picos de carga hidráulica y orgánica | Bajas remociones de nutrientes y patógenos |
| Bajos costos de operación y mantenimiento | Generación de lodos que requieren tratamiento |
| Área requerida relativamente baja | Posible generación de malos olores |

REFERENCIAS

- Barber, W. P., & Stuckey, D. C. (1999). The use of the anaerobic baffled reactor (ABR) for wastewater treatment: A review. *Water Research*, 33(7), 1559–1578. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(98\)00371-6](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(98)00371-6)
- Brault, J.-M., Buchauer, K., & Martin, G. (2022). *Wastewater Treatment and Reuse: A Guide to Help Small Towns Select Appropriate Options*. International Bank for Reconstruction and Development / The World Bank.
- Gopala Krishna, G. V. T., Kumar, P., & Kumar, P. (2008). Treatment of low strength complex wastewater using an anaerobic baffled reactor (ABR). *Bioresource Technology*, 99(17), 8193–8200. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.03.016>
- Gutterer, B. (2009). *Decentralised Wastewater Treatment Systems (DEWATS) and sanitation in developing countries: A practical guide*. BORDA.
- Ji, S., Ma, W., Wei, Q., Zhang, W., Jiang, F., & Chen, J. (2020). Integrated ABR and UASB system for dairy wastewater treatment: Engineering design and practice. *Science of The Total Environment*, 749, 142267. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142267>
- Lemos Chernicharo, C. A. de. (2007). *Anaerobic reactors*. IWA Publ. [u.a.].
- Nguyen, T. H., Watari, T., Hatamoto, M., Sutani, D., Setiadi, T., & Yamaguchi, T. (2020). Evaluation of a combined anaerobic baffled reactor–downflow hanging sponge biosystem for treatment of synthetic dyeing wastewater. *Environmental Technology & Innovation*, 19, 100913. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.100913>
- Noyola, A., Paredes, M. G., Morgan-Sagastume, J. M., & Güereca, L. P. (2016). Reduction of Greenhouse Gas Emissions From Municipal Wastewater Treatment in Mexico Based on

Technology Selection: *Water. CLEAN - Soil, Air, Water*, 44(9), 1091–1098.
<https://doi.org/10.1002/clen.201500084>

Singh, S., Haberl, R., Moog, O., Shrestha, R. R., Shrestha, P., & Shrestha, R. (2009). Performance of an anaerobic baffled reactor and hybrid constructed wetland treating high-strength wastewater in Nepal-A model for DEWATS. *Ecological Engineering*, 35(5), 654–660.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.10.019>

Stuckey, D. C. (2010). Anaerobic Baffled Reactor (ABR) for Wastewater Treatment. In H. H. P. Fang, *Environmental Anaerobic Technology* (pp. 163–184). IMPERIAL COLLEGE PRESS. https://doi.org/10.1142/9781848165434_0008

Tilley, E., Ulrich, L., Luthi, C., Reymond, P., & Zurbrügg, C. (2014). *Compendium of Sanitation Systems and Technologies*.

Von Sperling, M. (2007). *Wastewater Characteristics, Treatment and Disposal*. IWA Publishing.
<http://www.oapen.org/download?type=document&docid=640137>

B.4. Ficha 4- REACTOR ANAEROBIO DE FLUJO ASCENDENTE

B.4.1. GENERALIDADES

DESCRIPCIÓN

El reactor anaerobio de flujo ascendente, conocido como UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) en inglés, es un dispositivo utilizado en el tratamiento de Aguas Residuales (AR). En esta tecnología, las aguas residuales fluyen desde la parte inferior del reactor a través de un lecho de lodo que presenta una actividad microbiológica alta, permitiendo la remoción de carga contaminante con un tiempo de retención hidráulica bajo (Lemos Chernicharo, 2007). El perfil de sólidos en el reactor presenta una variación, desde partículas densas y granulares en la zona inferior, hasta un lodo más disperso en la zona superior (Lemos Chernicharo, 2007). Además, este dispositivo está equipado con un separador de fases en la parte superior, el cual facilita el retorno de partículas y sólidos hacia la parte inferior del reactor, al tiempo que permite la captura del biogás generado durante el proceso de degradación anaerobia de la materia orgánica (Brault et al., 2022; Tilley et al., 2014).

COMPONENTES

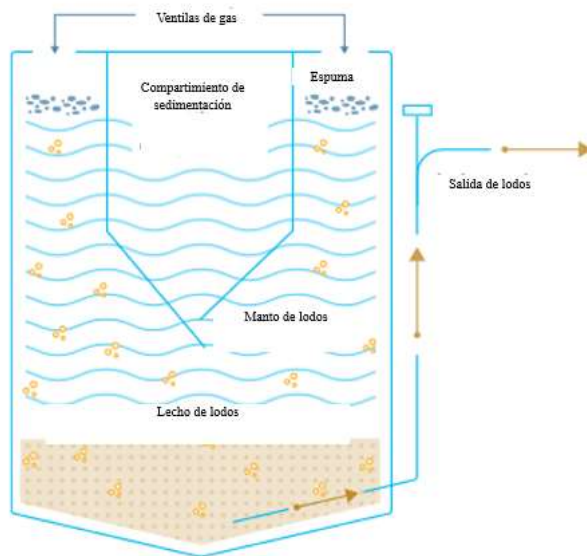
En la Figura B4 se puede observar el esquema típico de un reactor UASB. A continuación, se presenta la descripción de sus componentes principales.

- **Sistema de distribución:** Para la distribución del efluente en el reactor, se recomienda utilizar tuberías múltiples con aberturas distribuidas a lo largo de ellas. Se sugiere que haya una abertura cada 2.0 a 4.0 m² para garantizar una distribución eficiente de las aguas residuales desde el fondo del reactor (Lemos Chernicharo, 2007).
- **Lecho de lodos:** El proceso de desarrollo tiene lugar en las proximidades del fondo del reactor, donde el lodo adquiere una densidad notable y forma gránulos de diámetros que

oscilan entre 1 y 5 mm. Estos gránulos exhiben excelentes propiedades de sedimentación (Lemos Chernicharo, 2007).

- **Manto de lodos:** Situada encima del lecho de lodo, se encuentra una zona caracterizada por un crecimiento bacteriano más disperso. En esta área, los flóculos presentan concentraciones más bajas de sólidos suspendidos y tiempos de sedimentación más prolongados (Lemos Chernicharo, 2007).
- **Separador de fases:** El separador trifásico, ubicado en la parte superior del reactor, desempeña la función de separar los gases, líquidos y sólidos. Su objetivo es mantener la biomasa anaerobia dentro del reactor, permitiendo un largo tiempo de retención de lodos y la separación de la fase gaseosa y líquida (Lemos Chernicharo, 2007).
- **Sistema de recolección de agua tratada:** usualmente un canal dentado ubicado en la parte superior del reactor (Lemos Chernicharo, 2007).
- **Dispositivos de control de lodos:** utilizado principalmente para el monitoreo del crecimiento y la calidad del manto de lodos en el reactor (Lemos Chernicharo, 2007).

Figura B4. Esquema reactor UASB



Fuente: Adaptado de Brault et al. (2022)

B.4.2. ASPECTOS TÉCNICOS

NIVEL DE TRATAMIENTO RECOMENDADO

Los reactores UASB son comúnmente empleados en el tratamiento primario de aguas residuales (AR), ya que poseen la capacidad de tratar eficientemente AR con altas concentraciones de sólidos suspendidos (Lemos Chernicharo, 2007).

POBLACIÓN RECOMENDADA

Los reactores UASB tienen la capacidad de tratar aguas residuales generadas desde grupos de viviendas hasta grandes ciudades. No obstante, se desaconseja su implementación en comunidades sin suministro eléctrico estable (Brault et al., 2022; Tilley et al., 2014).

ÁREA SUPERFICIAL

Según Lemos Chernicharo (2007), se estima que los reactores UASB requieren de 0.03 a 0.1 m² por habitante equivalente.

REMOCIÓN DE CONTAMINANTES

En las Tabla 1 y Tabla 2 se presentan distintas eficiencias remoción de sólidos suspendidos, materia orgánica y nutrientes encontradas para los reactores UASB.

Tabla 1. Remociones de sólidos suspendidos y materia orgánica en reactores UASB

| Parámetro | | | SST (mg/l-1) | | | | DBO ₅ (mg/l-1) | | | | DQO (mg/l-1) | | | |
|---------------------------|----------------------|--------|--------------|--------|------------|--------|---------------------------|--------|------------|--------|--------------|--------|------------|--------|
| Fuente | Nivel de tratamiento | Escala | Entrada | Salida | % remoción | N | Entrada | Salida | % remoción | N | Entrada | Salida | % remoción | N |
| Peña et al. (2000) | Primario | Real | 72.00 | 22.32 | 69.00 | 25 | 69.00 | 15.18 | 78.00 | 12 | 72.00 | 22.32 | 69.00 | 28 |
| Chernicharo et al. (2015) | Primario | Real | 127.00 | 60.96 | 52.00 | D.N.R. | 64.00 | 19.84 | 69.00 | D.N.R. | 237.00 | 113.76 | 52.00 | D.N.R. |
| Nada et al. (2011) | Primario | Real | 63.00 | 9.45 | 85.00 | D.N.R. | 83.00 | 24.90 | 70.00 | D.N.R. | 221.00 | 64.09 | 71.00 | D.N.R. |
| Cecconet et al. (2022) | Primario | Real | 458.00 | 142.00 | 66.80 | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | 756.00 | 234.00 | 66.40 | D.N.R. |

Notas: SST= Sólidos Suspendidos Totales; DBO₅=Demanda Bioquímica de Oxígeno; DQO= Demanda Química de Oxígeno; D.N.R: Dato no reportado; N= número de muestra.

Tabla 2. Remociones de nutrientes en reactores UASB

| Parámetro | | | NH ₄ -N (mg/l-1) | | | | NT (mg/l-1) | | | | PT (mg/l-1) | | | |
|------------------------|----------------------|--------|-----------------------------|--------|------------|--------|-------------|--------|------------|--------|-------------|--------|------------|--------|
| Fuente | Nivel de tratamiento | Escala | Entrada | Salida | % remoción | N | Entrada | Salida | % remoción | N | Entrada | Salida | % remoción | N |
| Cecconet et al. (2022) | Primario | Real | 48.00 | 61.00 | -27.08 | D.N.R. | 69.00 | 76.00 | -10.14 | D.N.R. | 9.00 | 8.50 | 5.56 | D.N.R. |

Nota: NH₄-N = Nitrógeno amoniacal; NT=Nitrógeno total; PT=Fosforo total; D.N.R: Dato no reportado; N= número de muestra.

OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

A continuación, se presentan distintos aspectos de operación y mantenimiento de los reactores UASB.

- **Puesta en marcha**

El período de arranque del reactor puede variar de 4 a 6 meses si no se utilizan inóculos.

Sin embargo, si se emplean inóculos de otros reactores anaerobios, este tiempo puede reducirse a 2 o 3 semanas, según lo señalado por Lemos Chernicharo (2007).

- **Actividades de operación y mantenimiento**

En la Tabla B23 se pueden observar las principales actividades de operación y mantenimiento de los reactores UASB.

Tabla B23. Activades de operación y mantenimiento en reactores UASB

| Descripción | Frecuencia |
|---|------------|
| Monitoreo de sólidos suspendidos, temperatura y pH antes y después del reactor ¹ . | Diaria |
| Monitoreo de la composición del biogás ¹ . | Diaria |
| Monitoreo de la calidad y cantidad de los lodos ¹ . | Semanal |
| Verificación de dispositivos de alimentación del reactor ¹ . | Diaria |

Fuente: ¹ Lemos Chernicharo (2007)

- **Riesgos asociados**

La operación de los reactores UASB implica la consideración de varios riesgos que requieren atención. Uno de ellos es el pH elevado que puede resultar de los vertimientos de aguas industriales, lo cual puede interferir con el adecuado tratamiento anaerobio (Lemos Chernicharo, 2007). Otro riesgo importante es la proliferación de olores debido a la generación de ácido sulfhídrico (H₂S).

- **Flexibilidad**

Los reactores UASB demuestran una notable resistencia a los picos de carga hidráulica y carga orgánica gracias a su prolongado tiempo de retención de lodos (Lemos Chernicharo, 2007).

CRITERIOS DE DISEÑO

Existen varios aspectos a considerar en el diseño de los reactores UASB. En cuanto a la forma del reactor, se pueden encontrar opciones circulares y rectangulares (Tilley et al., 2014). En términos de costos, los reactores circulares suelen ser más económicos, por lo que son ampliamente utilizados en comunidades de menor tamaño. Otros factores clave en el diseño son: (i) la temperatura, ya que influye en el tiempo de retención hidráulica (Lemos Chernicharo, 2007); (ii) la velocidad de ascenso de las aguas residuales en el reactor (Von Sperling, 2007); y (iii) la velocidad de las AR en las aberturas. En la Tabla 4 se pueden observar diferentes parámetros hidráulicos recomendados para el diseño de reactores UASB. Además, en la Tabla 5 se presentan otros parámetros recomendados para el diseño de esta tecnología.

Tabla B24. Valores de parámetros hidráulicos de diseño recomendados para el diseño de reactores UASB

| parámetro | Unidad | Caudal promedio | Caudal máximo | Caudal pico |
|--|-------------------------------------|-----------------|---------------|-------------|
| Carga hidráulica volumétrica | m ³ /m ³ -día | <4.0 | <6.0 | <7.0 |
| Tiempo de retención hidráulica | horas | 6 a 9 | 4 a 6 | > 3.5 a 4 |
| Velocidad de ascenso | m/hora | 0.5 a 0.7 | <0.9 a 1.1 | <1.5 |
| Velocidad en las aberturas del sedimentador | m/hora | <2.0 a 2.3 | <4.0 a 4.2 | <5.5 a 6.0 |
| Carga superficial en el sedimentador | m/hora | 0.6 a 0.8 | <1.2 | <1.6 |
| Tiempo de retención hidráulica en sedimentador | horas | 1.5 a 2.0 | >1.0 | >0.6 |

Fuente: Adaptado de Lemos Chernicharo (2007)

Tabla B25. Valores de otros parámetros recomendados para el diseño de reactores UASB

| Sistema de distribución | | |
|--|--------|----------------------|
| Parámetro | Unidad | Valores recomendados |
| Diámetro de la tubería de distribución | mm | 75 a 100 |
| Diámetro de la tubería de salida | mm | 40 a 50 |
| Distancia entre la tubería de distribución y el nivel del agua | m | 0.2 a 0.30 |
| Distancia entre la entra la boca de salida y el fondo de reactor | m | 0.10 a 0.15 |

| | | |
|--|--------------------------------------|----------------------|
| Área de influencia de cada tubo de distribución | m ² | 2.0 a 3.0 |
| Colector de biogás | | |
| Parámetro | Unidad | Valores recomendados |
| Tasa de liberación máxima de biogás | m ³ /m ³ -hora | 1 |
| Tasa de liberación mínima de biogás | m ³ /m ³ -hora | 3.0 a 5.0 |
| Porcentaje de concentración de metano | % | 70 a 80 |
| Compartimiento de sedimentación | | |
| Parámetro | Unidad | Valores recomendados |
| Pendiente mínima de las paredes de sedimentación | ° | 45 |
| Pendiente óptima de las paredes de sedimentación | ° | 50 a 60 |
| Profundidad del compartimiento de sedimentación | m | 1.5 a 2.0 |
| Colector del efluente | | |
| Parámetro | Unidad | Valores recomendados |
| Profundidad de sumergimiento del deflector de espuma o del tubo de colección | m | 0.2 a 0.3 |
| Número de canales dentados | unidades/m ² | 1 a 2 |
| Producción y muestreo de lodos | | |
| Parámetro | Unidad | Valores recomendados |
| Tasa de producción de sólidos | kg SST/ kg DQO | 0.10 a 0.20 |
| Densidad de lodos | kg/m ³ | 1020 a 1040 |
| Diámetro de tubería de lodos de descarga | mm | 100 a 150 |
| Diámetro de la tubería de muestreo de lodos | mm | 25 a 50 |

Fuente: Adaptado de Lemos Chernicharo (2007)

POTENCIAL DE ACTUALIZACIÓN

Los reactores UASB presentan un potencial de actualización limitado, especialmente para la remoción mejorada de nutrientes (Brault et al., 2022).

B.4.3. ASPECTOS ECONÓMICOS

A continuación, se presentan distintos aspectos económicos de los reactores UASB.

INVERSIÓN INICIAL

Según Lemos Chernicharo (2007), en el contexto de Brasil la inversión inicial para los reactores UASB en el 2002 generalmente oscilaba entre 12 y 20 USD por habitante equivalente. Para el año

2023, aplicando correcciones según el factor de inflación estos valores oscilan entre 42.25 y 70.42 USD por habitante equivalente.

COSTOS APROXIMADOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

Los costos aproximados de operación y mantenimiento de los Reactores UASB oscilan entre los 1-1.5 dólares por habitante equivalente al año en 2002 para Brasil (Von Sperling, 2007). Las estimaciones para el 2023 teniendo en cuenta la inflación varía entre los 3.5 y 8.8 USD por habitante equivalente al año.

B.4.4. ASPECTOS AMBIENTALES

A continuación, se presentan diferentes aspectos ambientales que presentan los reactores UASB.

CONSUMO ENERGÉTICO

Debido a que los reactores UASB no requieren equipos mecánicos para el tratamiento y pueden funcionar por gravedad, su consumo de energía es generalmente bajo (Von Sperling, 2007).

GENERACIÓN DE OLORES

Es importante considerar la posibilidad de generación de olores debido a la producción de ácido sulfhídrico. Por tanto, se recomienda ubicar los tanques en áreas que no causen molestias a la población o utilizar filtros para controlar los olores (Tilley et al., 2014).

PRODUCCIÓN DE LODOS

Los reactores UASB generan lodos en cantidades reducidas, pero con un alto grado de estabilización (MVCT, 2021). Según Von Sperling (2007), se estima que los reactores UASB producen aproximadamente entre 70 y 220 L de lodo por habitante al año.

GENERACIÓN DE RUIDOS

Debido a que no hacen uso de equipos mecánicos la generación de ruidos por la tecnología es mínima (Tilley et al., 2014).

EMISIONES GASES EFECTO INVERNADERO

Según el estudio realizado por Doorn et al. (2006), los reactores UASB presentan un factor de emisión de aproximadamente 0.48 kg de CH₄ por cada kg de DBO removida.

OPORTUNIDADES APROVECHAMIENTO DE SUBPRODUCTOS

A continuación, se presentan oportunidades de aprovechamiento de los subproductos generados durante el tratamiento mediante reactores UASB.

- **Biogás:** La producción de gas está directamente relacionada con el contenido de materia orgánica presente en las aguas residuales tratadas (Lemos Chernicharo, 2007). En términos generales, suele generarse una cantidad de biogás adecuada para su reutilización (Brault et al., 2022).
- **Biomasa:** La biomasa generada posee un alto grado de estabilización, lo que implica que para su aprovechamiento solo se requiere realizar una etapa de deshidratación. Esta deshidratación se lleva a cabo comúnmente mediante el uso de camas de secado (Andreoli et al., 2007; Lemos Chernicharo, 2007).
- **Reúso del agua:** Es necesario aplicar un tratamiento adicional al efluente para su reutilización. Esto se debe a que los filtros anaerobios presentan una baja capacidad de eliminación de nutrientes y microorganismos patógenos (Brault et al., 2022; Lemos Chernicharo, 2007).

B.4.5. VENTAJAS Y DESVENTAJAS

En Tabla B26 se pueden observar las principales ventajas y desventajas de la implementación de reactores UASB para el tratamiento de AR.

Tabla B26. Ventajas y desventajas de reactores UASB

| Ventajas | Desventajas |
|--|---|
| Bajo consumo energético | Requiere operación y mantenimiento por personal especializado |
| Generación de biogás | Tiempo de arranque relativamente alto. |
| Generación de lodos con un alto nivel de estabilización. | Posible generación de malos olores |

REFERENCIAS

- Andreoli, C. V., Von Sperling, M., & Fernandes, F. (2007). Sludge treatment and disposal. IWA publ.
- Brault, J.-M., Buchauer, K., & Martin, G. (2022). Wastewater Treatment and Reuse: A Guide to Help Small Towns Select Appropriate Options. International Bank for Reconstruction and Development / The World Bank.
- Cecconet, D., Callegari, A., & Capodaglio, A. G. (2022). UASB Performance and Perspectives in Urban Wastewater Treatment at Sub-Mesophilic Operating Temperature. *Water*, 14(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/w14010115>
- Chernicharo, C. A. L., van Lier, J. B., Noyola, A., & Bressani Ribeiro, T. (2015). Anaerobic sewage treatment: State of the art, constraints and challenges. *REVIEWS IN ENVIRONMENTAL SCIENCE AND BIO-TECHNOLOGY*, 14(4, SI), 649–679. <https://doi.org/10.1007/s11157-015-9377-3>
- Doorn, M. R. J., Towprayoon, S., Vieira, S. M. M., Irving, W., Palmer, C., Pipatti, R., & Wang, C. (2006). Wastewater treatment and discharge, 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. *Intergov. Panel Clim. Change*, 61–628.
- Lemos Chernicharo, C. A. de. (2007). Anaerobic reactors. IWA Publ. [u.a.].
- MVCT, M. de V., Ciudad y Territorio. (2021). Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS): TÍTULO E. Tratamiento de Aguas Residuales. Viceministerio de Agua y Saneamiento Básico.
- Nada, T., Moawad, A., El-Gohary, F. A., & Farid, M. N. (2011). Full-scale municipal wastewater treatment by up-flow anaerobic sludge blanket (UASB) in Egypt. *Desalination and Water Treatment*, 30(1–3), 134–145. <https://doi.org/10.5004/dwt.2011.2577>

- Peña, M., Rodriguez, J., Mar, D., & Sepulveda, M. (2000). UASBs or anaerobic ponds in warm climates? A preliminary answer from Colombia. *Water Science and Technology*, 42. <https://doi.org/10.2166/wst.2000.0609>
- Tilley, E., Ulrich, L., Luthi, C., Reymond, P., & Zurbrügg, C. (2014). *Compendium of Sanitation Systems and Technologies*.
- Von Sperling, M. (2007). *Wastewater Characteristics, Treatment and Disposal*. IWA Publishing. <http://www.oapen.org/download?type=document&docid=640137>

B.5. Ficha 5 - HUMEDALES ARTIFICIALES

B.5.1. GENERALIDADES

Descripción

Los humedales artificiales o por sus siglas en inglés CW (Constructed Wetlands) son una tecnología para el tratamiento de aguas residuales que busca emular la depuración de contaminantes que suceden en los humedales naturales (Brault et al., 2022). Los mecanismos de tratamiento incluyen distintos procesos biológicos, físicos y químicos que ocurren a medida que el agua fluye por el humedal y contribuyen a la remoción de materia orgánica, nutrientes, microorganismos patógenos, metales pesados y contaminantes emergentes (Brault et al., 2022; Gorito et al., 2017; Masoud, Alfara, et al., 2022). En la Tabla B27 se presenta un resumen de los principales mecanismos de remoción de carga contaminante que ocurren en los humedales artificiales.

Tabla B27. Mecanismos de remoción de contaminantes en humedales artificiales

| Contaminante | Mecanismos de remoción |
|---------------------------|---|
| Sólidos suspendidos | Sedimentación, filtración |
| Materia orgánica | Sedimentación y filtración para materia orgánica particulada, degradación biológica (aerobia y anaerobia) para materia orgánica disuelta. |
| Nitrógeno | Amonificación, Nitrificación, desnitrificación y absorción por parte de las plantas |
| Fósforo | Reacciones de absorción-precipitación debido a las propiedades del medio poroso y absorción por parte de las plantas. |
| Microorganismos patógenos | Sedimentación, filtración y depredación. |
| Metales pesados | Sedimentación, filtración, adsorción, intercambio de iones, precipitación y metabolismo microbiológico. |

Fuente: Adaptado de Masoud et al. (2022)

El parámetro más popular para la clasificación de los humedales artificiales es el régimen de flujo (Hadidi, 2021). Esta clasificación se divide en dos grupos: los humedales de flujo superficial (HFS)

o de superficie libre y los humedales de flujo subsuperficial (HFSS). Esta última categoría se divide a su vez en los humedales subsuperficiales de flujo horizontal (HFSSH) y humedales subsuperficiales de flujo vertical (HFSSV). En estas distintas variantes los mecanismos ocurren de manera diferente. Por lo tanto, cada variante favorece la remoción de distintos contaminantes sobre otros (Machado et al., 2017). A continuación, se presentarán de manera más detallada los diferentes tipos de humedales mencionados anteriormente.

Humedales de flujo superficial

En los humedales de flujo superficial, el agua residual (AR) fluye sobre el nivel del suelo y entra en contacto con las plantas que pueden estar sujetas al suelo o flotando (Brault et al., 2022). A medida que ocurre este proceso se produce la filtración de sólidos, la degradación biológica y la asimilación de nutrientes (Tilley et al., 2014). En este tipo de humedales, el AR está expuesta a la atmósfera y a la luz solar favoreciendo así procesos de oxigenación y desinfección UV (EPA, 2000; Vymazal, 2013).

Humedales de flujo subsuperficial

Los humedales de más común aplicación son los humedales de flujo subsuperficial, en ellos el agua residual fluye entre 10 y 15 centímetros debajo de la superficie (Shukla et al., 2022). Los humedales de flujo subsuperficial se pueden diseñar bajo condiciones de flujo horizontal y vertical.

Humedales de flujo subsuperficial horizontal

Los humedales de flujo subsuperficial horizontal son los humedales más comunes dentro del régimen subsuperficial, a medida que el AR fluye horizontalmente por el medio filtrante ocurren procesos predominantemente anaerobios y anóxicos (Tilley et al., 2014; Vymazal, 2010).

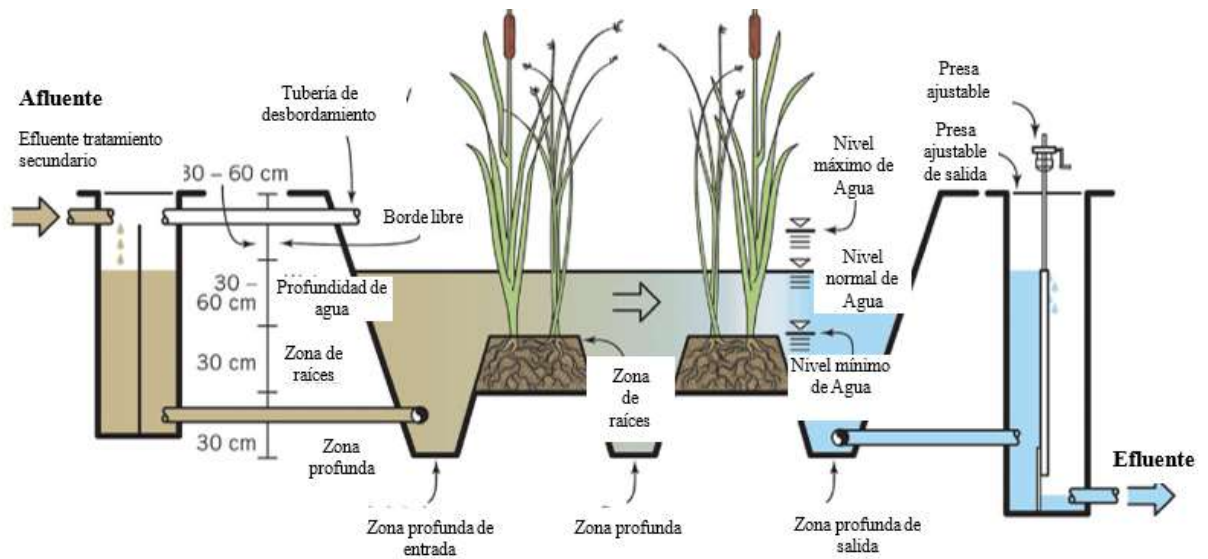
Humedales de flujo subsuperficial vertical

En los humedales subsuperficiales de flujo vertical el afluente es distribuido en la capa superficial de manera uniforme, siendo gradualmente drenada y fluyendo verticalmente a través de todas las capas del humedal (Lana et al., 2013). El bombeo intermitente es necesario para la distribución uniforme que favorece condiciones de oxigenación y la generación de fases aerobias (Brault et al., 2022).

COMPONENTES

A continuación, se presentan componentes importantes de las principales variantes de los humedales artificiales.

- **Humedal de flujo superficial:** El esquema de flujo superficial se puede observar en la Figura B5. A continuación, se presentan los distintos componentes de esta variante.
- **Zona de entrada:** Esta zona se encarga de la distribución uniforme del efluente sobre la zona de tratamiento (USEPA, 2000).
- **Zona de tratamiento:** Compuesta por diferentes subzonas que contienen vegetación que puede ser flotante o fija a sustrato con distintas profundidades (USEPA, 2000). En esta zona ocurren los distintos procesos de depuración de las AR (USEPA, 2000).
- **Zona de salida:** represa de aproximadamente encargada de la regulación de la salida del AR tratada (USEPA, 2000).

Figura B5. Humedales artificiales de flujo superficial

Tomado de: Dotro et al. (2017)

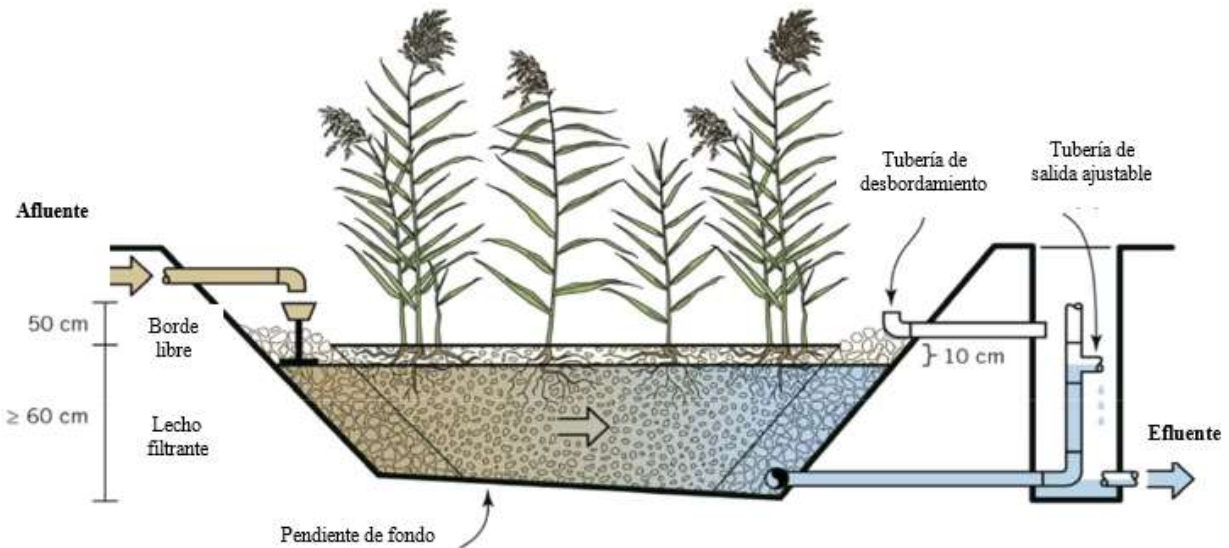
Humedales de flujo subsuperficial horizontal

El esquema de flujo subsuperficial horizontal se puede observar en la B6. A continuación, se presentan los distintos componentes de esta variante.

- **Zona de distribución:** Ubicada a la entrada del humedal compuesto por gravas encargadas de garantizar la distribución uniforme de las AR (Dotro et al., 2017).
- **Lecho filtrante:** Compuesto por el medio filtrante y de soporte de la vegetación, el lecho filtrante puede estar compuesto por grava que sirve de soporte para el desarrollo de la biopelícula y donde ocurren los distintos procesos de depuración (Dotro et al., 2017).
- **Vegetación:** Su principal función es la asimilación de nutrientes y el intercambio de oxígeno (Chek Rani et al., 2011; Kadlec & Wallace, 2008).
- **Zona de recolección:** compuesto por grava de mayor tamaño que la zona filtrante (Dotro et al., 2017).

- **Capa de impermeabilización:** utilizada para evitar filtraciones y contaminación de acuíferos (Dotro et al., 2017).

Figura B6. Humedales artificiales de flujo horizontal



Fuentes: Tomado de Dotro et al. (2017)

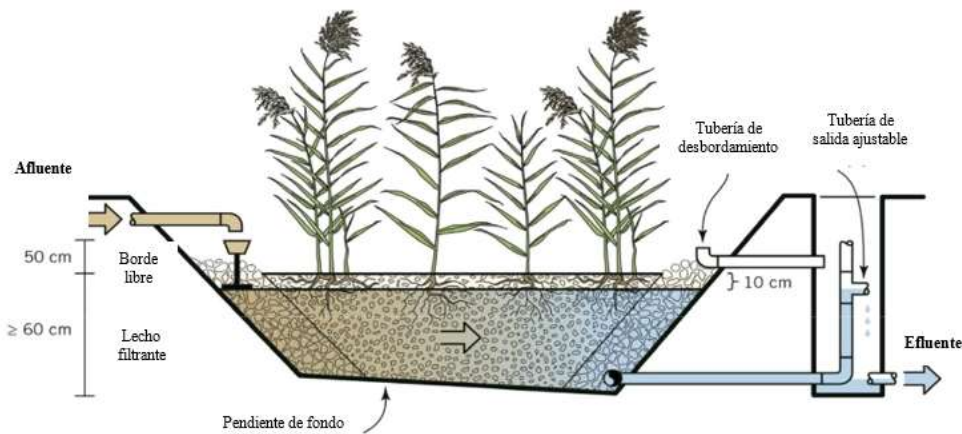
Humedales de flujo subsuperficial vertical

El esquema de flujo subsuperficial vertical se puede observar en la Figura 3. De igual manera, a continuación, se presentan los distintos componentes de esta variante.

- **Sistema de distribución:** Conformado por distintos múltiples con aberturas para la distribución uniforme del afluente (Dotro et al., 2017).
- **Lecho filtrante:** Compuesto por el medio filtrante y de soporte de la vegetación, el lecho filtrante puede estar compuesto por grava que sirve de soporte para el desarrollo de la biopelícula y donde ocurren los distintos procesos de depuración (Dotro et al., 2017).

- **Zona de transición:** Compuesta por una capa de 10 cm espesor con grava de 5-10 mm (UN-HABITAT, 2008).
- **Capa de impermeabilización:** Utilizado para evitar la infiltración de AR (Dotro et al., 2017).
- Capa de drenaje: conformado por grava de 20 a 40 mm (UN-HABITAT, 2008).
- **Tubería de recolección:** múltiple que recolecta agua tratada que favorece igualmente la aireación del efluente (Dotro et al., 2017).

Figura B7. Humedales subsuperficiales de flujo vertical



Tomado de Dotro et al. (2017)

B.5.2. ASPECTOS TÉCNICOS

A continuación, se presentan diferentes aspectos técnicos de los humedales artificiales.

NIVEL DE TRATAMIENTO RECOMENDADO

A continuación, se presentan la etapa de tratamiento a la que se recomienda la aplicación de las diferentes variantes según el régimen de flujo.

- **Humedales de flujo superficial:** Suelen ser utilizados típicamente para el tratamiento terciario, teniendo como fin la remoción mejorada de nutrientes, remoción de sólidos

suspendidos totales generados en tratamientos precedentes y estabilización de concentraciones de carga contaminante (Dotro et al., 2017; Halverson, 2004; Ortega de Miguel, 2010)

- **Humedales subsuperficiales:** Utilizados para el tratamiento secundario y terciario, suelen tener como fin la remoción de materia orgánica y de nutrientes (Dotro et al., 2017; Ortega de Miguel, 2010; Vymazal, 2010).

POBLACIÓN RECOMENDADA

Los humedales artificiales son generalmente utilizados para el tratamiento de AR poblaciones relativamente pequeñas (Dotro et al., 2017). Por ejemplo, estudios en Francia consideran factible su aplicación para poblaciones menores a 5000 habitantes (Dotro et al., 2017). Por su parte, Ortega de Miguel (2010) recomienda la aplicación de esta tecnología en poblaciones inferiores a 1000 habitantes.

ÁREA SUPERFICIAL

- **Humedal de flujo superficial**

Su requerimiento de área superficial es superior respecto a las variantes de flujo subsuperficial (Halverson, 2004). No se encontraron valores de referencia.

- **Humedales flujo subsuperficial horizontal**

A pesar de requerir una menor área para el tratamiento en comparación a los humedales de flujo libre, esta variante cuenta con un requerimiento considerable y mayor que la variante de flujo vertical. El área requerida por habitante para el tratamiento de AR puede oscilar entre 5 - 10 m² por habitante equivalente (Masoud, Alfarrá, et al., 2022). Ortega de Miguel (2010) estimó que

para un tratamiento primario con una efectividad aproximada del 30%, el requerimiento de área ronda los 5 m² por habitante equivalente.

- **Humedales flujo subsuperficial vertical**

Los humedales de flujo subsuperficial tienen un requerimiento de área menor respecto a la variante de flujo horizontal. Esta variante puede tener requerimientos entre 1 y 3 m² por habitante equivalente, dependiendo de la tecnología precedente (Masoud, Alfarrá, et al., 2022). Ortega de Miguel (2010) estimó que con un tratamiento primario previo de efectividad aproximada del 30%, el requerimiento de área ronda los 3 m² por habitante equivalente.

REMOCIÓN DE CONTAMINANTES

En las Tablas B28 a B34 se presentan distintas eficiencias remoción de sólidos suspendidos, materia orgánica, nutrientes y microorganismos patógenos encontradas en la literatura para las distintas variantes de los humedales artificiales.

Tabla B28. Remociones de sólidos suspendidos y materia orgánica en humedales artificiales de flujo superficial

| Parámetro | | | SST (mg/l-1) | | | | DBO ₅ (mg/l-1) | | | | DQO (mg/l-1) | | | |
|-----------------------------|----------------------|--------|--------------|--------|------------|--------|---------------------------|--------|------------|--------|--------------|--------|------------|--------|
| Fuente | Nivel de tratamiento | Escala | Entrada | Salida | % remoción | N | Entrada | Salida | % remoción | N | Entrada | Salida | % remoción | N |
| Vymazal (2010) | Varios | Real | 185.00 | 43.00 | 77.00 | 52 | 161.00 | 42.00 | 72.00 | 50 | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. |
| Vymazal & Kröpfelová (2008) | Varios | Real | 48.20 | 9.30 | 64.40 | 17 | 80.00 | 14.10 | 75.70 | 17 | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. |
| Bulc (2006) | Secundario | Real | 38.30 | 26.20 | 33.00 | D.N.R. | 485.00 | 240.00 | 50.00 | D.N.R. | 76.00 | 28.00 | 59.00 | D.N.R. |
| Kotti et al. (2010) | Primario | Piloto | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | 338.60 | 74.92 | 77.90 | D.N.R. | 582.30 | 184.90 | 68.20 | D.N.R. |
| Jinadasa et al. (2006) | Primario | Piloto | 162.70 | 42.45 | 73.90 | D.N.R. | 60.40 | 23.40 | 61.30 | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. |

Nota: SST = Sólidos Suspendidos Totales; DBO₅= Demanda Bioquímica de Oxígeno; DQO= Demanda Química de Oxígeno; D.N.R: Dato No Reportado; N= Número de datos

Tabla B29. Remociones de nutrientes en humedales artificiales de flujo superficial

| Parámetro | | | NH ₄ -N (mg/l-1) | | | | NT (mg/l-1) | | | | PT (mg/l-1) | | | |
|-----------------------------|----------------------|--------|-----------------------------|--------|------------|--------|-------------|--------|------------|--------|-------------|--------|------------|--------|
| Fuente | Nivel de tratamiento | Escala | Entrada | Salida | % remoción | N | Entrada | Salida | % remoción | N | Entrada | Salida | % remoción | N |
| Vymazal (2010) | Varios | Real | 30.00 | 16.00 | 48.00 | 50 | 42.60 | 23.50 | 45.00 | 29 | 14.70 | 9.70 | 34.00 | 52 |
| Vymazal & Kröpfelová (2008) | Varios | Real | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | 14.60 | 6.60 | 59.50 | 17 | 3.80 | 2.20 | 46.70 | D.N.R. |
| Bulc (2006) | Secundario | Real | 496.00 | 247.00 | 51.00 | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | 2.30 | 1.00 | 53.00 | D.N.R. |
| Kotti et al. (2010) | Primario | Piloto | 39.50 | 18.26 | 53.80 | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | 8.90 | 4.24 | 52.40 | D.N.R. |
| Jinadasa et al. (2006) | Primario | Piloto | 13.30 | 4.45 | 66.50 | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | 1.68 | 1.40 | 17.00 | D.N.R. |

Nota: NH₄-N = Nitrógeno amoniacal; NT= Nitrógeno total; PT= Fosforo total; D.N.R: Dato no reportado; N= Número de datos

Tabla B30. Remociones de sólidos suspendidos y materia orgánica en humedales artificiales de flujo subsuperficial de flujo horizontal

| Parámetro | | | SST (mg/l-1) | | | | DBO ₅ (mg/l-1) | | | | DQO (mg/l-1) | | | |
|------------------------|----------------------|------------|--------------|--------|------------|--------|---------------------------|--------|------------|--------|--------------|--------|------------|--------|
| Fuente | Nivel de tratamiento | Escala | Entrada | Salida | % remoción | N | Entrada | Salida | % remoción | N | Entrada | Salida | % remoción | N |
| Datta et al. (2021) | Secundario | Real | 52.00 | 7.20 | 86.00 | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | 240.00 | 92.30 | 61.54 | D.N.R. |
| Vymazal (2010) | Varios | Real | 141.00 | 35.00 | 75.00 | D.N.R. | 170.00 | 42.00 | 75.00 | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. |
| Mburu et al. (2013) | Secundario | Piloto | 103.10 | 26.59 | 74.20 | 44 | 73.60 | 31.39 | 57.30 | 16 | 159.50 | 90.51 | 43.30 | 68 |
| Song et al. (2009) | Secundario | Piloto | D.N.R. | D.N.R. | 27.80 | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | 23.80 | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | 91.00 | D.N.R. |
| da Costa et al. (2013) | Piloto | Secundario | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | 83.00 | 25.00 | 69.90 | D.N.R. | 179.00 | 50.00 | 72.10 | D.N.R. |

Nota: SST = Sólidos Suspendidos Totales; DBO₅= Demanda Bioquímica de Oxígeno; DQO= Demanda Química de Oxígeno; D.N.R: Dato No Reportado; N= Número de datos

Tabla B31. Remociones de nutrientes en humedales artificiales de flujo subsuperficial de flujo horizontal

| Parámetro | | | NH ₄ -N (mg/l-1)1 | | | | NT (mg/l-1) 2 | | | | PT (mg/l-1)3 | | | |
|------------------------|----------------------|--------|------------------------------|--------|------------|--------|---------------|--------|------------|--------|--------------|--------|------------|--------|
| Fuente | Nivel de tratamiento | Escala | Entrada | Salida | % remoción | N | Entrada | Salida | % remoción | N | Entrada | Salida | % remoción | N |
| Datta et al. (2021) | Secundario | Real | 34.66 | 14.37 | 58.54 | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. |
| Vymazal (2010) | Varios | Real | 36.00 | 22.00 | 14.10 | D.N.R. | 63.00 | 36.00 | D.N.R. | D.N.R. | 9.60 | 4.80 | 50.00 | D.N.R. |
| Mburu et al. (2013) | Secundario | Piloto | 25.80 | 18.92 | 26.70 | 32 | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | 3.60 | 2.59 | 28.20 | 14 |
| Song et al. (2009) | Secundario | Piloto | D.N.R. | D.N.R. | 11.30 | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | 3.00 | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. |
| da Costa et al. (2013) | Secundario | Piloto | 29.00 | 27.00 | 6.90 | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | 3.20 | 2.30 | 28.10 | D.N.R. |

Nota: NH₄-N = Nitrógeno amoniacal; NT= Nitrógeno total; PT= Fosforo total; D.N.R: Dato no reportado; N= Número de datos

Tabla B32. Remociones de microorganismos patógenos en humedales artificiales de flujo subsuperficial de flujo horizontal

| Parámetro | | | Coliformes fecales UFC 100 ml-1 | | | | Coliformes Totales UFC 100 ml-1 | | | |
|---------------------|----------------------|--------|---------------------------------|--------|------------|--------|---------------------------------|--------|------------|--------|
| Fuente | Nivel de tratamiento | Escala | Entrada | Salida | % remoción | N | Entrada | Salida | % remoción | N |
| Datta et al. (2021) | Secundario | Real | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | 92.70 | D.N.R. |

Notas: N= Número de datos; D.N.R: Dato no reportado.

Tabla B33. Remociones de sólidos suspendidos y materia orgánica en humedales artificiales de flujo subsuperficial de flujo verticales

| Parámetro | | | SST (mg/l-1) | | | | DBO ₅ (mg/l-1) | | | | DQO (mg/l-1) | | | |
|------------------------|----------------------|--------|--------------|--------|------------|--------|---------------------------|--------|------------|--------|--------------|--------|------------|--------|
| Fuente | Nivel de tratamiento | Escala | Entrada | Salida | % remoción | N | Entrada | Salida | % remoción | N | Entrada | Salida | % remoción | N |
| Vymazal (2010) | Varios | Real | 164.00 | 18.00 | 89.00 | 98 | 274.00 | 28.00 | 90.00 | 125 | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. |
| Sezerino et al. (2012) | Secundario | Piloto | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | 20 | 280.00 | 44.00 | 23.80 | 13 | 367 | 64.3 | 23.8 | 22 |
| Wu et al., (2013) | Primario | Piloto | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | 106.94 | 19.74 | 81.03 | 100 |
| Rahi et al. (2020) | Secundario | Piloto | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | 12 | 145 | 19.8 | 86.30 | 12 | 281 | 38.4 | 86.30 | 12 |
| Decezaró et al. (2018) | Secundario | Piloto | 91.00 | 44.00 | 51.60 | 20 | 55 | 39 | 29.10 | 20 | 323 | 117 | 63.80 | 20 |

Nota: SST = Sólidos Suspendidos Totales; DBO₅= Demanda Bioquímica de Oxígeno; DQO= Demanda Química de Oxígeno; D.N.R.: Dato No Reportado; N= Número de datos

Tabla B34. Remociones de sólidos suspendidos y materia orgánica en humedales artificiales de flujo subsuperficial de flujo verticales

| Parámetro | | | NH ₄ -N (mg/l-1) | | | | NT (mg/l-1) | | | | PT (mg/l-1) | | | |
|------------------------|----------------------|--------|-----------------------------|--------|------------|-----|-------------|--------|------------|--------|-------------|--------|------------|--------|
| Fuente | Nivel de tratamiento | Escala | Entrada | Salida | % remoción | N | Entrada | Salida | % remoción | N | Entrada | Salida | % remoción | N |
| Vymazal (2010) | Varios | Real | 56.00 | 14.90 | 73.00 | 129 | 73.00 | 41.00 | 43.00 | 99 | 10.30 | 4.50 | 56.00 | 118 |
| Sezerino et al. (2012) | Secundario | Piloto | 57.90 | 48.40 | 23.80 | 20 | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. |
| Wu et al. (2013) | Primario | Piloto | 8.34 | 4.80 | 42.50 | 100 | 11.54 | 5.53 | 51.60 | 100 | 1.00 | 0.32 | 68.01 | 100 |
| Rahi et al. (2020) | Secundario | Piloto | 89.90 | 16.00 | 82.20 | 12 | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. |
| Decezaró et al. (2018) | Secundario | Piloto | 59.00 | 24.00 | 59.30 | 20 | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. |

Nota: NH₄-N = Nitrógeno amoniacal; NT= Nitrógeno total; PT= Fosforo total; D.N.R.: Dato no reportado; N= Número de datos

OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

A continuación, se presentan distintos aspectos de operación y mantenimiento de los Humedales Artificiales.

- **Puesta en marcha**

La etapa de arranque y de estabilización del sistema se extiende durante aproximadamente un ciclo vegetativo, siendo necesario el desarrollo de la zona radicular a las plantas y la colonización de biomasa en el sustrato (Ortega de Miguel, 2010).

- **Actividades de operación y mantenimiento**

En la Tabla B35 se pueden observar las principales actividades de operación y mantenimiento de los humedales artificiales.

Tabla B35. Principales actividades de mantenimiento en humedales artificiales

| Descripción | Frecuencia |
|--|------------------------|
| Inspección general: comprobación de correcta distribución y de salida ¹ | 1 - 2 veces por semana |
| Limpieza tuberías de distribución ¹ | 1 vez por mes |
| Siega de plantas ¹ | 1 vez al año |
| Control de permeabilidad del sustrato ¹ | 1 vez al año |
| Evacuación residuos poda ¹ | 1 vez al año |
| Mantenimiento obra civil ¹ | 2 veces por mes |
| Reemplazar lecho filtrante (Humedales de flujo subsuperficial) ² | Cada 10 años |

Nota: ¹Ortega de Miguel (2010); ² Dotro et al. (2017)

- **Riesgos asociados**

Humedal de flujo superficial: Los principales problemas potenciales de esta variante son la proliferación de mosquitos y animales debido al inadecuado mantenimiento, y el riesgo por exposición al contacto con el AR cruda (Dotro et al., 2017).

Humedales subsuperficiales de flujo horizontal: Los principales riesgos asociados a los humedales de flujo subsuperficial horizontal son obstrucción del sistema por arrastre de sólidos de tratamientos precedentes y el uso de material filtrante no adecuado (Dotro et al., 2017).

Humedales subsuperficiales de flujo vertical: Los principales riesgos asociados a los humedales de flujo subsuperficial horizontal son obstrucción del sistema por arrastre de sólidos de tratamientos precedentes, pendiente no uniforme de la superficie y el uso de material filtrante no adecuado (Dotro et al., 2017).

- **Flexibilidad**

En esta sección se presenta la tolerancia a cambios de carga contaminante e hidráulica de las distintas variantes de los humedales superficiales.

Humedal de flujo superficial: Debido a su alto tiempo de retención hidráulica se adapta de buena manera a picos de carga hidráulica y orgánica siempre y cuando sean puntuales (Ortega de Miguel, 2010).

Humedales subsuperficiales de flujo horizontal: Debido a su alto tiempo de retención hidráulica se adapta de buena manera a picos de carga hidráulica y orgánica siempre y cuando sean puntuales (Ortega de Miguel, 2010).

Humedales subsuperficiales de flujo vertical: La capacidad de adaptación a las sobrecargas hidráulicas y orgánicas es limitada debido a su corto tiempo de retención en comparación a otras variantes (Ortega de Miguel, 2010).

CONSIDERACIONES DE DISEÑO

Existen diferentes formas de dimensionar los humedales artificiales, entre los enfoques más comunes se encuentran la regla general, las ecuaciones de regresión, ecuaciones de flujo a pistón $k-C^*$, curvas de carga y ecuaciones $P-k-C^*$. A continuación, se presentan con mayor detalle cada uno de los enfoques de diseño.

- **Regla general**

Este enfoque consiste en una tasa recomendada de área superficial por habitante ($m^2/habitante$), aunque también puede ser dada en función de carga por área ($g\ DBO_5/m^2-día$). A pesar de la practicidad de esta forma de diseño, es necesario tener en cuenta que estas recomendaciones no son completamente extrapolables en contextos con diferentes condiciones (p.ej. pretratamiento, volumen de AR generadas, condiciones climáticas, etc). En la Tabla B36 se presentan recomendaciones siguiendo este enfoque para diferentes países.

Tabla B36. Recomendaciones de diseño de la regla general

| País | Variante | Área superficial específica [$m^2/h.e$] | Fuente |
|-----------|----------|--|------------------------|
| Alemania | HA FFV | 4 | DWA-A 262 (2017) |
| Austria | HA FSV | 4 | ÖNORM B 2505 (2009) |
| Dinamarca | HA FSH | 5 | Brix & Johansen (2004) |
| Dinamarca | HA FSV | 3 | Brix & Johansen (2004) |

Nota: HA FSH= Humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal; HA FSV= Humedal artificial de flujo subsuperficial vertical; h.e: Habitantes equivalentes

Fuente: Adaptado de Dotro et al. (2017)

- **Ecuaciones de regresión**

En este enfoque se utilizan distintas ecuaciones generadas a partir de colecciones de datos. Estas ecuaciones producen un estimado de concentración del efluente a partir de datos como la carga orgánica o la concentración. En la Tabla B37 se pueden observar las distintas ecuaciones generadas a partir de regresiones para el diseño de humedales artificiales.

Tabla B37. Ejemplo de ecuaciones de regresión utilizadas para el diseño de humedales artificiales

| Fuente | Parámetro de diseño | Contaminante | Ecuación | Rango de entrada | Rango de salida | R ² |
|-----------------------|---------------------------|------------------|-------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------|
| Vymazal et al. (1998) | Carga másica [kg/hab-día] | DBO ₅ | $M_0 = 0.13M_i + 0.27$ | 6 < M _i < 76 | 6 < M ₀ < 76 | 0.85 |
| | | DQO | $M_0 = 0.17M_i + 5.78$ | 15 < M _i < 180 | 3 < M ₀ < 41 | 0.74 |
| | | SST | $M_0 = 0.048M_i + 4.70$ | 3 < M _i < 78 | 0 < M ₀ < 60 | 0.42 |
| | | NT | $M_0 = 0.67M_i - 18.75$ | 300 < M _i < 2400 | 200 < M ₀ < 1550 | 0.96 |
| | | PT | $M_0 = 0.58M_i - 4.09$ | 25 < M _i < 320 | 6 < M ₀ < 76 | 0.61 |
| Brix (1994) | Concentración [mg/L] | DBO ₅ | $C_0 = 0.1C_i + 1.87$ | 1 < C _i < 50 | 1 < C ₀ < 50 | 0.74 |
| | | SST | $C_0 = 0.09C_i + 0.27$ | 0 < C _i < 330 | 0 < C ₀ < 60 | 0.67 |
| | | PT | $C_0 = 0.65C_i + 0.71$ | 0.5 < C _i < 19 | 0.5 < C ₀ < 14 | 0.75 |

Nota: DBO₅= Demanda Bioquímica de Oxígeno; DQO= Demanda Química de Oxígeno; SST= Sólidos Suspendidos Totales; NT= Nitrógeno Total; PT= fosforo Total; M_i=Carga másica inicial; M₀=Carga másica de salida; C₀= Concentración de entrada; C_i= Concentración de salida.

Fuente: Adaptado de Dotro et al. (2017)

- **Curvas de carga de masa**

Las curvas de carga de masa son un enfoque que permite realizar el dimensionamiento de un humedal en base a su carga contaminante, concentración del efluente deseada y el nivel de riesgo permitido (Dotro et al., 2017). Por ejemplo, Wallace (2006) presenta distintas curvas de diseño para humedales de flujo superficial y subsuperficial de flujo horizontal. A pesar de que este enfoque tiene en cuenta distintos parámetros del contexto como la concentración inicial y el caudal de entrada, estos modelos no consideran coeficientes de reacción ni corrección por temperatura (Dotro et al., 2017).

- **Ecuaciones de flujo pistón k-C***

Este enfoque utiliza ecuaciones que asumen flujo pistón y tiene como variables la concentración del afluente y efluente, además de la concentración de fondo (concentración residual correspondiente al límite inferior al que se aproxima el modelo en lugar de cero (Stein et al., 2006)). A través de la aplicación de cálculo se puede obtener el área requerida. Sin embargo, la asunción del flujo ideal suele ser considerada imprecisa (Kadlec & Vymazal, 2000).

- **Ecuación P-k-C***

El modelo P-k-C* o de tanque en series asume que en el humedal el tratamiento de AR sucede como si fuese un numero finito de reactores en serie donde la concentración de cada contaminante es reducida al pasar por cada reactor (Gajewska & Skrzypiec, 2018). Este modelo considera la concentración del contaminante, la concentración de fondo, el coeficiente de reacción y el numero aparente de reactores en serie.

POTENCIAL DE ACTUALIZACIÓN

Los humedales artificiales pueden ser modificados para reducir área requerida hidráulico y para mejorar sus remociones de nitrógeno (Butterworth et al., 2016; Ilyas & Masih, 2017). Sin embargo, estos cambios implican dificultades operaciones e inversiones económicas (Brault et al., 2022).

B.5.3. ASPECTOS ECONÓMICOS

A continuación, se presentan distintos aspectos económicos relacionados con la implementación de humedales artificiales.

INVERSIÓN INICIAL

El costo de construcción de los humedales artificiales incluye (Vymazal, 2010; Wallace, 2006):

- Adquisición de terrenos
- Análisis de suelos
- Diseño del sistema
- Obras de tierra
- Impermeabilización
- Construcción de bermas
- Lecho filtrante (en el caso de humedales de flujo subsuperficial)

- Estructuras de control hidráulico
- Costos misceláneos (Cercado, vías de acceso)

El costo total de construcción cambia dependiendo del contexto, para el año 2010, variaba desde 29 USD por m² construido en India hasta los 280 USD por m² construido en Bélgica (Billore et al., 1999; L. Rousseau et al., 2004; Vymazal, 2010). Después de aplicar factores de corrección de inflación, para el año 2023, la inversión oscila entre 79.51 y 632 USD. La inversión inicial está influenciada principalmente por el área requerida y el material de lecho filtrante en el caso de los humedales artificiales de flujo subsuperficial (Wallace, 2006). Por ejemplo, Vymazal & Kröpfelová (2008) estimaron que para humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal la adquisición del material filtrante puede representar entre un 27% y 53% de la inversión total

COSTOS APROXIMADOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

Los costos de operación y mantenimiento de los humedales artificiales varían dependiendo del contexto local y factores como el salario de los trabajadores. En el caso de países tropicales en desarrollo, Von Sperling & Chernicharo (2005) estimaron que para Brasil este costo puede variar entre 1.0 y 1.5 USD por habitante equivalente al año. Por otro lado, Ortega de Miguel (2010) realizó estimaciones para el contexto español de costes unitarios de operación y mantenimiento de 52, 26 y 20 USD por habitante equivalente al año para humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal tratando AR de poblaciones de 100, 500 y 1000 habitantes, respectivamente. Después de la aplicación de los factores de corrección por inflación, se estima que los costos pueden oscilar entre 3.5 y 5.28 USD por habitante equivalente para el contexto de Brasil. Mientras que, para el contexto valores pueden oscilar entre 26.15 y 67.98 USD por habitante equivalente.

B.5.4. ASPECTOS AMBIENTALES

A continuación, se presentan diferentes aspectos ambientales asociados a los humedales artificiales.

CONSUMO ENERGÉTICO

El consumo energético de los humedales artificiales es relativamente bajo debido a que estos no requieren equipos mecánicos para el tratamiento y pueden funcionar por gravedad (Ortega de Miguel, 2010). En el caso de ser necesario utilizar bombeo, los equipos serán de potencia reducida (Ortega de Miguel, 2010).

GENERACIÓN DE OLORES

Los humedales en general presentan un bajo riesgo a la producción de olores si la operación y el mantenimiento son realizados de manera adecuada (Dotro et al., 2017), especialmente en humedales de flujo subsuperficial debido a que las AR no son expuestas directamente (Halverson, 2004).

PRODUCCIÓN DE LODOS

La mayor parte de la biomasa generada en los humedales está formada por plantas, las cuales necesitan ser removidas periódicamente (Andreoli et al., 2007) y se estima que su producción de biomasa es del orden de 4 kg/m² al año.

GENERACIÓN DE RUIDOS

El impacto sonoro es nulo o muy bajo, debido a que puede llegar a operar sin la implantación de equipos electromecánicos, y porque en los casos en que se recurre a desbastes automáticos, o a la alimentación de los humedales mediante bombeo, la potencia instalada es muy baja (Ortega de Miguel, 2010).

EMISIONES GASES EFECTO INVERNADERO

Los humedales artificiales pueden ser vistos como depósitos de carbono (Kadlec & Wallace, 2008). Sin embargo, durante el proceso de tratamiento pueden ser liberados a la atmósfera gases de efecto invernadero. A pesar de esto, el aporte de gases de efecto invernadero de los humedales no es remarcable (Liikanen et al., 2006). Según el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC (2014), el factor de emisiones de gas metano de los humedales artificiales es de aproximadamente 0.25 kg CH₄/ kg DBO tratado (Noyola et al., 2016).

APROVECHAMIENTO DE SUBPRODUCTOS

- **Biogás**

No se genera cantidad considerable de biogás durante el proceso de depuración de las AR.

- **Biomasa**

Se generan lodos con un grado de estabilización relativamente alto (Andreoli et al., 2007). Además, el material podado tiene potencial de ser usado en actividades pecuarias y para la generación de energía (Masoud, Alfara, et al., 2022).

- **Reúso del agua**

Uno de los principales usos que se da a las AR tratadas mediante humedales artificiales es la irrigación (Kumar et al., 2022). Por ejemplo, los humedales de flujo subsuperficial horizontal pueden generar aguas ricas en nutrientes con potencial para la irrigación

- **Otras formas**

Puede obtenerse beneficio económico a través de la venta de la vegetación (Masoud, Belotti, et al., 2022). Los efluentes de los humedales flujo horizontal, debido a la remoción de nutrientes y

potencial de remoción de microorganismos patógenos, pueden ser utilizados para riego, limpieza de exteriores (Kumar et al., 2022).

B.5.4. VENTAJAS Y DESVENTAJAS

A continuación, en la Tabla B38, se presenta a manera de resumen principales ventajas y desventajas de las distintas variantes de los humedales presentadas anteriormente.

Tabla B38. Ventajas y desventajas de las diferentes variantes de humedales artificiales

| Ventajas | Desventajas |
|--|--|
| Bajo requerimiento energético | Alto requerimiento de área superficial |
| Remociones altas de materia orgánica y sólidos suspendidos | Riesgo de obstrucción del material filtrante |
| Operación y mantenimiento sencillo | |

REFERENCIA

- Andreoli, C. V., Von Sperling, M., & Fernandes, F. (2007). Sludge treatment and disposal. IWA publ.
- Billore, S. K., Singh, N., Sharma, J. K., Dass, P., & Nelson, R. M. (1999). Horizontal subsurface flow gravel bed constructed wetland with *Phragmites karka* in Central India. *Water Science and Technology*, 40(3), 163–171. [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(99\)00461-8](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(99)00461-8)
- Brault, J.-M., Buchauer, K., & Martin, G. (2022). Wastewater Treatment and Reuse: A Guide to Help Small Towns Select Appropriate Options. International Bank for Reconstruction and Development / The World Bank.
- Brix, H. (1994). Constructed wetlands for municipal wastewater treatment in Europe. *Global Wetlands; Old World and New*. Elsevier, Amsterdam, 325–334.
- Brix, H., & Johansen, N. H. (2004). Retningslinier for etablering af beplantede filteranlæg op til 30 PE. *Økologisk Byfornyelse og Spildevandsrensning*. Miljøstyrelsen (in Danish) 52, 1-48.

- Bulc, T. G. (2006). Long term performance of a constructed wetland for landfill leachate treatment. *Ecological Engineering*, 26(4), 365–374. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2006.01.003>
- Butterworth, E., Richards, A., Jones, M., Dotro, G., & Jefferson, B. (2016). Assessing the potential for tertiary nitrification in sub-surface flow constructed wetlands. *Environmental Technology Reviews*, 5(1), 68–77. <https://doi.org/10.1080/21622515.2016.1188998>
- Chek Rani, S. H., Md. Din, M. F., Mohd. Yusof, B., & Chelliapan, S. (2011). Overview of subsurface constructed wetlands application in tropical climates. *Universal Journal of Environmental Research and Technology*, 1(2), Article 2.
- da Costa, J. F., de Paoli, A. C., Seidl, M., & von Sperling, M. (2013). Performance and behaviour of planted and unplanted units of a horizontal subsurface flow constructed wetland system treating municipal effluent from a UASB reactor. *Water Science and Technology*, 68(7), 1495–1502. <https://doi.org/10.2166/wst.2013.391>
- Datta, A., Singh, H. O., Raja, S. K., & Dixit, S. (2021). Constructed wetland for improved wastewater management and increased water use efficiency in resource scarce SAT villages: A case study from Kothapally village, in India. *International Journal of Phytoremediation*, 23(10), 1067–1076. Scopus. <https://doi.org/10.1080/15226514.2021.1876627>
- Dotro, G., Langergraber, G., Molle, P., Nivala, J., Puigagut, J., & Stein, O. (2017). *Biological Wastewater Treatment Series, Volume 7: Treatment Wetlands*.
- DWA-A 262. (2017). *Principles for Dimensioning, Construction and Operation of Wastewater Treatment Plants with Planted and Unplanted Filters for Treatment of Domestic and Municipal Wastewater*.
- EPA. (2000). *Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters*.

- Gajewska, M., & Skrzypiec, K. (2018). Kinetics of nitrogen removal processes in constructed wetlands. *E3S Web of Conferences*, 26, 00001. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20182600001>
- Gorito, A. M., Ribeiro, A. R., Almeida, C. M. R., & Silva, A. M. T. (2017). A review on the application of constructed wetlands for the removal of priority substances and contaminants of emerging concern listed in recently launched EU legislation. *Environmental Pollution*, 227, 428–443. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.04.060>
- Hadidi, L. A. (2021). CONSTRUCTED WETLANDS A COMPREHENSIVE REVIEW. *International Journal of Research -GRANTHAALAYAH*, 9(8), Article 8. <https://doi.org/10.29121/granthaalayah.v9.i8.2021.4176>
- Halverson, N. (2004). Review of Constructed Subsurface Flow vs. Surface Flow Wetlands (WSRC-TR-2004-00509). Savannah River Site (SRS), Aiken, SC (United States). <https://doi.org/10.2172/835229>
- Ilyas, H., & Masih, I. (2017). Intensification of constructed wetlands for land area reduction: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(13), 12081–12091. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8740-z>
- IPPC. (2014). 2013 supplement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: Wetlands : methodological guidance on lands with wet and drained soils, and constructed wetlands for wastewater treatment. *Ipcc, Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- Jinadasa, K. B. S. N., Tanaka, N., Mowjood, M. I. M., & Werellagama, D. R. I. B. (2006). Free water surface constructed wetlands for domestic wastewater treatment: A tropical case

- study. *Chemistry and Ecology*, 22(3), 181–191.
<https://doi.org/10.1080/02757540600658849>
- Kadlec, R. H., & Vymazal, J. C. (2000). *Constructed wetlands for pollution control: Processes, performance, design and operation*. IWA Publishing.
- Kadlec, R. H., & Wallace, S. (2008). *Treatment Wetlands* (2nd ed.). CRC Press.
<https://doi.org/10.1201/9781420012514>
- Kotti, I. P., Gikas, G. D., & Tsihrintzis, V. A. (2010). Effect of operational and design parameters on removal efficiency of pilot-scale FWS constructed wetlands and comparison with HSF systems. *Ecological Engineering*, 36(7), 862–875.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2010.03.002>
- Kumar, S., Pratap, B., Dubey, D., & Dutta, V. (2022). Integration of Constructed Wetland Microcosms with Available Wastewater Treatment Technologies for the Polishing of Domestic Wastewater and Their Potential Reuses. *International Journal of Environmental Research*, 16(6), 99. <https://doi.org/10.1007/s41742-022-00485-8>
- L. Rousseau, D. P., Vanrolleghem, P. A., & Pauw, N. D. (2004). Constructed wetlands in Flanders: A performance analysis. *Ecological Engineering*, 23(3), 151–163.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2004.08.001>
- Lana, L. C. O., Moraes, D. C., von Sperling, M., Morato, M. L. N., Vasconcellos, G. R., Paraense, M. O., & Moreira, T. P. A. (2013). Performance of a single stage vertical flow constructed wetland system treating raw domestic sewage in Brazil. *Water Science and Technology: A Journal of the International Association on Water Pollution Research*, 68(7), 1599–1606.
<https://doi.org/10.2166/wst.2013.408>

- Liikanen, A., Huttunen, J. T., Karjalainen, S. M., Heikkinen, K., Väisänen, T. S., Nykänen, H., & Martikainen, P. J. (2006). Temporal and seasonal changes in greenhouse gas emissions from a constructed wetland purifying peat mining runoff waters. *Ecological Engineering*, 26(3), 241–251. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2005.10.005>
- Machado, A. I., Beretta, M., Fragoso, R., & Duarte, E. (2017). Overview of the state of the art of constructed wetlands for decentralized wastewater management in Brazil. *Journal of Environmental Management*, 187, 560–570. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.11.015>
- Masoud, A. M. N., Alfarra, A., & Sorlini, S. (2022). Constructed Wetlands as a Solution for Sustainable Sanitation: A Comprehensive Review on Integrating Climate Change Resilience and Circular Economy. *Water*, 14(20), Article 20. <https://doi.org/10.3390/w14203232>
- Masoud, A. M. N., Belotti, M., Alfarra, A., & Sorlini, S. (2022). Multi-criteria analysis for evaluating constructed wetland as a sustainable sanitation technology, Jordan case study. *Sustainability (Switzerland)*, 14(22). <https://doi.org/10.3390/su142214867>
- Mburu, N., Tebitendwa, S. M., Rousseau, D. P. L., van Bruggen, J. J. A., & Lens, P. N. L. (2013). Performance Evaluation of Horizontal Subsurface Flow–Constructed Wetlands for the Treatment of Domestic Wastewater in the Tropics. *Journal of Environmental Engineering*, 139(3), 358–367. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0000636](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000636)
- Noyola, A., Paredes, M. G., Morgan-Sagastume, J. M., & Güereca, L. P. (2016). Reduction of Greenhouse Gas Emissions From Municipal Wastewater Treatment in Mexico Based on Technology Selection: *Water. CLEAN - Soil, Air, Water*, 44(9), 1091–1098. <https://doi.org/10.1002/clen.201500084>

- ÖNORM B 2505. (2009). Stations d'épuration—Sols filtrants végétaux alimentés de manière intermittente (installations d'épuration végétales)—Application, conception, installation, service et inspection. Australian Standards.
- Ortega de Miguel, E. (2010). Manual para la implantación de sistemas de depuración en pequeñas poblaciones. Ministerio Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.
- Shukla, A., Parde, D., Gupta, V., Vijay, R., & Kumar, R. (2022). A review on effective design processes of constructed wetlands. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19(12), 12749–12774. Scopus. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03549-y>
- Song, H.-L., Li, X.-N., Lu, X.-W., & Inamori, Y. (2009). Investigation of microcystin removal from eutrophic surface water by aquatic vegetable bed. *Ecological Engineering*, 35(11), 1589–1598. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.04.005>
- Stein, O., Biederman, J., Hook, P., & Allen, W. (2006). Plant species and temperature effects on the $k-C^*$ first-order model for COD removal in batch-loaded SSF wetlands. *Ecological Engineering*, 26, 100–112. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2005.07.001>
- Tilley, E., Ulrich, L., Luthi, C., Reymond, P., & Zurbrugg, C. (2014). *Compendium of Sanitation Systems and Technologies*.
- UN-HABITAT. (2008). *Constructed Wetlands Manual*. (Water for Asian Cities Programme Nepal, Kathmandu). UN-HABITAT.
- USEPA. (2000). *Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters*. United States Environment Protection Agency.
- Von Sperling, M., & Chernicharo, C. A. de L. (2005). *Biological wastewater treatment in warm climate regions*. IWA publishing.

- Vymazal, J. (2010). Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. *Water*, 2(3), Article 3.
<https://doi.org/10.3390/w2030530>
- Vymazal, J. (2013). The use of hybrid constructed wetlands for wastewater treatment with special attention to nitrogen removal: A review of a recent development. *Water Research*, 47(14), 4795–4811. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.05.029>
- Vymazal, J., Brix, H., Čížková, H., & Cooper, M. B. (1998). *Constructed Wetlands for Wastewater Treatment in Europe*. - Backhuys Publishers, Leiden, 366 pages. ISBN 90-73348-72-2.
1998. *International Review of Hydrobiology*, 83(5–6), 500–500.
<https://doi.org/10.1002/iroh.19980830517>
- Vymazal, J., & Kröpfelová, L. (2008). *Wastewater treatment in constructed wetlands with horizontal sub-surface flow*. Springer.
- Wallace, S. (2006). *Feasibility, Design Criteria, and O&M Requirements for Small Scale Constructed Wetland Wastewater Treatment Systems*.
<https://doi.org/10.2166/9781780403991>

B.6. Ficha 6 - LAGUNAS FACULTATIVAS

B.6.1. GENERALIDADES

DESCRIPCIÓN

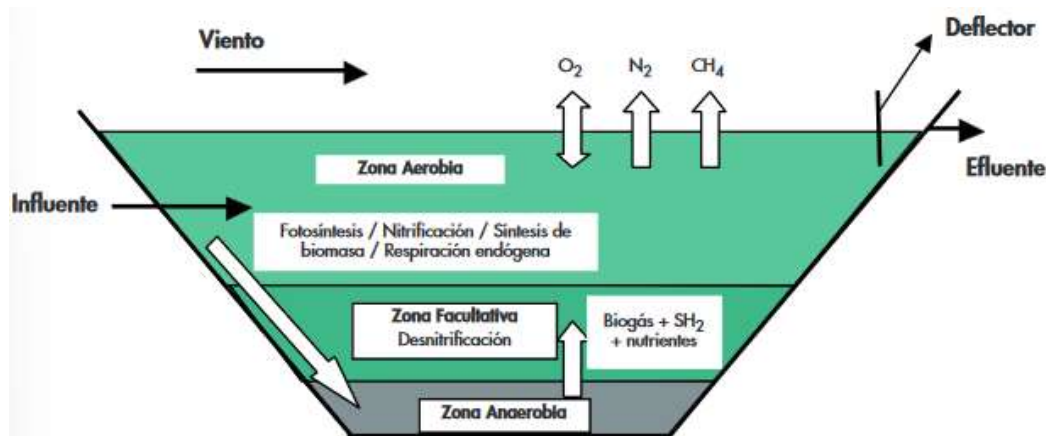
Las lagunas facultativas consisten en un reactor diseñado para emular y potenciar los procesos de autodepuración que tienen lugar en los ríos y lagos (MVCT, 2021). En este contexto, las aguas residuales ingresan a la laguna facultativa a través de uno de sus extremos, donde comienza un proceso secuencial de tratamiento que se desarrolla a lo largo de varios días (Tilley et al., 2014). Este proceso de autodepuración se divide en tres zonas distintas, cada una con características y funciones específicas. En la primera zona, denominada zona aerobia, el oxígeno requerido para los procesos de degradación bioquímica es proporcionado tanto por la fotosíntesis de las algas presentes en la laguna como por la aireación mecánica si se aplica en el sistema (Von Sperling, 2007). La segunda zona, conocida como zona facultativa, es un entorno variable en términos de disponibilidad de oxígeno. En esta área, pueden ocurrir reacciones tanto aerobias como anóxicas, dependiendo de las condiciones específicas de cada momento (Von Sperling, 2007). Estas reacciones contribuyen a la desnitrificación y a la degradación de la materia orgánica. La tercera y última zona es la zona anaerobia, donde se producen procesos de estabilización de la materia orgánica presente en los sólidos sedimentados (MVCT, 2021; Von Sperling, 2007).

COMPONENTES

A continuación, se presentan los principales componentes de las lagunas facultativas (*Figura B8*):

- **Dispositivo de entrada:** Usualmente compuesta por tuberías sumergidas ubicadas estratégicamente con el fin de evitar cortos circuitos hidráulicos (Von Sperling, 2007). El número de tuberías puede variar en función del tamaño de la laguna (Von Sperling, 2007).
- **Laguna:** En este componente ocurrirá el tratamiento de AR, usualmente consiste en una excavación compactada e impermeabilizada a través del empleo de geotextiles o la aplicación de arcillas o bentonitas (Ortega de Miguel, 2010).
- **Dispositivo de salida:** usualmente compuesta por baffles que preceden una tubería sumergida con un ángulo 90 grados seguido de una presa para el control de caudal (Ortega de Miguel, 2010; Von Sperling, 2007). Este dispositivo no debe estar alineado con el de entrada para evitar las zonas muertas y los cortos circuitos hidráulicos (Von Sperling, 2007).
- **Aireadores (solo en lagunas aireadas):** Usualmente para este fin son utilizados aireadores de eje vertical de alta velocidad (Von Sperling, 2007).

Figura B8. Esquema típico de una laguna facultativa



Fuente: Adaptado de Ortega de Miguel (2010)

B.6.2. ASPECTOS TÉCNICOS

A continuación, se presentan diferentes aspectos de las lagunas facultativas.

NIVEL DE TRATAMIENTO RECOMENDADO

Las lagunas facultativas pueden ser utilizadas para el tratamiento primario y secundario en pequeñas comunidades (Brault et al., 2022).

POBLACIÓN RECOMENDADA

Se recomienda la aplicación de esta tecnología en aglomeraciones con una población menor a los 1000 habitantes equivalentes (Ortega de Miguel, 2010).

ÁREA SUPERFICIAL

El requerimiento de área de las lagunas facultativas convencionales puede oscilar entre 2 y 4 m² por habitante equivalente. Por otro lado, en la variante aireada de esta tecnología el requerimiento de área es reducido a rangos de 0.25 0.5 por habitante equivalente (Von Sperling & Chernicharo, 2005).

REMOCIÓN DE CONTAMINANTES

En las Tabla B39 y Tabla B40 se presentan distintas eficiencias remoción de sólidos suspendidos, materia orgánica, nutrientes y microorganismos patógenos encontradas para lagunas facultativas y lagunas facultativas aireadas.

Tabla B39. Remociones de sólidos suspendidos y materia orgánica en lagunas facultativas.

| Parámetro | | | SST (mg/l-1) | | | | DBO ₅ (mg/l-1) | | | | DQO (mg/l-1) | | | |
|------------------------|----------------------|--------|--------------|---------|------------|--------|---------------------------|--------|------------|--------|--------------|--------|------------|--------|
| Fuente | Nivel de tratamiento | Escala | Entrada | Salida | % remoción | N | Entrada | Salida | % remoción | N | Entrada | Salida | % remoción | N |
| Oakley et al. (2000) | Primario | Real | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | 283.00 | 120.00 | 57.60 | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. |
| Oakley et al. (2000) | Primario | Real | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | 241.00 | 175.00 | 27.39 | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. |
| Ghazy et al. (2008) | Secundario | Real | 214.3 | 176.30 | 17.73 | D.N.R. | 229.00 | 180.70 | 21.09 | D.N.R. | 402.00 | 321.00 | 20.15 | D.N.R. |
| García et al. (2000) * | Primario | Real | 320 (SS) | 31 (SS) | 90.31 | D.N.R. | 370.00 | 222.00 | 40.00 | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. |
| Alderson et al. (2015) | Primario | Real | 280.00 | 149.00 | 7.67 | D.N.R. | D.N.R. | 109.00 | D.N.R. | D.N.R. | 709.00 | 284.00 | 6.67 | D.N.R. |

Notas: SST = Sólidos Suspendidos Totales; SS= sólidos Suspendidos; DBO₅=Demanda Bioquímica de Oxígeno; DQO= Demanda Química de Oxígeno; D.N.R.= Dato no reportado; N= número de datos;

*= variante aireada.

Tabla B40. Remociones de patógenos en lagunas facultativas.

| Parámetro | | | Coliformes fecales NMP | | | | Coliformes Totales NMP | | | |
|------------------------|----------------------|--------|------------------------|----------|------------|--------|------------------------|----------|------------|--------|
| Fuente | Nivel de tratamiento | Escala | Entrada | Salida | % remoción | N | Entrada | Salida | % remoción | N |
| Oakley et al. (2000) | Primario | Real | 1.78E+07 | 3.50E+06 | 80.34 | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. |
| Oakley et al. (2000) | Primario | Real | 1.23E+06 | 1.06E+06 | 13.82 | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. |
| Ghazy et al. (2008) | Secundario | Real | 3.90E+09 | 3.60E+07 | 99.08 | D.N.R. | 1.30E+11 | 3.60E+08 | 99.72 | D.N.R. |
| García et al. (2000) * | Primario | Real | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. |
| Alderson et al. (2015) | Primario | Real | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. |

Notas: D.N.R =Dato no reportado; N= número de datos; NMP= Numero más probable; *= variante aireada.

OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

A continuación, se presentan distintos aspectos de operación y mantenimiento de las lagunas facultativas.

- **Puesta en marcha**

Después de verificar elementos como las obras de llegada, compuertas y válvulas de Bypass, se procederá a llenar la laguna con agua residual hasta alcanzar la mitad de su capacidad. A continuación, se suspenderá el suministro hasta que la superficie de la laguna adquiera un tono verdoso, indicando así la proliferación de microalgas. Este proceso suele tardar aproximadamente de 15 a 20 días (Ortega de Miguel, 2010). Una vez completada esta etapa, se procederá a llenar la laguna con el caudal de diseño establecido.

- **Actividades de operación y mantenimiento**

En la Tabla B41 se pueden observar las principales actividades de operación y mantenimiento de las LF.

Tabla B41. Actividades de operación y mantenimiento en la aireación extendida

| Actividad | Frecuencia |
|--|----------------------|
| Inspección general de motores y sistemas de purgas (solo en lagunas aireadas) ¹ . | 2-3 veces por semana |
| Extracción de flotantes ¹ . | 1 vez por semana |
| Mantenimiento de obra civil ¹ . | 2-3 veces por semana |
| Extracción y evacuación de lodos decantador secundario ² . | 2-5 años |

Fuente: ¹ Ortega de Miguel (2010), ²Von Sperling (2007)

- **Riesgos asociados**

Las lagunas facultativas pueden enfrentar varios problemas significativos. Uno de ellos es la formación de espuma y material flotante debido al exceso de algas y al mal funcionamiento del

tratamiento primario (Von Sperling, 2007). Además, es común encontrar problemas de malos olores, los cuales pueden ser causados por la sobrecarga hidráulica, condiciones climáticas adversas, la presencia de sustancias tóxicas en el agua residual y cortocircuitos (Ortega de Miguel, 2010; Von Sperling & Chernicharo, 2005).

La presencia de algas en el efluente también puede ser un problema, aunque se pueden tomar medidas para mitigarlo, como la colocación de deflectores cerca de las salidas y la implementación de tratamientos posteriores como los filtros de piedra (Von Sperling, 2007). Por último, en el caso de las lagunas facultativas con aireación, es posible que surjan problemas como la falta de oxígeno disuelto en ciertos puntos, malos olores y formación de espuma, que generalmente se deben a un posicionamiento y funcionamiento incorrectos de los aireadores (Von Sperling, 2007).

- **Flexibilidad**

Las lagunas facultativas son eficientes para hacer frente a picos de carga hidráulica y orgánica cuando estos son de naturaleza puntual, debido a sus largos tiempos de retención hidráulica (Ortega de Miguel, 2010; Von Sperling, 2007). Sin embargo, es importante tener en cuenta que las variaciones bruscas en las condiciones climáticas pueden afectar la eficiencia del tratamiento (Von Sperling, 2007).

CRITERIOS DE DISEÑO

Los principales parámetros para el diseño de lagunas facultativas son la carga orgánica superficial, la profundidad de laguna y el tiempo de retención hidráulico (MVCT, 2021). Esto debido a la importancia de la radiación solar para los procesos de fotosíntesis de las algas (Von Sperling & Chernicharo, 2005). De igual manera, para evitar zonas muertas y cortos circuitos hidráulicos es importante tener en cuenta diferentes parámetros para el diseño como la geometría de la laguna y

los taludes. A continuación, en la Tabla B42 y Tabla B43 se presentan distintos valores recomendados de parámetros de diseño para las lagunas facultativas convencionales y aireadas.

Tabla B42. Valores de parámetros de diseño recomendados para lagunas facultativas convencionales

| Parámetro | unidades | Valores recomendados |
|---|----------------------------|----------------------|
| Carga orgánica superficial para regiones con clima cálido y alta radiación solar | kgBDO ₅ /ha-día | 240-350 |
| Carga orgánica superficial para regiones con invierno y radiación solar moderada | kgBDO ₅ /ha-día | 120-240 |
| Carga orgánica superficial para regiones con invierno frío y baja radiación solar | kgBDO ₅ /ha-día | 100-180 |
| Profundidad | m | 1.5 - 2.0 |
| Tiempo de retención hidráulico | días | 15-45 |
| Relación largo ancho | - | 1:2-1:4 |
| Relación vertical- horizontal de los taludes internos | - | 1:2-1:3 |

Fuente: Adaptado de Von Sperling (2007)

Tabla B43. Valores de parámetros de diseño recomendados para lagunas facultativas convencionales

| Parámetro | Unidades | Valores recomendados |
|--------------------------------|------------------|----------------------|
| Tiempo de retención hidráulico | días | 5-10 |
| Profundidad | m | 2.5-4.0 |
| Energía requerida | W/m ³ | 0.75-1.5 |

Fuente: Adaptado de Von Sperling (2007)

POTENCIAL DE ACTUALIZACIÓN

Las lagunas tienen un gran potencial de mejora para aumentar su capacidad de tratamiento y mejorar la remoción de nutrientes. Una forma de lograrlo es mediante la implementación de sistemas de aireación en las variantes convencionales, lo que mejora su eficiencia y reduce el área requerida (Von Sperling, 2007). Por otro lado, en el caso de las variantes aireadas, se puede aumentar el suministro de oxígeno si se desea ampliar el caudal convirtiéndola en una laguna de mezcla completa (Von Sperling, 2007). Además, si se busca mejorar la remoción de nutrientes, se puede utilizar la aireación parcial para inducir condiciones anóxicas (Vagheei, 2021). Sin embargo,

todas estas modificaciones conllevan implicaciones económicas tanto en su implementación como en la operación y el mantenimiento (Brault et al., 2022).

B.6.3. ASPECTOS ECONÓMICOS

INVERSIÓN INICIAL

Acorde a Von Sperling & Chernicharo (2005), para el año 2002, la inversión inicial necesaria para la variante convencional de la laguna facultativa oscilaba entre los 15 a 30 dólares estadounidenses por habitante equivalente. Mientras que, para la variante aireada de esta tecnología la inversión inicial oscila entre 20 y 35 dólares estadounidenses por habitante equivalente. Para el año 2023, estos valores oscilan entre 52.83 y 105.63 dólares estadounidenses por habitante equivalente para la variante convencional y entre 70.42 y 105.63 para la variante con aireación.

COSTOS APROXIMADOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

Von Sperling & Chernicharo (2005) estiman que los costos anuales de operación y mantenimiento en el 2002 para las lagunas facultativas oscilaba entre 0.8 y 1.5 dólares estadounidenses por habitante equivalente. Por otro lado, la variante con aireación mecánica tiene costos anuales estimados de 2.0 a 3.5 dólares estadounidenses por habitante equivalente. Con ajustes de inflación para el año 2023, los costos anuales de operación y mantenimiento de las lagunas convencionales oscilan entre 2.82 y 5.28 dólares estadounidenses por habitante equivalente, y la variante aireada cuenta con costos anuales de operación y mantenimiento de 7.04 a 12.32 dólares estadounidenses por habitante equivalente.

B.6.4. ASPECTOS AMBIENTALES

A continuación, se presentan diferentes aspectos ambientales que presentan las lagunas facultativas.

CONSUMO ENERGÉTICO

La variante convencional de las lagunas facultativas puede funcionar mediante gravedad, lo que significa que no es necesaria la energía eléctrica para tratar las aguas residuales (Ortega de Miguel, 2010; Tilley et al., 2014). Por otro lado, la variante aireada utiliza equipos mecánicos para suministrar oxígeno, lo que implica la necesidad de contar con un suministro eléctrico constante. Se estima que el consumo eléctrico necesario para el funcionamiento de esta variante oscila entre 11 y 18 kWh por habitante equivalente al año (Von Sperling & Chernicharo, 2005).

GENERACIÓN DE OLORES

La generación de olores en las lagunas facultativas no es significativa, esto debido a que el ácido sulfhídrico generado durante la estabilización de lodos es oxidado durante los procesos que ocurren en las zonas aerobias (Von Sperling, 2007).

PRODUCCIÓN DE LODOS

Se estima que la producción de biomasa en las lagunas facultativas convencionales oscila entre los 35 y 90 L/hab-año (Von Sperling & Chernicharo, 2005). Mientras que las lagunas facultativas aireadas tienen una tasa aproximada de producción de lodos de 30 a 220 L/hab-año (Von Sperling & Chernicharo, 2005).

GENERACIÓN DE RUIDOS

La generación de ruidos en las lagunas facultativas convencionales es bajo al no utilizar equipos mecánicos de alta potencia para su funcionamiento (Tilley et al., 2014). Por otro lado, en las lagunas facultativas aireadas los equipos de aireación mecánica pueden generar ruidos.

EMISIONES GASES EFECTO INVERNADERO

Acorde a IPCC (2019), las lagunas de estabilización tienen un factor de emisión de 0.3 Kg de CH₄/Kg DBO₅ removido.

APROVECHAMIENTO DE SUBPRODUCTOS

A continuación, se presentan oportunidades de aprovechamiento de los subproductos generados durante el tratamiento mediante lagunas facultativas.

- **Biogás**

La producción de biogás en las lagunas facultativas no es significativa (Von Sperling & Chernicharo, 2005).

- **Biomasa**

La biomasa extraída de las lagunas facultativas suele contar un alto nivel de estabilización, por ende, si desea realizar su aprovechamiento como material de relleno o para agricultura restringida, solo es necesario hacer uso de camas de secado (Andreoli et al., 2007). Sin embargo, si se desea hacer uso no restringido de este material es necesario aplicar etapas posteriores de desinfección (Andreoli et al., 2007).

- **Reúso del agua**

El efluente de las lagunas facultativas puede utilizarse para la irrigación restringida. No obstante, si se desea utilizar el efluente de forma no restringida, se deben aplicar procedimientos de desinfección (Brault et al., 2022).

B.6.5. VENTAJAS Y DESVENTAJAS

En las Tabla B44 y Tabla B45 se pueden observar las principales ventajas y desventajas de las diferentes variantes de las lagunas facultativas para el tratamiento de AR.

Tabla B44. Ventajas y desventajas de las lagunas facultativas convencionales

| Ventajas | Desventajas |
|--|---|
| Bajo requerimiento energético | Alto requerimiento de área superficial |
| Altas remociones de materia orgánica y nutrientes | Alta dependencia de factores climáticos |
| Baja producción de lodos con un alto grado de estabilización | |
| Operación y mantenimiento sencillo | |

Tabla B45. Ventajas y desventajas de las lagunas facultativas aireadas

| Ventajas | Desventajas |
|---|------------------------------------|
| Requerimiento medio de área superficial | Requerimiento de energía eléctrica |
| Baja reducción de lodos con un alto grado de estabilización | Operación y mantenimiento complejo |

REFERENCIAS

- Alderson, M. P., dos Santos, A. B., & Mota Filho, C. R. (2015). Reliability analysis of low-cost, full-scale domestic wastewater treatment plants for reuse in aquaculture and agriculture. *Ecological Engineering*, 82, 6–14. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.04.081>
- Andreoli, C. V., Von Sperling, M., & Fernandes, F. (2007). Sludge treatment and disposal. IWA publ.
- Brault, J.-M., Buchauer, K., & Martin, G. (2022). Wastewater Treatment and Reuse: A Guide to Help Small Towns Select Appropriate Options. International Bank for Reconstruction and Development / The World Bank.
- García, J., Mujeriego, R., Bourrouet, A., Peñuelas, G., & Freixes, A. (2000). Wastewater treatment by pond systems: Experiences in Catalonia, Spain. *Water Science and Technology*, 42(10–11), 35–42. <https://doi.org/10.2166/wst.2000.0603>
- Ghazy, M. M. E.-D., El-Senousy, W. M., Abdel-Aatt, Azza. M., & Kamel, M. (2008). Performance Evaluation of a Waste Stabilization Pond in a Rural Area in Egypt. *American Journal of Environmental Sciences*, 4(4), 316–325. <https://doi.org/10.3844/ajessp.2008.316.325>
- IPCC. (2019). 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.
- MVCT, M. de V., Ciudad y Territorio. (2021). Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS): TÍTULO E. Tratamiento de Aguas Residuales. Viceministerio de Agua y Saneamiento Básico.
- Oakley, S. M., Pocasangre, A., Flores, C., Monge, J., & Estrada, M. (2000). Waste stabilization pond use in central america: The experiences of el salvador, guatemala, honduras and

nicaragua. *Water Science and Technology*, 42(10–11), 51–58.
<https://doi.org/10.2166/wst.2000.0607>

Ortega de Miguel, E. (2010). Manual para la implantación de sistemas de depuración en pequeñas poblaciones. Ministerio Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.

Tilley, E., Ulrich, L., Luthi, C., Reymond, P., & Zurbrügg, C. (2014). Compendium of Sanitation Systems and Technologies.

Vagheei, R. (2021). Upgrading of waste stabilization ponds using a low-cost small-scale fine bubble diffused aeration system. *Water Science and Technology*, 84(10–11), 3104–3121.
<https://doi.org/10.2166/wst.2021.330>

Von Sperling, M. (2007). *Waste Stabilisation Ponds*.

Von Sperling, M., & Chernicharo, C. A. de L. (2005). *Biological wastewater treatment in warm climate regions*. IWA publishing.

B.7. Ficha 7 FILTROS ANAEROBIOS

B.7.1. GENERALIDADES

DESCRIPCIÓN

Los filtros anaerobios son reactores utilizados en el tratamiento de aguas residuales. Estas unidades están compuestas por un medio fijo que actúa como soporte para el desarrollo de una película biológica (Brault et al., 2022). Los filtros suelen constar de una o varias cámaras con medios filtrantes dispuestos en serie (Brault et al., 2022). A medida que el agua atraviesa el filtro, la materia orgánica es degradada mediante procesos anaerobios al entrar en contacto con la biopelícula adherida al medio filtrante (Tilley et al., 2014). Los compuestos orgánicos se convierten en productos intermedios y finales, principalmente metano y dióxido de carbono (Lemos Chernicharo, 2007).

COMPONENTES

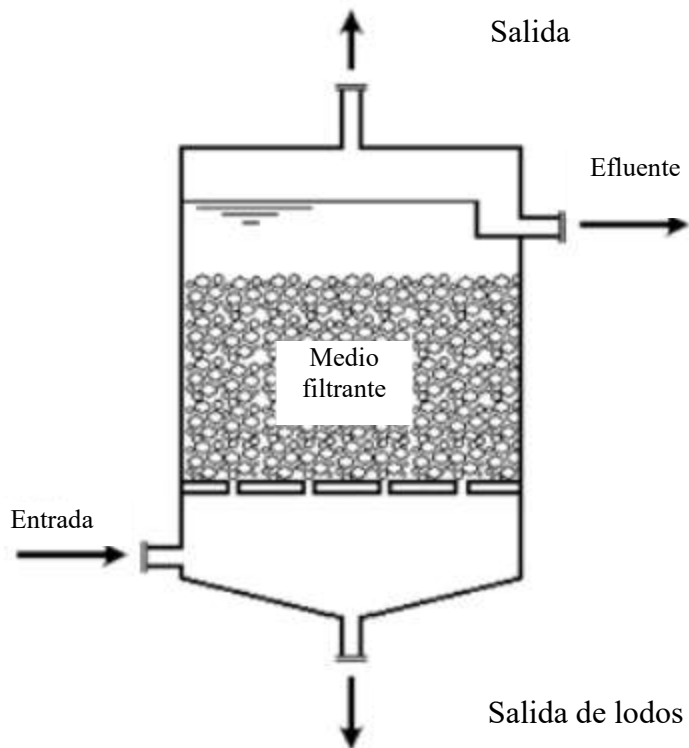
En la Figura 1 se puede observar el esquema típico de los filtros anaerobios. Además, a continuación, se presentan los principales componentes de esta tecnología.

- **Sistema de distribución:** Se recomienda utilizar múltiples distribuidores con aberturas para la distribución del efluente, permitiendo que las aguas residuales sean distribuidas uniformemente desde el fondo del reactor (Lemos Chernicharo, 2007).
- **Medio filtrante:** El objetivo principal del medio filtrante utilizado en esta tecnología es proporcionar un soporte para la formación de la biopelícula, al tiempo que permite la separación de sólidos y gases. Para cumplir con estos requisitos, se busca que el material seleccionado sea estructuralmente resistente, biológicamente inerte y posea una alta porosidad y área superficial (Lemos Chernicharo, 2007). Entre los materiales comúnmente

utilizados se encuentran bloques de cerámica, limos, cilindros huecos de PVC, granito, bambú y balones de polietileno (Lemos Chernicharo, 2007).

- **Sistema de recolección de agua tratada:** Utilizados para para el monitoreo del crecimiento y la calidad de la biomasa en el reactor, suelen estar equipados con dos puntos de muestreo, uno en la parte inferior y otro en la parte superior (Lemos Chernicharo, 2007). Estas llaves de muestreo permiten obtener muestras representativas del proceso y facilitan el seguimiento adecuado del sistema.

Figura B10. Esquema de filtro anaerobio



Fuente: Adaptado de Lemos Chernicharo (2007)

B.7.2. ASPECTOS TÉCNICOS

A continuación, se presentan distintos aspectos de los filtros anaerobios.

NIVEL DE TRATAMIENTO RECOMENDADO

Los filtros anaerobios se utilizan comúnmente para el tratamiento secundario. Para prevenir la obstrucción del lecho filtrante debido al exceso de sólidos en suspensión, es necesario aplicar previamente un tratamiento primario al afluente (Lemos Chernicharo, 2007; Tilley et al., 2014).

POBLACIÓN RECOMENDADA

Gracias a su fácil operación y su requerimiento de espacio reducido, los filtros anaerobios son una opción viable tanto para comunidades pequeñas como para aplicaciones a nivel municipal (Brault et al., 2022).

ÁREA SUPERFICIAL

Los filtros anaerobios suelen requerir un espacio de aproximadamente 0.25 a 0.55 m² por habitante equivalente

REMOCIÓN DE CONTAMINANTES

En las Tabla B46 y Tabla B47 se presentan distintas eficiencias remoción de sólidos suspendidos, materia orgánica, nutrientes y microorganismos patógenos encontradas para los filtros anaerobios.

Tabla B46. Remociones de sólidos suspendidos y materia orgánica en filtros anaerobios

| Parámetro | | | SST (mg/l) | | | | DBO ₅ (mg/l) | | | | DQO (mg/l) | | | |
|--------------------------------|----------------------|--------|------------|--------|------------|--------|-------------------------|--------|------------|--------|------------|--------|------------|--------|
| Fuente | Nivel de tratamiento | Escala | Entrada | Salida | % remoción | N | Entrada | Salida | % remoción | N | Entrada | Salida | % remoción | N |
| Ladu & Lü (2014) | Primario | piloto | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | 234.03 | 50.33 | 78.49 | D.N.R. |
| Cruz et al. (2013) | Primario | piloto | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | 419 | 79.00 | 81.15 | D.N.R. | 1105.00 | 281.00 | 74.57 | D.N.R. |
| de Oliveira Cruz et al. (2019) | secundario | piloto | 126.00 | 38.00 | 69.84 | 43 | 148 | 41.00 | 72.30 | 43 | 403.00 | 194.00 | 51.86 | 43 |
| Kobayashi et al. (1983) | Primario | piloto | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | 163 | 40.00 | 75.46 | D.N.R. | 288.00 | 78.00 | 72.92 | D.N.R. |

Notas: SST=Sólidos Suspendidos Totales; DBO₅=Demanda Bioquímica de Oxígeno; DQO= Demanda Química de Oxígeno; D.N.R.: Dato no reportado; N= número de muestra.

Tabla B47. Remociones de nutrientes en filtros anaerobios.

| Parámetro | | | NH ₄ -N (mg/l) | | | |
|--------------------------------|----------------------|--------|---------------------------|--------|------------|--------|
| Fuente | Nivel de tratamiento | Escala | Entrada | Salida | % remoción | N |
| Ladu & Lü (2014) | Primario | piloto | 29.33 | 18.73 | 36.15 | D.N.R. |
| Cruz et al. (2013) | Primario | piloto | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. |
| de Oliveira Cruz et al. (2019) | secundario | piloto | 109.00 | 110.00 | -0.92 | 43 |
| Kobayashi et al. (1983) | Primario | piloto | 33.00 | 44.00 | -33.33 | D.N.R. |

Nota: NH₄-N = Nitrógeno amoniacal; NT=Nitrógeno total; PT=Fosforo total; D.N.R. = Dato no reportado; N= número de muestra.

OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

A continuación, se presentan distintos aspectos de operación y mantenimiento de los filtros anaerobios.

- **Puesta en marcha**

El periodo necesario para que un filtro anaerobio alcance su máxima capacidad de tratamiento puede oscilar entre 6 y 9 meses, debido al crecimiento gradual de los microorganismos anaerobios (Tilley et al., 2014). Con el fin de agilizar este proceso, es común emplear inóculos de biomasa obtenidos principalmente de tanques sépticos o de otros reactores anaerobios (Lemos Chernicharo, 2007). La incorporación de estos inóculos promueve el desarrollo temprano de la comunidad microbiana deseada en el filtro anaerobio, acelerando así la eficiencia del tratamiento de aguas residuales (Lemos Chernicharo, 2007).

- **Actividades de operación y mantenimiento**

En la Tabla B48 se presentan las principales actividades de operación y mantenimiento en los FAFA.

Tabla B48. *Activades de operación y mantenimiento en filtros anaerobios*

| Descripción | Frecuencia |
|---|------------|
| Monitoreo de solidos suspendidos, temperatura y pH antes y después del reactor ¹ . | Diaria |
| Monitoreo de la composición del biogás ¹ . | Diaria |
| Monitoreo de la calidad y cantidad de los lodos ¹ . | Semanal |
| Verificación de dispositivos de alimentación del reactor ¹ . | Diaria |

Fuente: Lemos Chernicharo (2007)

- **Riesgos asociados**

Existen riesgos asociados a la operación de los filtros anaerobios, como el pH elevado por vertimientos de aguas industriales, la proliferación de olores debido a la generación de ácido sulfhídrico (H₂S) y la obstrucción del medio filtrante por falta de mantenimiento (Lemos Chernicharo, 2007). Estos riesgos pueden afectar la eficiencia del proceso de tratamiento y requerir

medidas preventivas y de control adecuadas para minimizar su impacto negativo (Lemos Chernicharo, 2007).

- **Flexibilidad**

Los filtros anaerobios son altamente resistentes a las sobrecargas hidráulicas. Según Chua et al., (1997), incluso ante cargas hidráulicas de 2 a 5 veces mayores de lo esperado, la eficiencia de remoción solo disminuye en un 12-14%. En cuanto a las sobrecargas de materia orgánica, la presencia de biomasa con alta actividad microbiológica garantiza la resistencia frente a picos de carga orgánica (Lemos Chernicharo, 2007).

CRITERIOS DE DISEÑO

Los factores clave en el diseño de filtros anaerobios son: (i) el material filtrante debe contar con un área superficial que oscile entre 90 y 300 m²/m³ para favorecer el contacto adecuado entre los microorganismos y el sustrato (Lemos Chernicharo, 2007), (ii) la velocidad de ascenso de las aguas residuales en el reactor (Von Sperling, 2007c), y (iii) la carga orgánica en el medio filtrante. En la Tabla B49 se presentan diversos parámetros hidráulicos recomendados para el diseño de filtros anaerobios que utilizan roca como lecho filtrante. Es importante destacar que, si se cambia el medio filtrante, los diferentes parámetros de diseño deben ajustarse en consecuencia.

Tabla B49. Valores de parámetros recomendados para el diseño de filtros anaerobios

| Parámetros | Unidad | Caudal Medio diario | Caudal máximo diario | Caudal máximo horario |
|--------------------------------|-------------------------------------|---------------------|----------------------|-----------------------|
| Medio filtrante | - | Roca | Roca | Roca |
| Altura de medio filtrante | m | 0.8 a 3.0 | 0.8 a 3.1 | 0.8 a 3.2 |
| Tiempo de retención hidráulica | hora | 5 a 10 | 4 a 8 | 3 a 6 |
| Carga hidráulica superficial | m ³ /m ² -día | 6 a 10 | 8 a 12 | 10 a 15 |
| Carga orgánica | Kg DQO/ m ³ -día | 0.15 a 0.50 | 0.15 a 0.50 | 0.15 a 0.50 |

| | | | | |
|--------------------------------------|-----------------------------|-------------|-------------|-------------|
| Carga orgánica en el medio filtrante | Kg DQO/ m ³ -día | 0.25 a 0.75 | 0.25 a 0.75 | 0.25 a 0.75 |
|--------------------------------------|-----------------------------|-------------|-------------|-------------|

Fuente: Adaptado de Lemos Chernicharo (2007)

POTENCIAL DE ACTUALIZACIÓN

Los filtros anaerobios presentan un potencial de actualización limitado, especialmente para la remoción mejorada de nutrientes (Brault et al., 2022).

B.7.3. ASPECTOS ECONÓMICOS

A continuación, se presentan distintos aspectos económicos de los filtros anaerobios.

- **Inversión Inicial**

Los costos de construcción estimados para los filtros anaerobios varían entre 18 y 30 dólares por habitante equivalente según estimaciones realizadas para Brasil el año 2002 (Von Sperling, 2007c). Realizando ajustes utilizando el factor de inflación, para el año 2023 la inversión inicial oscilaría entre 63.38 y 105.63 USD por habitante equivalente.

- **Costos aproximados de operación y mantenimiento**

Los costos estimados de operación y mantenimiento de los filtros anaerobios varían generalmente entre 2 y 3 dólares por habitante equivalente al año (Von Sperling, 2007c), actualizando estos valores al año 2023, la operación y mantenimiento tendría un costo aproximado de 7.04 a 10.56 USD por habitante equivalente al año.

B.7.4. ASPECTOS AMBIENTALES

A continuación, se presentan diferentes aspectos ambientales que presentan los filtros anaerobios.

CONSUMO ENERGÉTICO

Debido a que los filtros anaerobios no requieren equipos mecánicos para el tratamiento y pueden funcionar por gravedad, su consumo de energía es generalmente bajo (Von Sperling, 2007c).

GENERACIÓN DE OLORES

Se debe tener en cuenta la posibilidad de generación de olores debido a la producción de ácido sulfhídrico, por lo tanto, es importante ubicar los tanques en áreas donde no causen molestias a la población o emplear filtros para el control de olores (Tilley et al., 2014).

PRODUCCIÓN DE LODOS

Los filtros anaerobios generan lodos en cantidades reducidas, pero con un alto grado de estabilización (MVCT, 2021). Según Von Sperling (2007), se estima que los filtros anaerobios producen aproximadamente entre 70 y 640 L de lodo por habitante equivalente al año.

GENERACIÓN DE RUIDOS

Debido a que no hacen uso de equipos mecánicos la generación de ruidos por el sistema es mínima (Tilley et al., 2014).

EMISIONES GASES EFECTO INVERNADERO

Los filtros anaerobios generan lodos en cantidades reducidas y con un alto grado de estabilización (MVCT, 2021). Se estima que los filtros anaerobios producen aproximadamente de 70 a 640 litros de lodo por habitante equivalente por año (Von Sperling, 2007c).

OPORTUNIDADES DE APROVECHAMIENTO DE SUBPRODUCTOS

A continuación, se presentan oportunidades de aprovechamiento de los subproductos generados durante el tratamiento mediante filtros anaerobios.

- **Biogás**

Durante el proceso de tratamiento de las aguas residuales mediante filtros anaerobios se genera biogás, aunque la cantidad producida no es lo suficientemente significativa como para viabilizar su reutilización (Brault et al., 2022).

- **Biomasa**

La biomasa estabilizada en los filtros anaerobios presenta un alto grado de estabilización, lo cual implica que, para su aprovechamiento, generalmente solo es necesario realizar una etapa de deshidratación (Lemos Chernicharo, 2007). Esta fase de deshidratación se lleva a cabo comúnmente mediante el uso de camas de secado (Lemos Chernicharo, 2007).

- **Reúso del agua**

Para el reúso del efluente tratado mediante filtros anaerobios es necesario llevar a cabo un tratamiento adicional. Esto se debe a que esta tecnología presenta una baja capacidad de remoción de microorganismos patógenos, lo cual ha sido evidenciado en estudios realizados (Brault et al., 2022; Lemos Chernicharo, 2007).

B.7.5. VENTAJAS Y DESVENTAJAS

En la Tabla B50 se muestran las principales ventajas y desventajas de utilizar filtros anaerobios para el tratamiento de aguas residuales.

Tabla B50. Ventajas y desventajas tanques sépticos

| Ventajas | Desventajas |
|--|--|
| Bajo requerimiento de energía eléctrica | Baja remoción de patógenos y nutrientes |
| Bajos costos relativos de operación y mantenimiento | Generación de olores |
| Bajo volumen de lodos producidos y con un alto nivel de estabilización | Riesgo de colmatación del material filtrante |
| Bajo requerimiento de área superficial | Puesta en marcha lenta |

REFERENCIA

- Brault, J.-M., Buchauer, K., & Martin, G. (2022). Wastewater Treatment and Reuse: A Guide to Help Small Towns Select Appropriate Options. International Bank for Reconstruction and Development / The World Bank.
- Chua, H., Hu, W. F., Yu, P. H. F., & Cheung, M. W. L. (1997). Responses of an anaerobic fixed-film reactor to hydraulic shock loadings. *Bioresource Technology*, 61(1), 79–83. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(97\)84702-5](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(97)84702-5)
- de Oliveira Cruz, L. M., Gomes, B. G. L. A., Tonetti, A. L., & Figueiredo, I. C. S. (2019). Using coconut husks in a full-scale decentralized wastewater treatment system: The influence of an anaerobic filter on maintenance and operational conditions of a sand filter. *Ecological Engineering*, 127, 454–459. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.12.021>
- de Oliveira Cruz, L. M., Stefanutti, R., Coraucci Filho, B., & Tonetti, A. L. (2013). Coconut shells as filling material for anaerobic filters. *SPRINGERPLUS*, 2. <https://doi.org/10.1186/2193-1801-2-655>
- Kobayashi, H. A., Stenstrom, M. K., & Mah, R. A. (1983). Treatment of low strength domestic wastewater using the anaerobic filter. *Water Research*, 17(8), 903–909. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(83\)90164-1](https://doi.org/10.1016/0043-1354(83)90164-1)
- Ladu, J. L. C., & Lü, X. (2014). Effects of hydraulic retention time, temperature, and effluent recycling on efficiency of anaerobic filter in treating rural domestic wastewater. *Water Science and Engineering*, 7(2), 168–182. <https://doi.org/10.3882/j.issn.1674-2370.2014.02.005>
- Lemos Chernicharo, C. A. de. (2007). Anaerobic reactors. IWA Publ. [u.a.].

MVCT, M. de V., Ciudad y Territorio. (2021). Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS): TÍTULO E. Tratamiento de Aguas Residuales. Viceministerio de Agua y Saneamiento Básico.

Tilley, E., Ulrich, L., Luthi, C., Reymond, P., & Zurbrügg, C. (2014). Compendium of Sanitation Systems and Technologies.

Von Sperling, M. (2007). Wastewater Characteristics, Treatment and Disposal. IWA Publishing.
<http://www.oapen.org/download?type=document&docid=640137>

B.8. Ficha 8 -FILTROS PERCOLADORES

B.8.1. GENERALIDADES

DESCRIPCIÓN

Los filtros percoladores (FP) son estructuras diseñadas para el tratamiento de Aguas Residuales (AR). Estos se caracterizan por utilizar un sustrato como soporte para el desarrollo de una biopelícula (Brault et al., 2022). En el proceso, las AR son distribuidas usualmente a través de brazos mecánicos en la parte superior del reactor. A medida que el AR fluye a través del medio filtrante, entra en contacto con la biopelícula, lo que resulta en una reducción de su carga contaminante (Von Sperling, 2007a). Los FP se consideran una tecnología aerobia debido a su ventilación natural, donde el aire circula por los espacios vacíos del medio filtrante, proporcionando oxígeno a los microorganismos presentes (Von Sperling, 2007a).

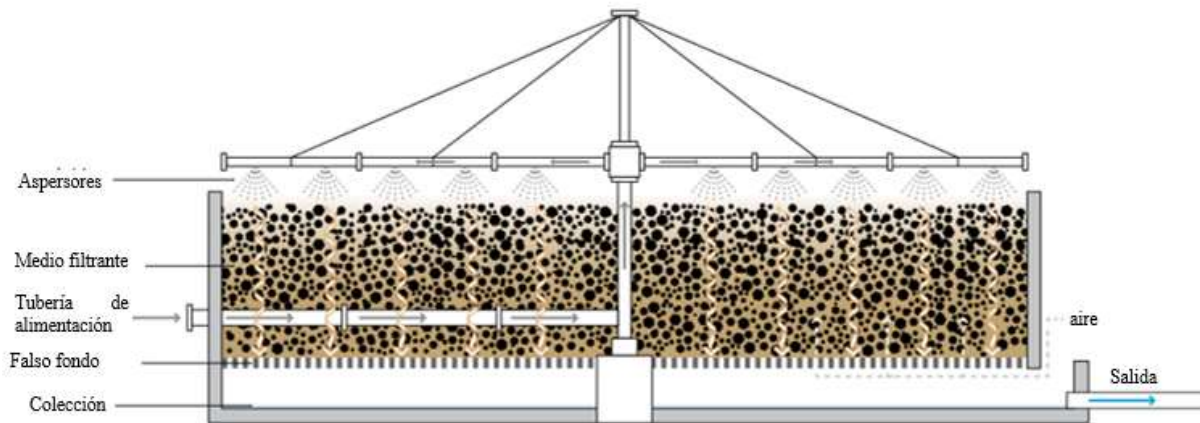
COMPONENTES

En la Figura B11 se puede observar el esquema típico de un filtro percolador. Además, a continuación, se presentan los principales componentes de esta tecnología.

- **Sistema de distribución:** El sistema de distribución se utiliza para dispersar el efluente sobre la superficie del filtro percolador. Una configuración comúnmente utilizada consiste en una columna central giratoria con brazos radiales perforados, que permiten la distribución intermitente (Ortega de Miguel, 2010)
- **Medio filtrante:** El medio filtrante en un filtro percolador generalmente está compuesto por materiales como grava o piedra triturada, o puede estar constituido también de material plástico con diferentes formas. Estos materiales son dispuestos en un contenedor usualmente cilíndrico abierto a la atmósfera (Ortega de Miguel, 2010; Von Sperling, 2007b).

- **Canal de recogida del efluente de salida:** En la parte inferior del filtro se utilizan losas perforadas o rejillas para recoger el efluente percolado. Este sistema permite transportar el efluente desde el centro del filtro hacia la periferia a través de un canal abierto (Von Sperling, 2007a). La apertura del sistema de recogida es necesaria para mantener condiciones aeróbicas en el filtro y facilitar su inspección y limpieza (Von Sperling, 2007a).
- **Tanque de sedimentación secundario:** El tanque de sedimentación secundario se utiliza para recolectar la biomasa desprendida y los sólidos suspendidos en el efluente. Este tanque tiene como objetivo mejorar la calidad del efluente antes de su salida del sistema de tratamiento.

Figura B11. Esquema de un filtro percolador



Fuente: Tomado de Brault et al. (2022)

B.8.2. ASPECTOS TÉCNICOS

A continuación, se presentan distintos aspectos técnicos de los FP.

NIVEL DE TRATAMIENTO RECOMENDADO

Los filtros percoladores son comúnmente empleados en el tratamiento secundario, debido a que la aplicación de un tratamiento primario puede eliminar sólidos que podrían obstruir el medio

filtrante (Ortega de Miguel, 2010). Para el tratamiento primario, suelen utilizarse tanques sépticos, tanques de Imhoff o reactores UASB (Ortega de Miguel, 2010; Von Sperling, 2007a)

POBLACIÓN RECOMENDADA

Ortega de Miguel (2010) sugiere que los filtros percoladores deben ser implementados en áreas urbanas con una población de más de 200 habitantes.

ÁREA SUPERFICIAL

Según las estimaciones de Von Sperling & Chernicharo (2005), los filtros percoladores requieren un área de aproximadamente 0.15 a 0.3 m² por habitante equivalente.

REMOCIÓN DE CONTAMINANTES

En las Tabla B51, Tabla B52 y Tabla B53 se presentan distintas eficiencias remoción de sólidos suspendidos, materia orgánica, nutrientes y microorganismos patógenos encontradas para los FP.

Tabla B51. Remociones de sólidos suspendidos y materia orgánica en filtros percoladores.

| Parámetro | | | SST (mg/l-1) | | | | DBO ₅ (mg/l-1) | | | | DQO (mg/l-1) | | | |
|------------------------------|----------------------|--------|--------------|--------|------------|--------|---------------------------|--------|------------|--------|--------------|--------|------------|--------|
| Fuente | Nivel de tratamiento | Escala | Entrada | Salida | % remoción | N | Entrada | Salida | % remoción | N | Entrada | Salida | % remoción | N |
| Okubo et al. (2015) | Secundario | Real | 53.00 | 19.00 | 64.15 | D.N.R. | 56.00 | 6.00 | 89.29 | D.N.R. | 177.00 | 37.00 | 79.10 | D.N.R. |
| Onodera et al. (2014) | Secundario | Piloto | 44.00 | 17.00 | 61.36 | D.N.R. | 93.00 | 12.00 | 87.10 | D.N.R. | 169.00 | 48.00 | 71.60 | D.N.R. |
| Uemura & Harada (2010) | Secundario | Real | 66.00 | 8.00 | 87.88 | D.N.R. | 53.00 | 6.00 | 88.68 | D.N.R. | 166.00 | 33.00 | 80.12 | D.N.R. |
| Chernicharo & Almeida (2011) | Secundario | piloto | 40.00 | 10.00 | 75.00 | D.N.R. | 58.00 | 20.00 | 65.52 | D.N.R. | 170.00 | 80.00 | 52.94 | D.N.R. |

Notas: SST=Sólidos Suspendidos Totales; DBO₅=Demanda Bioquímica de Oxígeno; DQO= Demanda Química de Oxígeno; D.N.R.: Dato no reportado; N= número de muestra.

Tabla B52. Remociones de nutrientes en filtros percoladores

| Parámetro | | | NH ₄ -N (mg/l-1) | | | | NT (mg/l-1) | | | | PT (mg/l-1) | | | |
|------------------------|----------------------|--------|-----------------------------|--------|------------|--------|-------------|--------|------------|--------|-------------|--------|------------|--------|
| Fuente | Nivel de tratamiento | Escala | Entrada | Salida | % remoción | N | Entrada | Salida | % remoción | N | Entrada | Salida | % remoción | N |
| Okubo et al. (2015) | Secundario | Real | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. |
| Onodera et al. (2014) | Secundario | Piloto | 25.00 | 4.00 | 84.00 | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. |
| Uemura & Harada (2010) | Secundario | Real | 26.00 | 5.00 | 80.77 | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. |

Nota: NH₄-N = Nitrógeno amoniacal; NT=Nitrógeno total; PT=Fosforo total; D.N.R.: Dato no reportado; N= número de muestra.

Tabla B53. Remociones de microorganismos patógenos en filtros percoladores

| Parámetro | | | Coliformes fecales UFC 100 ml-1 | | | | Coliformes Totales UFC 100 ml-1 | | | |
|------------------------|----------------------|--------|---------------------------------|----------|------------|--------|---------------------------------|----------|------------|--------|
| Fuente | Nivel de tratamiento | Escala | Entrada | Salida | % remoción | N | Entrada | Salida | % remoción | N |
| Okubo et al. (2015) | Secundario | Real | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. |
| Onodera et al. (2014) | Secundario | Piloto | 6.42E+06 | 1.97E+04 | 99.69 | D.N.R. | 7.27E+06 | 2.21E+04 | 99.70 | D.N.R. |
| Uemura & Harada (2010) | Secundario | Real | 3.09E+06 | 6.24E+04 | 97.98 | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. |

Nota: D.N.R.: Dato no reportado; N= número de muestra.

OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

A continuación, se presentan distintos aspectos de operación y mantenimiento de los FP.

- **Puesta en marcha**

La formación de la biopelícula en el medio filtrante requiere aproximadamente de 2 a 3 semanas para desarrollarse por completo (Ortega de Miguel, 2010). Para lograr esto, es crucial asegurar un suministro constante de aguas residuales provenientes del tratamiento primario.

- **Actividades de operación y mantenimiento**

En la Tabla B54 se pueden observar las principales actividades de operación y mantenimiento de los FP.

Tabla B54. Activades de operación y mantenimiento en filtro percoladores

| Descripción | Frecuencia |
|---|-------------------|
| Extracción y gestión de fangos y flotantes ¹ | 1 vez a la semana |
| Inspección del sistema de distribución. | 2-3 veces al año |
| Mantenimiento de obra civil ¹ | 2 vez a la semana |

Fuente: 1 Ortega de Miguel (2010)

- **Riesgos asociados**

Los filtros percoladores presentan varios riesgos asociados a su operación y mantenimiento. Estos incluyen la generación de olores debido a una ventilación insuficiente, la disminución de la eficiencia de remoción debido a la pérdida de biomasa y el incremento de sólidos en suspensión, así como la posible colmatación del lecho filtrante (Ortega de Miguel, 2010).

FLEXIBILIDAD

Los filtros percoladores tienen la capacidad de ajustarse de manera efectiva a las posibles variaciones en la carga hidráulica y orgánica que puedan surgir, lo que los hace altamente adecuados para enfrentar dichas fluctuaciones (Ortega de Miguel, 2010).

CRITERIOS DE DISEÑO

El dimensionamiento de esta tecnología se suele estimar a través de la carga hidráulica superficial, aunque, se suelen considerar diversos factores como el caudal a tratar, su carga orgánica, el material filtrante y la recirculación de efluente. El material debe cumplir con requisitos de resistencia estructural, ligereza, estabilidad química y alta área superficial (Von Sperling, 2007a). De igual manera, otro factor importante en el diseño es la recirculación del agua a través del filtro, que determina si el filtro es de baja o alta tasa. Esto tiene un impacto directo en el área requerida por el filtro y su consumo energético (Von Sperling, 2007a). Los distintos parámetros recomendados de diseño para distintas variantes son presentados en la Tabla B55.

Tabla B55. Valores recomendados para distintos parámetros de diseño de filtro percoladores

| Parámetro | Baja tasa | Tasa intermedia | Alta tasa |
|--|-----------|-----------------|----------------|
| Medio filtrante | Roca | Roca | Roca /plástico |
| Carga hidráulica (m ³ /m ² -día) | 1.0 a 4.0 | 3.5 a 10.0 | 10.0 a 40.0 |
| Carga orgánica (kg DBO /m ³ -día) | 0.1 a 0.4 | 0.2 a 0.5 | 0.5 a 1.0 |
| Recirculación del efluente | Mínima | Ocasional | Siempre |
| Profundidad | 1.8 a 2.5 | 1.8 a 2.6 | 0.9 a 3.0 |
| Nitrificación (m) | Alta | Parcial | Parcial |

Fuente: Adaptado de Von Sperling (2007a)

POTENCIAL DE ACTUALIZACIÓN

Los filtros percoladores permiten variar distintos aspectos como la recirculación o el tipo de material filtrante utilizado con el fin reducir ampliar el caudal tratado por esta tecnología o aumentar la remoción de nutrientes (Von Sperling, 2007a). No obstante, estos cambios pueden implicar un aumento de la dificultad y el costo de operación (Brault et al., 2022).

B.8.3. ASPECTOS ECONÓMICOS

A continuación, se presentan distintos aspectos económicos de los filtros percoladores.

INVERSIÓN INICIAL

La inversión inicial de los filtros percoladores depende de diversos factores como la mano de obra local y el tipo de material filtrante utilizado. Según Von Sperling & Chernicharo (2005), la inversión inicial para esta tecnología puede oscilar entre 50 y 60 USD por habitante equivalente según estimaciones realizadas para Brasil el año 2002. Por otro lado, Ortega de Miguel (2010) estimar que el costo inicial de los filtros percoladores en España para el año 2008 puede variar entre 165 y 980 USD por habitante equivalente, dependiendo de la población atendida. Los valores de inversión reportados convertidos al año 2023 a través de la aplicación de factores de inflación, son de 176.05 y 211.26 USD por habitante equivalente para Brasil, y para los datos reportados para España el 2023 se encuentran en un rango de 215.70 y 1281.15 USD por habitante equivalente.

COSTOS APROXIMADOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

Los costos de operación y mantenimiento de esta tecnología se sitúan en el rango de 4 a 6 USD por habitante equivalente al año, según lo indicado por Von Sperling (2007b). Estos valores actualizados al año 2023 son de aproximadamente 14.08 y 21.13 USD por habitante equivalente al año.

B.8.4. ASPECTOS AMBIENTALES

A continuación, se presentan diferentes aspectos ambientales que presentan los filtros percoladores.

CONSUMO ENERGÉTICO

A pesar de utilizar equipos mecánicos, los filtros percoladores presentan un consumo energético relativamente bajo debido a la ausencia de aeración mecánica en su proceso de tratamiento (Von Sperling, 2007a). Según estimaciones de Ortega de Miguel (2010), el consumo energético de esta tecnología se sitúa en el rango de 0.6 a 0.9 kWh/kg de DBO₅ tratado.

GENERACIÓN DE OLORES

La producción de olores asociada a esta tecnología es mínima debido al predominio de procesos aerobios (Von Sperling, 2007a).

PRODUCCIÓN DE LODOS

En general, los lodos generados por esta tecnología tienen un nivel de estabilización reducido (Ortega de Miguel, 2010; Tilley et al., 2014)). Se estima que la producción de lodos de esta tecnología varía entre 360 y 1100 litros por habitante equivalente al año.

GENERACIÓN DE RUIDOS

Aunque el uso de equipos mecánicos en esta tecnología puede generar cierto nivel de ruido, se ha observado que la intensidad del ruido es relativamente baja, según lo mencionado por Ortega de Miguel (2010).

EMISIONES GASES EFECTO INVERNADERO

Debido a la naturaleza aerobia de esta tecnología, las emisiones de gas metano no son significativas (IPPC, 2014). Por otro lado, según Søvik & Kløve (2007), se estima que del 0.004% al 8% de la carga de nitrógeno aplicada puede liberarse en forma de óxido nitroso.

OPORTUNIDADES DE APROVECHAMIENTO DE SUBPRODUCTOS

A continuación, se presentan oportunidades de aprovechamiento de los subproductos generados durante el tratamiento mediante FP.

- **Biogás**

Al ser un proceso principalmente aerobio la producción de biogás no es considerable (Von Sperling, 2007c).

- **Biomasa**

La biomasa generada en los filtros percoladores presenta un nivel de estabilización bajo (Andreoli et al., 2007; Ortega de Miguel, 2010) Por lo tanto, si se desea aprovechar este subproducto, es necesario llevar a cabo procesos de estabilización y desinfección.

- **Reúso del agua**

El efluente producido por esta tecnología generalmente es adecuado para su uso en irrigación restringida (Brault et al., 2022). Sin embargo, si se desea ampliar las opciones de reutilización, se deben aplicar etapas adicionales de desinfección al efluente (Brault et al., 2022).

B.8.5. VENTAJAS Y DESVENTAJAS

En Tabla B56 se pueden observar las principales ventajas y desventajas de la implementación de los FP para el tratamiento de AR.

Tabla B56. Ventajas y desventajas de los filtros percoladores

| Ventajas | Desventajas |
|--|---|
| Alta remoción de materia orgánica | Requiere suministros de energía eléctrica constante |
| Bajo requerimiento de área | Posibilidad de colmatación del medio filtrante |
| Tecnología con resistencia a las fluctuaciones de carga contaminante | Inversión inicial relativamente alta. |
| | Producción de lodos con baja estabilización |

REFERENCIA

- Andreoli, C. V., Von Sperling, M., & Fernandes, F. (2007). Sludge treatment and disposal. IWA publ.
- Brault, J.-M., Buchauer, K., & Martin, G. (2022). Wastewater Treatment and Reuse: A Guide to Help Small Towns Select Appropriate Options. International Bank for Reconstruction and Development / The World Bank.
- Chernicharo, C. a. L., & Almeida, P. G. S. (2011). Feasibility of UASB/trickling filter systems without final clarifiers for the treatment of domestic wastewater in small communities in Brazil. *Water Science and Technology: A Journal of the International Association on Water Pollution Research*, 64(6), 1347–1354. <https://doi.org/10.2166/wst.2011.389>
- IPPC. (2014). 2013 supplement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: Wetlands : methodological guidance on lands with wet and drained soils, and constructed wetlands for wastewater treatment. Ipcc, Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Okubo, T., Onodera, T., Uemura, S., Yamaguchi, T., Ohashi, A., & Harada, H. (2015). On-site evaluation of the performance of a full-scale down-flow hanging sponge reactor as a post-treatment process of an up-flow anaerobic sludge blanket reactor for treating sewage in India. *Bioresource Technology*, 194. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.07.015>
- Onodera, T., Tandukar, M., Sugiyana, D., Uemura, S., Ohashi, A., & Harada, H. (2014). Development of a sixth-generation down-flow hanging sponge (DHS) reactor using rigid sponge media for post-treatment of UASB treating municipal sewage. *Bioresource Technology*, 152, 93–100. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.10.106>

- Ortega de Miguel, E. (2010). Manual para la implantación de sistemas de depuración en pequeñas poblaciones. Ministerio Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.
- Søvik, A. K., & Kløve, B. (2007). Emission of N₂O and CH₄ from a constructed wetland in southeastern Norway. *Science of The Total Environment*, 380(1–3), 28–37.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.10.007>
- Tilley, E., Ulrich, L., Luthi, C., Reymond, P., & Zurbrügg, C. (2014). *Compendium of Sanitation Systems and Technologies*.
- Uemura, S., & Harada, H. (2010). Application of UASB technology for sewage treatment with a novel post-treatment process. In *Environmental Anaerobic Technology* (pp. 91–112). Imperial College Press. https://doi.org/10.1142/9781848165434_0005
- Von Sperling, M. (2007a). Activated sludge and aerobic biofilm reactors. IWA publ.
- Von Sperling, M. (2007b). *Wastewater Characteristics, Treatment and Disposal*. IWA Publishing.
<http://www.oapen.org/download?type=document&docid=640137>
- Von Sperling, M., & Chernicharo, C. A. de L. (2005). *Biological wastewater treatment in warm climate regions*. IWA publishing.

B.9. Ficha 9- CONTACTOR BIOLÓGICO ROTATIVO

B.9.1. GENERALIDADES

DESCRIPCIÓN

El Contactor Biológico Rotativo (CBR) es una tecnología para el tratamiento de Aguas Residuales (AR). Esta tecnología consiste en un tanque prismático donde se instalan discos igualmente separados en un eje horizontal. Estos discos giran a un ritmo constante y este movimiento permite la exposición de los discos a la atmosfera favoreciendo el crecimiento de una biopelícula en su superficie (Von Sperling, 2007a). A medida que las AR circulan y entran en contacto con esta biopelícula, ocurre la eliminación de materia orgánica y nutrientes. Cuando la biopelícula alcanza un grosor excesivo, se desprende de los discos y se convierte en biomasa suspendida, lo cual mejora la eficiencia del tratamiento (Von Sperling, 2007a). Sin embargo, es posible que parte de esta biomasa suspendida sea arrastrada con el efluente, por lo que se requiere la instalación de un sedimentador secundario (Brault et al., 2022; Ortega de Miguel, 2010).

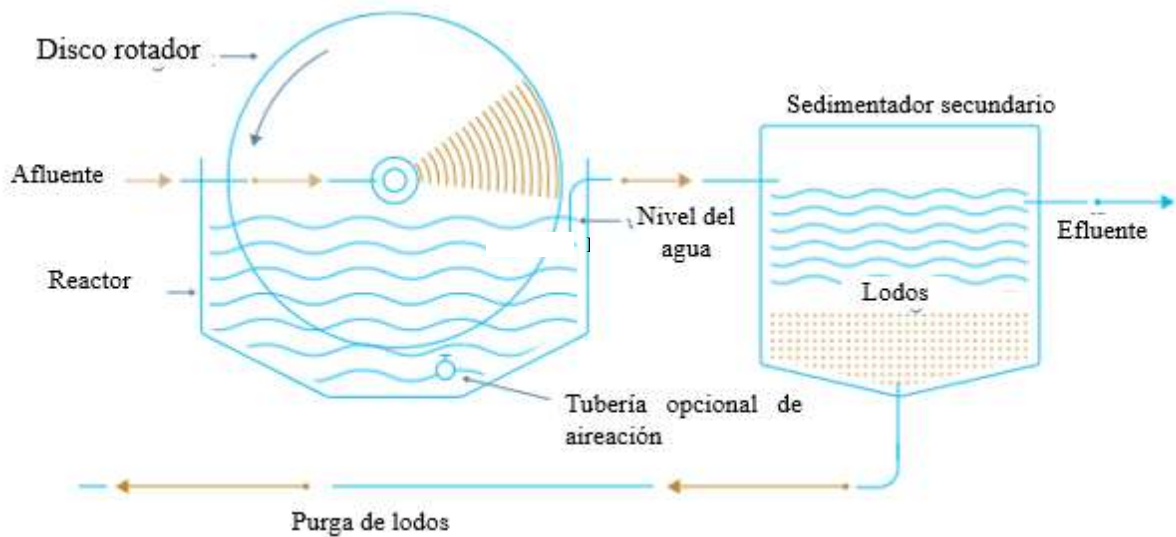
COMPONENTES

En la Figura B12 se puede observar un esquema típico de un CBR. Además, a continuación, se describen sus principales componentes.

- **Contenedor:** Construido en concreto, materiales plásticos o metales, el contenedor es una estructura que cuenta con entradas y salidas en cada extremo del tanque. El agua residual circula dentro de este contenedor mientras entra en contacto con los biodiscos. La forma geométrica del contenedor varía según el eje rotador y el medio de soporte de la biopelícula (Ortega de Miguel, 2010).

- **Conjunto rotor:** Este conjunto está compuesto por un eje conectado a un motor rotor mediante acoplamiento elástico. Su función es mantener la velocidad de giro de los discos en un rango de 1 a 2 revoluciones por minuto (r.p.m.) (Ortega de Miguel, 2010; Von Sperling, 2007a).
- **Discos:** Los discos son utilizados como medio de soporte y generalmente tienen una forma circular. Se construyen con materiales plásticos de baja densidad. Estos discos se sumergen típicamente hasta un 40% de su volumen total (Von Sperling, 2007a).
- **Cubierta:** La cubierta se utiliza para proteger el reactor de los factores climáticos. Por lo general, se construye con fibra de vidrio o aluminio y cuenta con trampillas para la aireación y compartimentos de acceso para su mantenimiento (Ortega de Miguel, 2010).
- **Tanque de sedimentación secundaria:** Este tanque se utiliza para separar el agua tratada de los lodos en exceso y las biopelículas desprendidas (Ortega de Miguel, 2010).

Figura B12. Esquema de un contactor biológico rotativo



Fuente: Adaptado de Brault et al. (2022)

B.9.2. ASPECTOS TÉCNICOS

A continuación, se presentan distintos aspectos técnicos de los CBR.

NIVEL DE TRATAMIENTO RECOMENDADO

Los CBR son usualmente utilizados para el tratamiento secundario de AR (MVCT, 2021; Ortega de Miguel, 2010).

POBLACIÓN RECOMENDADA

Se recomienda la aplicación de esta tecnología en aglomeraciones superiores a 200 habitantes equivalentes (Ortega de Miguel, 2010).

ÁREA SUPERFICIAL

El área superficial requerida por esta tecnología puede variar entre 0.1 a 0.2 m² por habitante equivalente (Von Sperling, 2007b). Otras estimaciones señalan que el requerimiento de área de esta tecnología ronda los 0.4 a 0.7 m² por habitante equivalente (Ortega de Miguel, 2010).

REMOCIÓN DE CONTAMINANTES

En la Tabla B57 y B58 se presentarán distintas eficiencias remoción de sólidos suspendidos, materia orgánica y nutrientes encontradas en la literatura para los CBR.

Tabla B57. Remociones de sólidos suspendidos y materia orgánica en Contactores Biológicos Rotativos

| Parámetro | | | SST (mgl-1) | | | | DBO ₅ (mgl-1) | | | | DQO (mgl-1) | | | |
|-----------------------|----------------------|--------|-------------|--------|------------|--------|--------------------------|--------|------------|--------|-------------|--------|------------|--------|
| Fuente | Nivel de tratamiento | Escala | Entrada | Salida | % remoción | N | Entrada | Salida | % remoción | N | Entrada | Salida | % remoción | N |
| Waqas et al. (2020) | Primario | Piloto | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | 298.00 | 81.00 | 72.82 | D.N.R. |
| Waqas et al. (2021) | Primario | Piloto | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | 250.00 | 75.00 | 70.00 | D.N.R. |
| Cheng et al. (2022) | secundario | Real | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | 64.90 | 22.60 | 65.18 | D.N.R. |
| Márquez et al. (2022) | secundario | Real | 286.00 | 19.00 | 93.36 | D.N.R. | 163.00 | 12.00 | 92.64 | D.N.R. | 300.00 | 40.00 | 86.67 | D.N.R. |

Notas: SST=Sólidos Suspendidos Totales; DBO₅=Demanda Bioquímica de Oxígeno; DQO= Demanda Química de Oxígeno; D.N.R: Dato no reportado; N= número de muestra.

Tabla B58. Remociones de nutrientes en biorreactores en Contactores Biológicos Rotativos

| Parámetro | | | NH ₄ -N (mgl-1) | | | | NT (mgl-1) | | | | PT (mgl-1) | | | |
|-----------------------|----------------------|--------|----------------------------|--------|------------|--------|------------|--------|------------|--------|------------|--------|------------|--------|
| Fuente | Nivel de tratamiento | Escala | Entrada | Salida | % remoción | N | Entrada | Salida | % remoción | N | Entrada | Salida | % remoción | N |
| Waqas et al. (2020) | Primario | Piloto | 0.92 | 0.07 | 92.39 | D.N.R. | 2.40 | 0.88 | 63.33 | D.N.R. | 0.65 | 0.19 | 70.77 | D.N.R. |
| Waqas et al. (2021) | Primario | Piloto | 0.66 | 0.05 | 92.45 | D.N.R. | 2.20 | 0.85 | 61.36 | D.N.R. | 0.59 | 0.17 | 71.19 | D.N.R. |
| Cheng et al. (2022) | secundario | Real | 10.50 | 2.90 | 72.38 | D.N.R. | 17.40 | 14.40 | 17.24 | D.N.R. | 2.60 | 1.90 | 26.92 | D.N.R. |
| Márquez et al. (2022) | secundario | Real | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. |

Nota: NH₄-N = Nitrógeno amoniacal; NT=Nitrógeno total; PT=Fosforo total; D.N.R: Dato no reportado; N= número de muestra.

OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

A continuación, se presentan distintos aspectos de operación y mantenimiento de los CBR.

- **Puesta en marcha**

El objetivo principal al iniciar el proceso es desarrollar una biopelícula de espesor estable en el material de soporte y lograr una sedimentación adecuada de los sólidos en el decantador secundario. Para alcanzar este objetivo, es crucial asegurar una alimentación constante. Este proceso suele tomar alrededor de 3 a 4 semanas, según lo mencionado (Ortega de Miguel, 2010).

- **Actividades de operación y mantenimiento**

En la Tabla B59 se pueden observar las principales actividades de operación y mantenimiento de los CBR.

Tabla B59. Activades de operación y mantenimiento de los Contactores Biológicos Rotativos

| Actividad | Frecuencia |
|---|----------------------|
| Inspección general de motores y sistemas de purgas ¹ . | 2-3 veces por semana |
| Mantenimiento electromecánico y de obra civil ¹ . | 2-3 veces por semana |
| Extracción y evacuación de lodos decantador secundario ¹ . | 1 vez por semana |

Fuente: ¹ Ortega de Miguel (2010)

- **Riesgos asociados**

Entre los riesgos asociados con la operación y mantenimiento de los CBR, se encuentran la pérdida de masa en la biopelícula debido a la presencia de sustancias tóxicas en la flora bacteriana, fluctuaciones significativas en el pH del influente y una velocidad de giro excesivamente alta de los discos (Ortega de Miguel, 2010). Además, otro problema es la baja eficiencia en la remoción de carga contaminante debido a la sobrecarga orgánica (Ortega de Miguel, 2010).

- **Flexibilidad**

Esta tecnología presenta un buen comportamiento frente a sobrecargas hidráulicas y orgánicas puntuales. Además, la biopelícula aporta resistencia ante la presencia de componentes tóxicos en el afluente (Ortega de Miguel, 2010).

CRITERIOS DE DISEÑO

Uno de los principales aspectos a tener en cuenta es el contaminante el cual se desea priorizar su remoción, si se desea remover materia orgánica se suele diseñar 2 etapas de discos (Ortega de Miguel, 2010). Por otro lado, si desea lograr la nitrificación y la remoción de materia orgánica se suelen utilizar 3 o 4 etapas (Ortega de Miguel, 2010; Von Sperling, 2007a). Parámetros como la carga hidráulica, la carga hidráulica superficial y el tiempo de retención en cada etapa varían en función de estos objetivos (Ortega de Miguel, 2010; Von Sperling, 2007a). En la Tabla 4 se presentan distintos parámetros de diseño en función del objetivo de tratamiento para los CBR.

Tabla B60. Valores recomendados para parámetros de diseño de los Contactores Biológicos Rotativos

| Parámetro | Unidad | Remoción de DBO | Remoción de DBO y nitrificación | Nitrificación |
|---|---|-----------------|---------------------------------|---------------|
| Carga hidráulica | m ³ /m ² -día | 0.08 a 0.16 | 0.03 a 0.08 | 0.04 a 0.1 |
| Carga orgánica superficial soluble (COSS) | gDBO ₅ Soluble/m ² -día | 3.7 a 9.8 | 2.4 a 7.3 | 0.5 a 1.5 |
| Carga orgánica superficial (COS) | gDBO ₅ /m ² -día | 9.8 a 17.2 | 7.3 a 14.6 | 1.0 a 2.9 |
| COSS máxima en la primera etapa | gDBO ₅ Soluble/m ² -día | 19 a 29 (14*) | 19 a 29 (14*) | - |
| COSS máxima en la primera etapa | gDBO ₅ /m ² -día | 39 a 59 (30*) | 39 a 59 (30*) | - |
| Carga de nitrógeno superficial | N-NH ₄ /m ² -día | - | 7.3 a 14.6 | 1.0 a 2.0 |
| Tiempo de retención hidráulica | horas | 0.7 a 1.5 | 7.3 i 14.6 | 1.2 a 2.9 |

Fuente: Adaptado de Von Sperling (2007a)

POTENCIAL DE ACTUALIZACIÓN

Los CBR ofrecen flexibilidad en términos de ajustar diversos aspectos, como el número de biodiscos y etapas, o la implementación de aireación mecánica, con el objetivo de aumentar la capacidad de tratamiento o mejorar la eliminación de nutrientes (Von Sperling, 2007a). No obstante, estos cambios pueden implicar un aumento de la dificultad y el costo de operación (Brault et al., 2022).

B.9.3. ASPECTOS ECONÓMICOS

A continuación, se presentan distintos aspectos económicos de los CBR.

INVERSIÓN INICIAL

La inversión inicial para esta tecnología de tratamiento depende de la carga contaminante, la población servida y el objetivo del tratamiento (Nitrificación o remoción de materia orgánica). Por ejemplo, Ortega de Miguel (2010) estimaron que en España en 2008 la inversión inicial para esta tecnología puede oscilar entre 380 y 545 USD por habitante equivalente. Por otro lado, Von Sperling (2007b) estima que para la Brasil en 2002 la inversión inicial puede variar entre 50 y 60 USD por habitante equivalente. Los valores de inversión inicial presentados anteriormente convertidos al 2023 son de 545.77 y 712.47 USD por habitante equivalente para España. Mientras que, para Brasil estos valores varían de 176.05 a 211.26 USD por habitante equivalente.

COSTOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

Los costos de operación y mantenimiento de los CBR varían dependiendo del contexto de aplicación. Por ejemplo, Ortega de Miguel (2010) hicieron estimaciones de 17 a 26 USD por habitante equivalente al año. Por otro lado, Von Sperling (2007b) estimaron que los costos de

operaciones varían de a 4-6 USD por habitante equivalente al año. Para el 2023, los costos aproximados de operación y mantenimiento para España son de 22.22 y 33.94 USD por habitante equivalente al año. Referente a Brasil, los costos estimados de operación y mantenimiento oscilan de 14.08 a 21.12 USD por habitante equivalente al año.

B.9.4. ASPECTOS AMBIENTALES

A continuación, se presentan diferentes aspectos ambientales que presentan los CBR.

CONSUMO ENERGÉTICO

El consumo energético de esta tecnología oscila desde los 0.3 a los 0.7 kWh/Kg de DBO₅ removido (Ortega de Miguel, 2010).

GENERACIÓN DE OLORES

La generación de olores por parte de esta tecnología es baja, en trenes compuestos por esta tecnología los olores están asociados principalmente al tratamiento primario (Ortega de Miguel, 2010).

PRODUCCIÓN DE LODOS

Los lodos generados por los CBR suele tener un bajo nivel de estabilización (Andreoli et al., 2007). Se estima que esta tecnología genera de 330 a 1500 L de lodos por habitante equivalente (Von Sperling, 2007c).

GENERACIÓN DE RUIDOS

Debido a la baja potencia requerida por los equipos mecánicos y al reducido número de revoluciones de los discos, esta tecnología genera un nivel de ruido muy bajo (Ortega de Miguel, 2010).

EMISIONES DE GASES EFECTO INVERNADERO

De acuerdo con las estimaciones de la IPCC (2019), las emisiones de metano provenientes de esta tecnología son de 7.5 g CH₄/kg de DQO removido, mientras que las emisiones de óxido nitroso se sitúan en alrededor de 25 g N₂O /kg de N total del área de tratamiento.

OPORTUNIDADES DE APROVECHAMIENTO DE SUBPRODUCTOS

A continuación, se presentan oportunidades de aprovechamiento de los subproductos generados durante el tratamiento mediante CBR.

- **Biogás**

Debido a su naturaleza predominantemente aerobia, la producción de biogás en este proceso no es considerable (Von Sperling, 2007c)

- **Biomasa**

La biomasa generada en los filtros percoladores presenta un nivel de estabilización bajo (Andreoli et al., 2007; Ortega de Miguel, 2010). Por lo tanto, si se desea aprovechar este subproducto es necesario llevar a cabo procesos de estabilización y desinfección.

- **Reúso del agua**

El efluente producido por esta tecnología generalmente es adecuado para su uso en irrigación restringida (Brault et al., 2022). Sin embargo, si se desea ampliar las opciones de reutilización, se deben aplicar etapas adicionales de desinfección al efluente (Brault et al., 2022).

B.9.5. VENTAJAS Y DESVENTAJAS

En la Tabla B61 se pueden observar las principales actividades de operación y mantenimiento de los CBR.
Tabla B61. Ventajas y desventajas de los Contactores Biológicos Rotativos

| Ventajas | Desventajas |
|--|--|
| Baja área superficial requerida | Inversión inicial relativamente alta |
| Baja posibilidad de generación de olores | Requerimiento energético constante para el tratamiento |
| Altas remociones de materia orgánica | Costos de operación y mantenimiento elevados |

REFERENCIAS

- Andreoli, C. V., Von Sperling, M., & Fernandes, F. (2007). Sludge treatment and disposal. IWA publ.
- Brault, J.-M., Buchauer, K., & Martin, G. (2022). Wastewater Treatment and Reuse: A Guide to Help Small Towns Select Appropriate Options. International Bank for Reconstruction and Development / The World Bank.
- Cheng, F., Wang, C., Wen, C., Wang, S., Cheng, H., Shen, S., & Lu, X. (2022). Full-scale application and performance of a low-consuming system for decentralized village domestic wastewater treatment. *Journal of Water Process Engineering*, 46, 102594. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102594>
- IPCC. (2019). 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.
- Márquez, P., Gutiérrez, M. C., Toledo, M., Alhama, J., Michán, C., & Martín, M. A. (2022). Activated sludge process versus rotating biological contactors in WWTPs: Evaluating the influence of operation and sludge bacterial content on their odor impact. *Process Safety and Environmental Protection*, 160, 775–785. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.02.071>
- MVCT, M. de V., Ciudad y Territorio. (2021). Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS): TÍTULO E. Tratamiento de Aguas Residuales. Viceministerio de Agua y Saneamiento Básico.

- Ortega de Miguel, E. (2010). Manual para la implantación de sistemas de depuración en pequeñas poblaciones. Ministerio Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.
- Von Sperling, M. (2007a). Activated sludge and aerobic biofilm reactors. IWA publ.
- Von Sperling, M. (2007b). Wastewater Characteristics, Treatment and Disposal. IWA Publishing.
<http://www.oapen.org/download?type=document&docid=640137>
- Waqas, S., Bilad, M. R., Man, Z. B., Klaysom, C., Jaafar, J., & Khan, A. L. (2020). An integrated rotating biological contactor and membrane separation process for domestic wastewater treatment. *Alexandria Engineering Journal*, 59(6), 4257–4265.
<https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.07.029>
- Waqas, S., Bilad, M. R., Man, Z. B., Suleman, H., Hadi Nordin, N. A., Jaafar, J., Dzarfan Othman, M. H., & Elma, M. (2021). An energy-efficient membrane rotating biological contactor for wastewater treatment. *Journal of Cleaner Production*, 282, 124544.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124544>

B.10. Ficha 10 -AIREACIÓN EXTENDIDA (AE)

B.10.1. GENERALIDADES

DESCRIPCIÓN

La aireación extendida (AE) es una tecnología utilizada en el tratamiento de aguas residuales (AR). Se trata de una variante de los sistemas convencionales de lodos activados en la cual se prolongan los tiempos de retención de los lodos en el reactor, así como el tiempo de retención hidráulica (Von Sperling, 2007a). Estas condiciones propician el comportamiento endógeno de las bacterias en el reactor y permiten la digestión aerobia de la biomasa, lo que a su vez simplifica el sistema de tratamiento al prescindir del tratamiento primario y del digestor de lodos generado (Von Sperling, 2007a).

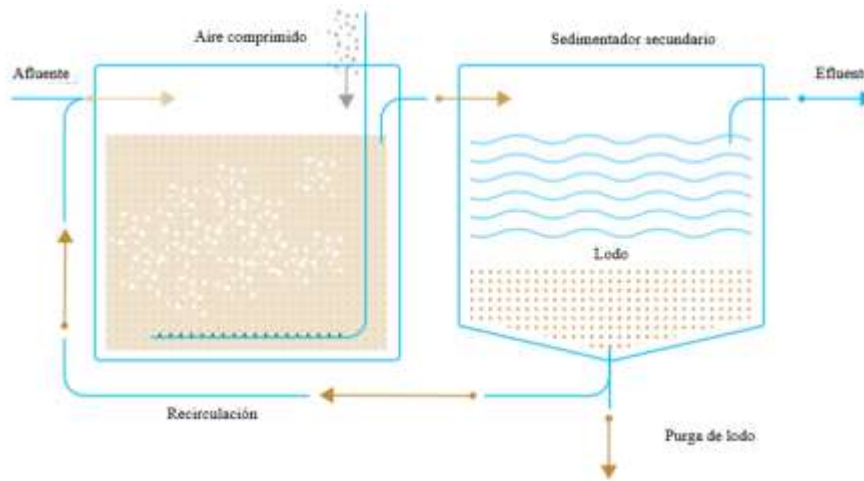
COMPONENTES

En la Figura B13 se observa el esquema típico de un sistema de aireación extendida y, a continuación, se presentan los principales componentes de esta tecnología.

- **Reactor biológico:** Puede ser rectangular, cuadrado o adaptar la configuración de un canal de oxidación, generalmente construido en concreto reforzado. La salida del efluente del reactor deberá realizarse mediante vertedero superficial y sin placas deflectoras, para evitar la acumulación de espumas y flotantes en el reactor (Ortega de Miguel, 2010).
- **Sistema de aireación:** los métodos más comunes son mediante difusores sumergidos o aireación mecánico. El sistema de aireación debe permitir la mezcla completa de la biomasa y la transferencia eficiente de oxígeno (Ortega de Miguel, 2010).
- **Decantador secundario:** Utilizado para depurar una pequeña parte del lodo que sale del reactor (Von Sperling, 2007a).

- **Sistema de recirculación de fangos:** Realizada mediante bombeo y debe ser automatizada mediante temporizador, este sistema es utilizado para mantener una alta concentración de licor mezcla en el rector y para la purga de excesos de lodo (Ortega de Miguel, 2010).

Figura B13. Esquema aireación extendida



Fuente: Adaptado de Brault et al. (2022)

B.10.2. ASPECTOS TÉCNICOS

A continuación, se presentan distintos aspectos técnicos de la aireación extendida.

Nivel de tratamiento recomendado

Debido a que con esta tecnología se busca la simplificación de la gestión de lodos haciendo que la depuración de agua residual y la estabilización de la biomasa ocurran en el mismo contenedor, no es común utilizar tratamiento primario (Brault et al., 2022; Von Sperling, 2007a). Por ende, esta tecnología se suele utilizar como etapa única en el tratamiento, aunque puede ser complementada si se requiere un efluente de mayor calidad.

Población recomendada

Se recomienda la aplicación de aeración extendida en comunidades con población superior a los 500 habitantes (Ortega de Miguel, 2010).

Área Superficial

Acorde a estimaciones hechas por Ortega de Miguel (2010), la superficie aproximada requerida por esta tecnología puede variar entre 0.2 a 0.45 m² por habitante servido. Por otro lado, (Von Sperling, 2007b) determinó que esta tecnología puede tener requerimientos de 0.12 a 0.25 m² por habitante equivalente

Remoción de contaminantes

En las Tabla B70, Tabla B71 y Tabla B72 se presentarán distintas eficiencias remoción de sólidos suspendidos, materia orgánica, nutrientes y microorganismos patógenos encontradas para la aireación extendida.

Tabla B70. Remociones de sólidos suspendidos y materia orgánica en aireación extendida

| Parámetro | | | SST (mg/l-1) | | | | DBO5 (mg/l-1) | | | | DQO (mg/l-1) | | | |
|--------------------------------|----------------------|--------|--------------|--------|------------|--------|---------------|--------|------------|--------|--------------|--------|------------|--------|
| Fuente | Nivel de tratamiento | Escala | Entrada | Salida | % remoción | N | Entrada | Salida | % remoción | N | Entrada | Salida | % remoción | N |
| Colmenarejo et al. (2006) | Secundario | Real | 194.17 | 40.00 | 79.40 | D.N.R. | 225.81 | 28.00 | 87.60 | D.N.R. | 476.64 | 51.00 | 89.30 | D.N.R. |
| Al-Sa'ed & Tomaleh (2012) | Secundario | Real | 662.00 | 8.40 | 98.73 | D.N.R. | 501.20 | 12.00 | 97.61 | D.N.R. | 1130.00 | 96.10 | 91.50 | D.N.R. |
| Rodriguez-Garcia et al. (2011) | Secundario | Real | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | 220.00 | 8.00 | 96.36 | D.N.R. |
| Nikmanesh et al. (2018) | Secundario | Real | 105.00 | 42.30 | 59.71 | D.N.R. | 54.83 | 26.16 | 52.29 | D.N.R. | 102.66 | 47.50 | 53.73 | D.N.R. |

Notas: SST =Sólidos Suspendidos Totales; DBO₅ =Demanda Bioquímica de Oxígeno; DQO= Demanda Química de Oxígeno; D.N.R. = Dato no reportado; N= número de datos.

Tabla B71. Remociones de nutrientes en aireación extendida

| Parámetro | | | NH ₄ -N (mg/l-1) | | | | NT (mg/l-1) | | | | PT (mg/l-1) | | | |
|--------------------------------|----------------------|--------|-----------------------------|--------|------------|--------|-------------|--------|------------|--------|-------------|--------|------------|--------|
| Fuente | Nivel de tratamiento | Escala | Entrada | Salida | % remoción | N | Entrada | Salida | % remoción | N | Entrada | Salida | % remoción | N |
| Colmenarejo et al. (2006) | Secundario | Real | 17.97 | 2.30 | 87.20 | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. |
| Al-Sa'ed & Tomaleh (2012) | Secundario | Real | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | 101.90 | 23.50 | 76.94 | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. |
| Rodriguez-Garcia et al. (2011) | Secundario | Real | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | 47.28 | 7.08 | 85.03 | D.N.R. | 6.70 | 2.46 | 63.28 | D.N.R. |

Notas: NH₄-N = Nitrógeno amoniacal; NT= Nitrogeno total; PT= Fosforo total; D.N.R.=Dato no reportado; N= número de datos.

Tabla B72. Remociones de microorganismos patógenos en aireación extendida

| Parámetro | | | Coliformes fecales UFC 100 ml-1 | | | | Coliformes Totales UFC 100 ml-1 | | | |
|-------------------------|----------------------|--------|---------------------------------|----------|------------|--------|---------------------------------|----------|------------|--------|
| Fuente | Nivel de tratamiento | Escala | Entrada | Salida | % remoción | N | Entrada | Salida | % remoción | N |
| Nikmanesh et al. (2018) | Secundario | Real | 2209.16** | 368.83** | 83.30 | D.N.R. | 4848** | 774.16** | 84.03 | D.N.R. |

Notas: D.N.R.=Dato no reportado; N= número de datos.

OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

A continuación, se presentan distintos aspectos de operación y mantenimiento de los sistemas de aireación extendida.

- **Puesta en marcha**

La puesta en marcha de esta tecnología puede tener una duración de 1 a 3 meses. En esta etapa se busca alcanzar una concentración suficiente de sólidos en el licor mezcla del reactor, adecuar la cantidad de aire suministrada y conseguir flóculos con una alta capacidad de sedimentación (Ortega de Miguel, 2010).

- **Actividades de operación y mantenimiento**

En la Tabla B73 se pueden observar las principales actividades de operación y mantenimiento de la AE.

Tabla B73. *Activades de operación y mantenimiento en la aireación extendida*

| Actividad | Frecuencia |
|---|----------------------|
| Inspección general de motores y sistemas de purgas ¹ . | 2-3 veces por semana |
| Mantenimiento electromecánico y de obra civil ¹ . | 2-3 veces por semana |
| Extracción y evacuación de lodos decantador secundario ¹ . | 1 vez por semana |

Fuente: ¹ Ortega de Miguel (2010)

- **Riesgos asociados**

La operación de la Aireación Extendida (AE) conlleva diversos riesgos que pueden afectar su funcionamiento eficiente. Estos riesgos incluyen un bajo rendimiento en la eliminación de materia orgánica y nutrientes, principalmente debido a la insuficiente concentración de oxígeno disuelto, la presencia de sustancias tóxicas, la falta de nutrientes adecuados y una baja edad del lodo (Ortega de Miguel, 2010; Von Sperling, 2007a). Otro riesgo asociado es la formación de filamentos bulking, que se produce debido a desequilibrios en los nutrientes, la presencia de sulfuro y grasa en el sistema (Ortega de Miguel, 2010). Además, existe el riesgo de formación de espuma no

biológica, la cual puede ser causada por choques tóxicos y la falta de biomasa activa en el proceso de tratamiento (Ortega de Miguel, 2010; Von Sperling, 2007a).

- **Flexibilidad**

La aireación prolongada muestra una alta capacidad de asimilación de sobrecargas orgánicas, pero es altamente sensible a las sobrecargas hidráulicas, especialmente en el sedimentador secundario debido al fenómeno de arrastre de sólidos suspendidos (Ortega de Miguel, 2010).

CRITERIO DE DISEÑO

La edad del fango (θ) y la carga másica (C_m) son parámetros fundamentales en el diseño de estos procesos (MVCT, 2021). La edad del fango representa el tiempo de retención de los microorganismos en el sistema, mientras que la carga másica se refiere a la relación entre la materia orgánica ingresada al reactor y la cantidad de microorganismos presentes (Von Sperling, 2007a). Valores recomendados para este y otros parámetros de diseño son presentados en la Tabla 5.

Tabla B74. *Valores recomendados de parámetros de diseño para la aireación extendida*

| Parámetro | Unidad | Valores recomendados | |
|--|---|-------------------------|-------------|
| | | Ortega de Miguel (2010) | MVCT (2021) |
| Edad del fango | Días | 20-25 | >30 |
| Tiempo de retención hidráulico | Horas | 18-36 | 16-24 |
| Carga másica | Kg DBO ₅ /kg SSLM-día | 0.03-0.07 | 0.05-0.15 |
| Carga volumétrica | Kg DBO ₅ /m ³ | - | 0.16-0.3 |
| Sólidos en suspensión volátiles en el licor mezcla (MLSSV) | mg/L | 3000-5000 | 2000-6000 |
| Necesidad de oxígeno en la aireación | Kg O ₂ /kg DBO ₅ removido | 2.0-3.0 | 1.4 - 1.6 |
| Relación de recirculación interna | Q _r /Q | 1-1.5 | 1.3 |

POTENCIAL DE ACTUALIZACIÓN

Debido a los diferentes parámetros controlados durante la operación, la aireación extendida puede ser optimizada para la remoción de nutrientes a través de la incorporación de condiciones anoxias

sin requerir una inversión económica adicional notable (Brault et al., 2022; Ortega de Miguel, 2010).

B.10.3. ASPECTOS ECONÓMICOS

INVERSIÓN INICIAL

El costo inicial de inversión en esta tecnología varía según diversos factores y condiciones locales, como el costo de los materiales y la mano de obra involucrada. Por ejemplo, según estimaciones hechas para España en el 2008 (Ortega de Miguel, 2010), se determinó que la inversión inicial para esta tecnología oscila entre 108 y 435. Por otro lado, según Von Sperling (2007b), se estima que la inversión por habitante equivalente para implementar esta tecnología se encuentra en un rango de 35 a 55 USD. Para el 2023, realizando ajuste de estos valores utilizando el coeficiente de inflación, se tiene que la inversión inicial en España oscila entre 141.19 y 568.67 USD por habitante equivalente. Mientras que, para Brasil, los valores varían entre 123.24 y 193.66 USD por habitante equivalente.

COSTOS APROXIMADOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

Según estimaciones realizadas por Ortega de Miguel (2010) para España el año 2008, los costos anuales por habitante equivalente para esta tecnología se encuentran en un rango de 23 a 36 USD por habitante equivalente. Por otro lado, estimación presentadas por Von Sperling (2007b) para Brasil en el año 2002 los costos de operación de varían de a 4.0 a 8.0 USD por habitante equivalente. Para el 2023, realizando ajuste de estos valores utilizando el coeficiente de inflación, se tiene que la operación y mantenimiento en España oscila entre 30.07 y 33.99 USD por habitante equivalente. Mientras que, para Brasil, los valores varían entre 14.08 y 28.17 USD por habitante equivalente.

B.10.4. ASPECTOS AMBIENTALES

A continuación, se presentan diferentes aspectos ambientales que presentan la aireación extendida.

Consumo energético

El consumo energético de esta tecnología puede oscilar en 2-2.5 kWh por kg de DBO₅ removido (Ortega de Miguel, 2010).

Generación de olores

Debido a la no generación de lodos primarios y que los lodos secundarios presentan un nivel de estabilización alto, no se producen olores (Ortega de Miguel, 2010).

Producción de lodos

Se estima que la producción de lodos para esta tecnología varía entre 1200 y 2000 litros por habitante equivalente al año (Von Sperling, 2007c).

Generación de ruidos

Debido al alto potencia de los equipos de utilizados se suele producir ruido durante el proceso de tratamiento, si se desea reducir este ruido es necesario recurrir a procesos de aislamiento e insonorización (Ortega de Miguel, 2010).

Emisiones gases efecto invernadero

Según estimaciones del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático IPCC (2019) las emisiones de metano de esta tecnología son de 7.5 g CH₄ /kg de DQO removido mientras que las emisiones de óxido nitros son de aproximadamente 25 g N₂O /kg de NT del AR.

Oportunidades aprovechamiento de subproductos

A continuación, se presentan oportunidades de aprovechamiento de los subproductos generados durante el tratamiento mediante aireación extendida.

Biogás

Durante el proceso de tratamiento, no se genera biogás debido a la naturaleza aerobia del mismo (Von Sperling, 2007c).

Biomasa

La biomasa resultante del proceso de aeración extendida suele contar un alto nivel de estabilización, por ende para su aprovechamiento solo son necesarias fases de deshidratación y espesamiento (Ortega de Miguel, 2010).

Reúso del agua

El efluente producido por esta tecnología generalmente es adecuado para su uso en irrigación restringida (Brault et al., 2022). Sin embargo, si se desea ampliar las opciones de reutilización, se deben aplicar etapas adicionales de desinfección al efluente (Brault et al., 2022).

B.10.5. VENTAJAS Y DESVENTAJAS

En Tabla B75 se pueden observar las principales ventajas y desventajas de la implementación de la aireación extendida para el tratamiento de AR.

Tabla B75. *Ventajas y desventajas en biorreactores reactores de la aeración extendida*

| Ventajas | Desventajas |
|--|--|
| Baja área superficial requerida | Inversión inicial relativamente alta |
| Baja posibilidad de generación de olores | Requerimiento energético constante para el tratamiento |
| Altas remociones de materia orgánica | Costos de operación y mantenimiento elevados |

REFERENCIAS

- Al-Sa'ed, R., & Tomaleh, N. (2012). Performance Evaluation of a Full-Scale Extended Aeration System in Al-Bireh City, Palestine. *CLEAN – Soil, Air, Water*, 40(11), 1250–1256. <https://doi.org/10.1002/clen.201000095>
- Brault, J.-M., Buchauer, K., & Martin, G. (2022). Wastewater Treatment and Reuse: A Guide to Help Small Towns Select Appropriate Options. International Bank for Reconstruction and Development / The World Bank.
- Colmenarejo, M. F., Rubio, A., Sánchez, E., Vicente, J., García, M. G., & Borja, R. (2006). Evaluation of municipal wastewater treatment plants with different technologies at Las Rozas, Madrid (Spain). *Journal of Environmental Management*, 81(4), 399–404. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2005.11.007>
- IPCC. (2019). 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.
- MVCT, M. de V., Ciudad y Territorio. (2021). Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS): TÍTULO E. Tratamiento de Aguas Residuales. Viceministerio de Agua y Saneamiento Básico.
- Nikmanesh, M. S., Eslami, H., Momtaz, S. M., Biabani, R., Mohammadi, A., Shiravand, B., & Zarei Mahmoudabadi, T. (2018). Performance Evaluation of the Extended Aeration Activated Sludge System in the Removal of Physicochemical and Microbial Parameters of Municipal Wastewater: A Case Study of Nowshahr Wastewater Treatment Plant. *Journal of Environmental Health and Sustainable Development*, 3(2), 509–517.
- Ortega de Miguel, E. (2010). Manual para la implantación de sistemas de depuración en pequeñas poblaciones. Ministerio Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.

- Rodriguez-Garcia, G., Molinos-Senante, M., Hospido, A., Hernández-Sancho, F., Moreira, M. T., & Feijoo, G. (2011). Environmental and economic profile of six typologies of wastewater treatment plants. *Water Research*, 45(18), 5997–6010.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.08.053>
- Von Sperling, M. (2007a). Activated sludge and aerobic biofilm reactors. IWA publ.
- Von Sperling, M. (2007b). Wastewater Characteristics, Treatment and Disposal. IWA Publishing.
<http://www.oapen.org/download?type=document&docid=640137>

B.11. Ficha 11 - LAGUNA DE MADURACIÓN

B.11.1. GENERALIDADES

DESCRIPCIÓN

Las lagunas de maduración (LM) o de pulimento son una tecnología para el tratamiento de aguas residuales que busca replicar procesos auto depuradores que tienen lugar en los lagos cuyo principal objetivo es la remoción de microorganismos patógenos (CENTA, 2021; Von Sperling, 2007). Esto se logra a través de la presencia de condiciones como la radiación ultravioleta, valores altos de pH, oxígeno disuelto alto, falta de nutrientes y depredación por otros organismos (Von Sperling, 2007). Esta tecnología logra remociones altas de coliformes, protozoos y huevos de Helminto (Arceivala, 1981; Von Sperling, 2007).

COMPONENTES

A continuación, se presentan los principales componentes de las LM (Figura B14):

- **Dispositivo de entrada:** Usualmente compuesta por tuberías sumergidas ubicadas estratégicamente con el fin de evitar cortos circuitos hidráulicos (Von Sperling, 2007b). El número de tuberías puede variar en función del tamaño de la laguna (Von Sperling, 2007b).
- **Laguna:** En este componente ocurrirá el tratamiento de AR, usualmente consiste en una excavación compactada e impermeabilizada a través del empleo de geotextiles o la aplicación de arcillas o bentonitas (Ortega de Miguel, 2010).
- **Dispositivo de salida:** usualmente compuesta por baffles que preceden una tubería sumergida con un ángulo 90 grados seguido de una presa para el control de caudal (Ortega de Miguel, 2010; Von Sperling, 2007b). Este dispositivo no debe estar alineado con el de

entrada para evitar las zonas muertas y los cortos circuitos hidráulicos (Von Sperling, 2007b).

Figura B14. Esquema típico de una laguna de maduración



Fuente: Tomado de MVCT (2021)

B.11.2. ASPECTOS TÉCNICOS

A continuación, se presentan distintos aspectos técnicos de las LM.

NIVEL DE TRATAMIENTO RECOMENDADO

Las lagunas de maduración suelen ser utilizadas para la remoción de microorganismos patógenos, por ende, esta tecnología deben ser precedidas por un sistema de tratamiento secundario (MVCT, 2021; Von Sperling, 2007b).

POBLACIÓN RECOMENDADA

Se recomienda la aplicación de esta tecnología en aglomeraciones con una población menor a los 1000 habitantes equivalentes (Ortega de Miguel, 2010).

ÁREA SUPERFICIAL

El requerimiento de área de las lagunas de maduración suele oscilar entre 1.53 y 3.52 m² por habitante equivalente (Von Sperling, 2007).

REMOCIÓN DE CONTAMINANTES

En las Tabla B76, Tabla B77 y Tabla B78 se presentarán distintas eficiencias de remoción de sólidos suspendidos, materia orgánica, nutrientes y microorganismos patógenos encontradas para las LM.

Tabla B78. Remociones de sólidos suspendidos y materia orgánica en lagunas facultativas.

| Parámetro | | | SST (mg/l-1) | | | | DBO ₅ (mg/l-1) | | | | DQO (mg/l-1) | | | |
|----------------------|----------------------|--------|--------------|---------|------------|--------|---------------------------|--------|------------|--------|--------------|--------|------------|--------|
| Fuente | Nivel de tratamiento | Escala | Entrada | Salida | % remoción | N | Entrada | Salida | % remoción | N | Entrada | Salida | % remoción | N |
| Oakley et al. (2000) | Terciario | Real | 24 (SS) | 22 (SS) | 8.33 | D.N.R. | 143.00 | 122.00 | 14.69 | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. |
| Ghazy et al. (2008) | Terciario | Real | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | 180.70 | 145.30 | 19.59 | D.N.R. | 321.00 | 289.00 | 9.97 | D.N.R. |
| García et al. (2000) | Terciario | Real | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. |
| Dias et al., (2014) | Terciario | Real | 74.00 | 100.00 | -35.14 | D.N.R. | 78.00 | 59.00 | 24.36 | D.N.R. | 161.00 | 158.00 | 1.86 | D.N.R. |

Notas: SST=Sólidos Suspendidos Totales; SS= sólidos Suspendidos; DBO₅ =Demanda Bioquímica de Oxígeno; DQO= Demanda Química de Oxígeno; D.N.R.= Dato no reportado; N= número de datos; *= variante aireada.

Tabla B77. Remociones de nutrientes en lagunas facultativas.

| Parámetro | | | NH ₄ -N (mg/l-1) | | | | NT (mg/l-1) | | | | PT (mg/l-1) | | | |
|----------------------|----------------------|--------|-----------------------------|--------|------------|--------|-------------|--------|------------|--------|-------------|--------|------------|--------|
| Fuente | Nivel de tratamiento | Escala | Entrada | Salida | % remoción | N | Entrada | Salida | % remoción | N | Entrada | Salida | % remoción | N |
| Oakley et al. (2000) | Terciario | Real | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. |
| Ghazy et al. (2008) | Terciario | Real | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. |
| García et al. (2000) | Terciario | Real | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. |
| Dias et al., (2014) | Terciario | Real | 29.00 | 11.00 | 62.07 | D.N.R. | 38.00 | 18.00 | 52.63 | D.N.R. | 1.70 | 2.00 | -17.65 | D.N.R. |

Notas: NH₄-N = Nitrógeno amoniacal; NT: Nitrógeno total; PT= Fosforo total; D.N.R.=Dato no reportado; *= variante aireada.

Tabla B78. Remociones de patógenos en lagunas facultativas.

| Parámetro | | | Coliformes fecales NMP | | | | Coliformes Totales NMP | | | |
|----------------------|----------------------|--------|------------------------|----------|------------|--------|------------------------|----------|------------|--------|
| Fuente | Nivel de tratamiento | Escala | Entrada | Salida | % remoción | N | Entrada | Salida | % remoción | N |
| Oakley et al. (2000) | Terciario | Real | 1.06E+05 | 7.56E+03 | 92.87 | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. |
| Ghazy et al. (2008) | Terciario | Real | 3.60E+07 | 1.60E+06 | 95.56 | D.N.R. | 9.20E+08 | 3.80E+06 | 99.59 | D.N.R. |
| García et al. (2000) | Terciario | Real | 1.40E+07 | 1.00E+04 | 99.93 | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. |
| Dias et al., (2014) | Terciario | Real | 1.86E+08 | 5.31E+04 | 99.97 | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. | D.N.R. |

Notas: D.N.R. =Dato no reportado; N= número de datos; NMP= Numero más probable; *= variante aireada.

OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

A continuación, se presentan distintos aspectos de operación y mantenimiento de las LM.

- **Puesta en marcha**

Después de realizar la verificación de elementos como las estructuras de entrada, compuertas y válvulas de baipás, se llevará a cabo el llenado de la laguna utilizando agua residual hasta que alcance la mitad de su capacidad. Posteriormente, se interrumpirá el suministro de agua hasta que la superficie de la laguna muestre un color verdoso, lo cual indicará la proliferación de microalgas. Este proceso generalmente tiene una duración de aproximadamente 7 a 15 días (Ortega de Miguel, 2010; Von Sperling, 2007b). Una vez completada esta fase, se procederá a llenar la laguna con el caudal establecido según el diseño.

- **Actividades de operación y mantenimiento**

En la Tabla B79 se pueden observar las principales actividades de operación y mantenimiento de las LM.

Tabla B79. Activades de operación y mantenimiento en la aireación extendida

| Actividad | Frecuencia |
|---|----------------------|
| Extracción de flotantes ¹ . | 1 vez por semana |
| Mantenimiento de obra civil ¹ . | 2-3 veces por semana |
| Extracción y evacuación de lodos decantador secundario ² . | 5-10 años |

Fuente: ¹ Ortega de Miguel (2010), ²Von Sperling (2007)

- **Riesgos asociados**

Las lagunas de estabilización pueden enfrentar diversos problemas significativos. Uno de ellos es la aparición de espuma y material flotante debido al exceso de algas y al funcionamiento deficiente del proceso de tratamiento inicial (Von Sperling, 2007). Además, es común encontrar dificultades relacionadas con los malos olores, los cuales pueden ser causados por sobrecargas hidráulicas, condiciones climáticas desfavorables, presencia de sustancias tóxicas en el agua

residual y cortocircuitos (Ortega de Miguel, 2010; Von Sperling & Chernicharo, 2005). Asimismo, la presencia de algas en el efluente también puede ser problemática, aunque se pueden tomar medidas para mitigar este efecto, como la instalación de deflectores cerca de las salidas y la implementación de tratamientos posteriores como filtros de piedra (Von Sperling, 2007).

- **Flexibilidad**

La función principal de las lagunas de maduración es la eliminación de microorganismos patógenos, no de materia orgánica. No obstante, esta tecnología puede hacer frente a picos de carga hidráulica y orgánica cuando estos son de naturaleza puntual, gracias a los extensos períodos de retención hidráulica que poseen (Ortega de Miguel, 2010; Von Sperling, 2007b).

CRITERIOS DE DISEÑO

El diseño de las lagunas de maduración se basa generalmente en el régimen hidráulico, utilizando deflectores o lagunas en serie para lograr condiciones hidráulicas similares al flujo a pistón y así obtener una mayor eficiencia de remoción (Von Sperling, 2007). Por consiguiente, los principales parámetros de diseño incluyen el tiempo de retención hidráulico, la profundidad de la laguna, el número de lagunas en serie y la relación de longitud a anchura. En la Tabla B80 se presentan diferentes valores recomendados para estos parámetros de diseño (Ortega de Miguel, 2010; Von Sperling, 2007).

Tabla B80. Valores de parámetros recomendados para el diseño de laguna de maduración

| Parámetro | Unidad | AECID (2022) | Valores | |
|----------------------------|-----------------------------|--------------|-------------------------|---------------------|
| | | | Ortega de Miguel (2010) | Von Sperling (2007) |
| Profundidad | m | 0.8-1.2 | 0.8-1 | 0.8-1 |
| Carga orgánica superficial | kg DBO ₅ /Ha-día | <100 | <75 | - |
| Tiempo de retención | días | 5-10 | >5 | >3 |
| Relación largo ancho | - | - | - | 6-12 |

POTENCIAL DE ACTUALIZACIÓN

Diversos aspectos operativos de las lagunas de maduración pueden ser modificados con el objetivo de optimizar su funcionamiento. Por ejemplo, Dos Santos & van Haandel (2021) proponen el uso de lagunas de pulimento en serie con una altura ascendente y un funcionamiento intermitente para mejorar la remoción de nutrientes y reducir el área requerida.

B.11.3. ASPECTOS ECONÓMICOS

A continuación, se presentan distintos aspectos económicos de las LM.

INVERSIÓN INICIAL

Acorde a Von Sperling & Chernicharo (2005), para el año 2002 en Brasil, la inversión inicial necesaria para las lagunas de maduración oscilaba entre los 5 a 10 dólares estadounidenses por habitante equivalente. Para el año 2023, estos valores oscilan entre 17.61 y 35.21 dólares estadounidenses por habitante.

COSTOS APROXIMADOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

Von Sperling & Chernicharo (2005) estiman que los costos anuales de operación y mantenimiento en Brasil en el 2002 para las lagunas de maduración oscilaban entre 0.2 y 0.5 dólares estadounidenses por habitante. Con ajustes de inflación para el año 2023, los costos anuales de operación y mantenimiento oscilan entre 0.71 y 1.76 dólares estadounidenses por habitante.

B.11.4. ASPECTOS AMBIENTALES

A continuación, se presentan diferentes aspectos ambientales asociados a las LM.

CONSUMO ENERGÉTICO

Las lagunas de maduración suelen funcionar mediante gravedad, lo que significa que no es necesaria la energía eléctrica para tratar las aguas residuales (Ortega de Miguel, 2010; Tilley et al., 2014).

GENERACIÓN DE OLORES

Si se realizan labores de operación y mantenimiento el riesgo de generación de olores es baja (Ortega de Miguel, 2010).

PRODUCCIÓN DE LODOS

Acorde a estimaciones realizadas por Konaté et al. (2013), la tasa de producción de lodos de las lagunas de maduración es de aproximadamente 70 L/hab-año.

GENERACIÓN DE RUIDOS

La generación de ruidos en las LM convencionales es baja al no utilizar equipos mecánicos de alta potencia para su funcionamiento (Tilley et al., 2014).

EMISIONES GASES EFECTO INVERNADERO

Según el informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático IPCC (2019), las lagunas de estabilización presentan un factor de emisión de 0.3 Kg de CH₄/Kg de DBO₅ removido.

OPORTUNIDADES DE APROVECHAMIENTO DE SUBPRODUCTOS

A continuación, se presentan oportunidades de aprovechamiento de los subproductos generados durante el tratamiento mediante LM.

- **biogás**

La producción de biogás en las lagunas de maduración no es significativa (Von Sperling & Chernicharo, 2005).

- **Biomasa**

La biomasa extraída de las LM suele contar un alto nivel de estabilización, por ende, si desea realizar su aprovechamiento como material de relleno o para agricultura restringida, solo es necesario hacer uso de camas de secado (MVCT, 2021). Sin embargo, si se desea hacer uso no restringido de este material, es necesario aplicar etapas posteriores de desinfección (Andreoli et al., 2007).

- **Reúso del agua**

Cuando se combina esta tecnología con un tratamiento secundario, el efluente resultante suele cumplir con los estándares requeridos para su uso sin restricciones (Brault et al., 2022).

B.11.5. VENTAJAS Y DESVENTAJAS

En las Tabla B81 se pueden observar las principales ventajas y desventajas de las lagunas de maduración para el tratamiento de AR.

Tabla B81. *Ventajas y desventajas de las de maduración*

| Ventajas | Desventajas |
|--|---|
| Bajo requerimiento energético | Alto requerimiento de área superficial |
| Altas remociones de microorganismos patógenos | Alta dependencia de factores climáticos |
| Baja producción de lodos con un alto grado de estabilización | |
| Operación y mantenimiento sencillo | |

REFERENCIAS

- AECID. (2022). RECOMENDACIONES PARA PROYECTOS DE SANEAMIENTO Y TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES. Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo.
- Andreoli, C. V., Von Sperling, M., & Fernandes, F. (2007). Sludge treatment and disposal. IWA publ.
- Arceivala, S. J. (1981). Wastewater Treatment and Disposal: Engineering and Ecology in Pollution Control. M. Dekker.
- Brault, J.-M., Buchauer, K., & Martin, G. (2022). Wastewater Treatment and Reuse: A Guide to Help Small Towns Select Appropriate Options. International Bank for Reconstruction and Development / The World Bank.
- CENTA. (2021). Guía técnica para la selección y diseño de líneas de tratamiento de aguas residuales. Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua.
- Dias, D. F. C., Possmoser-Nascimento, T. E., Rodrigues, V. A. J., & von Sperling, M. (2014). Overall performance evaluation of shallow maturation ponds in series treating UASB reactor effluent: Ten years of intensive monitoring of a system in Brazil. *Ecological Engineering*, 71, 206–214. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.07.044>
- Dos Santos, S. L., & van Haandel, A. (2021). Transformation of waste stabilization ponds: Reengineering of an obsolete sewage treatment system. *Water (Switzerland)*, 13(9). Scopus. <https://doi.org/10.3390/w13091193>
- García, J., Mujeriego, R., Bourrouet, A., Peñuelas, G., & Freixes, A. (2000). Wastewater treatment by pond systems: Experiences in Catalonia, Spain. *Water Science and Technology*, 42(10–11), 35–42. <https://doi.org/10.2166/wst.2000.0603>

- Ghazy, M. M. E.-D., El-Senousy, W. M., Abdel-Aatt, Azza. M., & Kamel, M. (2008). Performance Evaluation of a Waste Stabilization Pond in a Rural Area in Egypt. *American Journal of Environmental Sciences*, 4(4), 316–325. <https://doi.org/10.3844/ajessp.2008.316.325>
- IPCC. (2019). 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.
- Konaté, Y., Maiga, A. H., Casellas, C., & Picot, B. (2013). Sludge accumulation in stabilisation ponds in the Soudano–Sahelian climate of Burkina Faso. *Desalination and Water Treatment*, 51(10–12), 2453–2460. <https://doi.org/10.1080/19443994.2012.748263>
- MVCT, M. de V., Ciudad y Territorio. (2021). Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS): TÍTULO E. Tratamiento de Aguas Residuales. Viceministerio de Agua y Saneamiento Básico.
- Oakley, S. M., Pocasangre, A., Flores, C., Monge, J., & Estrada, M. (2000). Waste stabilization pond use in central america: The experiences of el salvador, guatemala, honduras and nicaragua. *Water Science and Technology*, 42(10–11), 51–58. <https://doi.org/10.2166/wst.2000.0607>
- Ortega de Miguel, E. (2010). Manual para la implantación de sistemas de depuración en pequeñas poblaciones. Ministerio Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.
- Tilley, E., Ulrich, L., Luthi, C., Reymond, P., & Zurbrügg, C. (2014). Compendium of Sanitation Systems and Technologies.
- Von Sperling, M. (2007). *Waste Stabilisation Ponds*.
- Von Sperling, M., & Chernicharo, C. A. de L. (2005). *Biological wastewater treatment in warm climate regions*. IWA publishing.

B.12. Ficha 12 - CLORACIÓN

B.12.1. GENERALIDADES

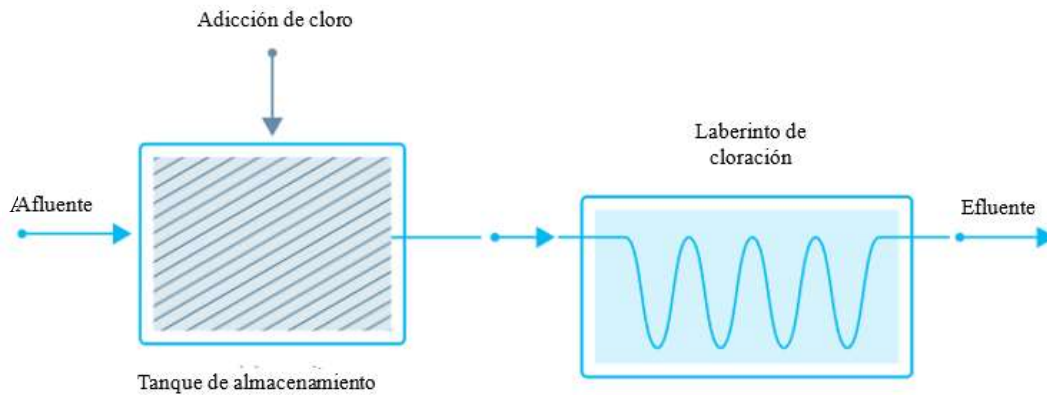
DESCRIPCIÓN

La cloración es un método de desinfección de aguas residuales (AR) que utiliza la oxidación de la materia celular para la destrucción de la materia celular de microorganismos patógenos (MVCT, 2021). Esto se logra a través de la aplicación de cloro en al agua, que puede presentar diferentes formas como (i) Cloro gaseoso, (ii) dióxido de cloro, hipoclorito cálcico e hipoclorito sódico (CENTA, 2021). Una vez aplicado el cloro, una parte residual en el AR, asegura que no exista contaminación por un cierto periodo de tiempo (Brault et al., 2022).

COMPONENTES

Las líneas de desinfección mediante cloración se componen típicamente de: (i) una unidad de mezcla de almacenamiento, (ii) bombas dosificadoras y (iii) laberinto de cloración. Un esquema simplificado de la una unidad de cloración se puede observar en Figura B15. Además, a continuación, se hace una breve descripción de los principales componentes:

- **Tanque de almacenamiento:** El cual debe contar con una capacidad suficiente para garantizar la autonomía del sistema durante días, la configuración de este elemento depende de la forma de cloro utilizada (MARN, 2016).
- **Bombas dosificadoras:** deben garantizar la continuidad de la operación de la desinfección, usualmente se disponen dos bombas en paralelo una en funcionamiento y otra en standby (CENTA, 2021).
- **Laberinto de cloración:** Canal con deflectores que busca simular el flujo a pistón con el fin de garantizar el tiempo de contacto requerido (CENTA, 2021).

Figura B15. Esquema típico de desinfección

Fuente: Adaptado de Brault et al. (2022)

B.12.2. ASPECTOS TÉCNICOS

A continuación, se presentan distintos aspectos técnicos de la cloración.

NIVEL DE TRATAMIENTO RECOMENDADO

Esta tecnología suele utilizarse para pulir tratamientos secundarios debido a que su efectividad se ve influenciada por compuestos orgánicos, el grado de nitrificación y la presencia de amonio (MARN, 2016).

POBLACIÓN RECOMENDADA

La cloración puede ser aplicada tanto a nivel domiciliario como en áreas urbanas y ciudades (Brault et al., 2022).

ÁREA SUPERFICIAL

El requisito de área superficial para la implantación de sistemas de oscilación puede oscilar entre 0.59 y 0.04 m² por habitante equivalente (MARN, 2016).

REMOCIÓN DE MICROORGANISMO PATÓGENOS

Numerosos estudios han demostrado que cuando se mantienen constantes todos los parámetros físicos que controlan el proceso de cloración, la eficiencia germicida de la desinfección depende principalmente de la forma del residual de cloro y el tiempo (Tchobanoglous et al., 2014). Un parámetro que se puede utilizar para evaluar la eficacia relativa de las diversas formas de cloro es el coeficiente de letalidad específica “ Λ ” (Tchobanoglous et al., 2014). En la Tabla B82 se presentan los diferentes coeficientes de letalidad específica para varios tipos de microorganismos derivadas de diferentes pruebas de laboratorio.

Tabla B82. *Coefficientes específicos de letalidad para la inactivación de diferentes microorganismos patógenos*

| Desinfectante | Unidades | Coliformes totales | Virus | Protozoa Cryptosporidium | Protozoa Giardia lamblia cysts |
|------------------|----------|--------------------|-------|--------------------------|--------------------------------|
| Cloro libre | L/mg-min | 2.00 | 1.20 | 4.40E-04 | 0.04 |
| Dióxido de cloro | L/mg-min | 2.00 | 0.38 | 8.00E-03 | 0.20 |

Fuente: Adaptado de Tchobanoglous et al. (2014)

OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

A continuación, se presentan distintos aspectos de operación y mantenimiento de la cloración.

- **Puesta en marcha**

La puesta en marcha de un sistema de cloración implica una serie de actividades clave, estas incluyen (PSATS, 2016): (i) la verificación de que todas las válvulas estén en la posición de inicio correcta y debidamente etiquetadas; (ii) chequeo de que todas las tuberías hayan sido inspeccionadas y se encuentren en condiciones de funcionamiento adecuadas; (iii) verificación de todo el equipo de alimentación y seguridad; y (iv) Establecimiento de un programa para abrir secuencialmente las válvulas e iniciar el equipo, siguiendo un orden específico.

- **Actividades de operación y mantenimiento**

En la Tabla B83 se pueden observar la principales actividades de operación y mantenimiento de los sistemas de cloración.

Tabla B83. *Activades de operación y mantenimiento de la cloración*

| Actividad | Frecuencia |
|--|---------------------------------------|
| Monitoreo del tiempo de contacto, dosificación cloro residual en el efluente ¹ . | Cada 15 días |
| Desensamble y limpieza de los diversos componentes del sistema ¹ . | Cada 6 meses |
| Eliminar los depósitos de hierro y manganeso utilizando sustancias como el ácido muriático, entre otros métodos ² . | Cada 15 días |
| Mantenimiento de equipos de bombeo y dosificación ² . | Seguir recomendaciones del fabricante |

Fuente: ¹CENTA (2021), ² MVCT (2021)

- **Riesgos asociados**

Uno de los principales riesgos asociados a la cloración es la generación de subproductos tóxicos que no están permitidos en el agua destinada al consumo humano y que tampoco son deseables en otros contextos (Diana et al., 2019; MARN, 2016; Tchobanoglous et al., 2014). La principal forma de mitigar este problema es a través de la reducción de la concentración de materia orgánica y solidos suspendidos en el efluente depurado (MARN, 2016).

FLEXIBILIDAD

Las grandes variaciones en los caudales pueden reducir la eficiencia de la desinfección si no se utilizan dosificadores automáticos, lo que puede dar lugar a efluentes con concentraciones más altas de microorganismos patógenos (MARN, 2016).

CRITERIOS DE DISEÑO

La cinética de este proceso de desinfección está determinada por el tiempo de contacto y la concentración del desinfectante (MARN, 2016). La cantidad de desinfectante requerida para la desinfección depende principalmente de tres factores (CENTA, 2021): (i) la calidad del agua a

desinfectar, (ii) la cantidad de cloro necesaria para compensar la descomposición del agente desinfectante, y (iii) la calidad del efluente deseado. Además, las unidades de reacción deben permanecer dentro del laberinto durante al menos el 80-90% del tiempo de contacto (CENTA, 2021). En la Tabla B84 se presentan ejemplos de dosificaciones típicas de hipoclorito para lograr efluentes con concentraciones inferiores a 10^3 NMP/100 mL, con tiempos de contacto de 15 a 30 minutos, junto con especificaciones para el laberinto de cloración.

Tabla B84. Parámetros de diseño recomendados para la desinfección usando hipoclorito

| Parámetro | Unidad | Valor |
|--|--------|-------|
| Dosis de hipoclorito para efluentes no nitrificados ¹ | mg/L | 10-15 |
| Dosis de hipoclorito para efluentes nitrificados ¹ | mg/L | 6-8 |
| Dosis de hipoclorito para efluentes filtrados ¹ | mg/L | 1-5 |
| Velocidad de laberinto de cloración ² | m/min | 2-4 |
| Relación largo-ancho mínima en el laberinto de cloración ³ | - | 20:1 |
| Relación largo-ancho recomendada en el laberinto de cloración ³ | - | 40:1 |

Fuente: ¹CENTA (2021), ²MARN (2016) y ³Tchobanoglous et al. (2014)

POTENCIAL DE ACTUALIZACIÓN

Una forma de mejorar el rendimiento de los sistemas de cloración es mediante la implementación de tratamientos de filtración previos. Esto permite reducir la cantidad de cloro utilizado, lo que a su vez disminuye la generación de productos tóxicos (MARN, 2016). Los filtros de arena a presión suelen ser comúnmente empleados para llevar a cabo esta filtración previa (CENTA, 2021).

B12.3. ASPECTOS ECONÓMICOS

A continuación, se presentan distintos aspectos económicos de la cloración.

INVERSIÓN INICIAL

Según el informe del MARN (2016), en ese año la inversión inicial promedio para implementar un sistema de cloración variaba entre 13 y 241 USD por habitante. Si se tiene en cuenta el factor de inflación, estos valores corresponden a un rango estimado de 13 a 353 USD por habitante equivalente en el año 2023.

COSTOS APROXIMADOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

En Honduras, en el año 2016, los costos de operación y mantenimiento de los sistemas de cloración variaban entre 3.25 y 4.98 USD por habitante equivalente al año (MARN, 2016). Considerando la inflación, para el año 2023, se estima que estos costos oscilen entre 4.76 y 7.30 USD por habitante equivalente al año.

B.1.4. ASPECTOS AMBIENTALES

A continuación, se presentan diferentes aspectos ambientales que presentan los sistemas de cloración.

- **Consumo energético**

La cloración puede tener un consumo energético estimado entre 0.0024 y 0.0033 kWh/día*habitante-eq (MARN, 2016).

- **Generación de olores**

La cloración puede ayudar a eliminar ciertos olores molestos durante la desinfección (MVCT, 2021). Sin embargo, si el efluente depurado contiene concentraciones altas de materia orgánica se pueden generar malos olores (Tchobanoglous et al., 2014).

- **Producción de lodos**

Durante la desinfección con cloro no existe una producción significativa de biomasa (Brault et al., 2022).

- **Generación de ruidos**

Debido al uso de equipos de bombeo se pueda generar ruido durante la operación de los equipos (MARN, 2016).

- **Emisiones gases efecto invernadero**

Beavis & Lundie (2003) llevaron a cabo estimaciones de emisiones para un sistema de cloración en Australia. Según estos autores, la cloración genera emisiones de aproximadamente 0.013 kg de CO₂ por metro cúbico de agua residual tratada. Estas emisiones están principalmente relacionadas con la producción y transporte del hipoclorito, así como con el consumo de energía eléctrica durante el proceso de dosificación.

OPORTUNIDADES APROVECHAMIENTO DE SUBPRODUCTOS

A continuación, se presentan oportunidades de aprovechamiento de los subproductos generados durante la desinfección con cloro.

- **Biogás**

La producción de biogás durante la cloración no es significativa (Brault et al., 2022).

- **Biomasa**

La producción de biomasa durante la cloración no es significativa (Brault et al., 2022).

- **Reúso del agua**

La desinfección mediante el uso de cloro es efectiva para eliminar microorganismos patógenos que pueden representar un riesgo para la salud humana. No obstante, el cloro residual puede

resultar perjudicial para los cultivos y organismos acuáticos (Brault et al., 2022). Por lo tanto, si se desea utilizar el agua tratada para la irrigación, se hace necesario llevar a cabo procesos de decoloración, lo cual incrementa los costos de operación y mantenimiento en un rango del 20% al 30% (CENTA, 2021).

B.1.5. VENTAJAS Y DESVENTAJAS

En la Tabla B85 se pueden observar las principales ventajas y desventajas de la implementación de desinfección con cloro.

Tabla B85. Ventajas y desventajas de la desinfección con cloro

| Ventajas | Desventajas |
|---|---|
| Baja área requerida | Potencial formación de compuestos tóxicos. |
| Altas remociones de microorganismos patógenos | Eficiencia afectada por la calidad del efluente depurado. |
| Operación y mantenimiento flexible | Requerimiento de decoloración para el reúso. |

REFERENCIAS

- Beavis, P., & Lundie, S. (2003). Integrated environmental assessment of tertiary and residuals treatment—LCA in the wastewater industry. *WATER SCIENCE AND TECHNOLOGY*, 47(7–8), 109–116. <https://doi.org/10.2166/wst.2003.0678>
- Brault, J.-M., Buchauer, K., & Martin, G. (2022). Wastewater Treatment and Reuse: A Guide to Help Small Towns Select Appropriate Options. International Bank for Reconstruction and Development / The World Bank.
- CENTA. (2021). Guía técnica para la selección y diseño de líneas de tratamiento de aguas residuales. Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua.
- Diana, M., Felipe-Sotelo, M., & Bond, T. (2019). Disinfection byproducts potentially responsible for the association between chlorinated drinking water and bladder cancer: A review. *Water Research*, 162, 492–504. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.07.014>
- MARN, M. de M. A. y R. N. (2016). Recomendaciones para la selección de tratamientos de depuración de aguas residuales urbanas en la República de El Salvador. Unidad Ejecutora de Programas Hídricos.
- MVCT, M. de V., Ciudad y Territorio. (2021). Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS): TÍTULO E. Tratamiento de Aguas Residuales. Viceministerio de Agua y Saneamiento Básico.
- PSATS, T. P. S. A. of T. S. (2016). Wastewater Treatment Plant Operator Certification Training. Module 5: Disinfection and Chlorination. Penn State Harrisburg Environmental Training Center.

Tchobanoglous, G., Stensel, H. D., Tsuchihashi, R., Burton, F. L., Abu-Orf, M., Bowden, G., Pfrang, W., & Metcalf & Eddy (Eds.). (2014). Wastewater engineering: Treatment and resource recovery (Fifth edition). McGraw-Hill Education.

Apéndice C. Síntesis de requisitos de calidad de agua residual tratada para el reúso según distintos documentos internacionales de referencias

En la Tabla C1 se presenta la síntesis de requisitos de calidad de agua residual tratada para el reúso según distintos documentos internacionales de referencias

Tabla C1. Síntesis de requisitos de calidad de agua residual tratada para el reúso según distintos documentos internacionales de referencias

| Guía | Categoría | Aplicación | Microorganismos patógenos | Iones tóxicos | Nutrientes | Parámetros físicos | Otros parámetros |
|------------------|---------------------------------------|---|--|----------------|------------|---|----------------------------------|
| EPA (2012) | Reúso urbano sin restricción | Aplicaciones no potables en instalaciones abiertas al público | - Coliformes totales no detectables - 1 mg/L CL2 residual | Boro > 75 mg/L | N.E. | - Turbidez <2 NTU | - pH: 6.0-9.0 - <10 mg/ DBO 5 |
| | Reúso urbano restringido | Aplicaciones no potables en instalaciones cerradas al público | - Coliformes totales < 200 CF/100 mL - 1 mg/L CL2 residual | N.E. | N.E. | - Turbidez <2 NTU - <30 mg/L SST | - pH: 6.0-9.0 - <10 mg/ DBO3 |
| | Reúso para irrigación sin restricción | Irrigación en cultivos para consumo humano | - Coliformes totales no detectables - 1 mg/L CL2 residual | N.E. | N.E. | - Turbidez <2 NTU | - pH: 6.0-9.0 - <10 mg/ DBO 5 |
| | Reúso para irrigación restringida | Irrigación para cultivos procesados o para no consumo humano | - Coliformes totales < 200 CF/100 mL - 1 mg/L CL2 residual | N.E. | N.E. | - Turbidez <2 NTU - <30 mg/L SST | - pH: 6.0-9.0 - <10 mg/ DBO5 |
| | Reúso ambiental | Uso de agua tratada para crear, mejorar y mantener ecosistemas | - Coliformes totales < 200 CF/100 mL - 1 mg/L CL2 residual | N.E. | N.E. | - <30 mg/L SST | - pH: 6.0-9.0 - <30 mg/ DBO5 |
| | Reúso industrial | Uso de agua tratada para actividades industriales relacionadas limpieza de equipos, producción de energía y extracción de materia prima | - Coliformes totales < 200 CF/100 mL - <1 mg/L CL2 residual | N.E. | N.E. | - <30 mg/L SST | - pH: 6.0-9.0 - <30 mg/ DBO5 |
| ISO 16075 (2020) | A | Agua tratada de calidad muy alta, irrigación no restringida urbana y agrícola de cultivos para consumo crudo. | - Coliformes termo tolerantes: 10 -100 UFC/100 mL | N.E. | N.E. | - Turbidez: 2-5 NTU - SST: 5-10 mg/L | DBO5 < 5 mg/L |
| | B | Agua tratada de calidad alta, | - Coliformes termotolerantes: | N.E. | N.E. | - SST: 10-25 mg/L | DBO5 < 10 mg/L |

| Guía | Categoría | Aplicación | Microorganismos patógenos | Iones tóxicos | Nutrientes | Parámetros físicos | Otros parámetros | |
|--|---|--|---|--------------------------|------------|--------------------|------------------|------|
| Chipre - Ministry of Agriculture, Natural resources and Environment (2005) | C | irrigación restringida urbana y agrícola de cultivos de alimentos procesados | 200 - 1000 UFC/100 mL | | | | | |
| | | Agua tratada de buena calidad, cultivos industriales y no destinados para consumo humado | - Coliformes termotolerantes: 1000 - 10000 UFC/100 mL - Nematodos intestinales: 1 unidad/L | N.E. | N.E. | - SST: 30-40 mg/L | DBO5 < 20 mg/L | |
| | | Agua tratada de calidad media, para uso restringido en irrigación industrial | - Coliformes termotolerantes: 1000 - 10000 UFC/100 mL - Nematodos intestinales: 1-5 unidad/L | N.E. | N.E. | - SST: 90-140 mg/L | DBO5 < 60 mg/L | |
| | E | Irrigación restringida de cultivos industriales | - Nematodos intestinales: 1-5 unidad/L | N.E. | N.E. | N.E. | DBO5 < 35 mg/L | |
| | | Acceso sin restricciones y vegetales consumidos cocinados | E. Coli: 50 UFC/100 mL - Nematodos intestinales: 0 unidades/L | N.E. | N.E. | - SST:10 mg/L | DBO5 < 10 mg/L | |
| | Aglomeraciones < 2000 habitantes | Acceso limitado y cultivos para consumo humado | E. Coli: 1000-5000 UFC/100 mL - Nematodos intestinales: 0 unidades/L | N.E. | N.E. | - SST:30 mg/L | DBO5 < 20 mg/L | |
| | | Riego de cultivos de forraje | E. Coli: 1000-5000 UFC/100 mL - Nematodos intestinales: 0 unidades/L | N.E. | N.E. | - SST:30 mg/L | DBO5 < 20 mg/L | |
| | | Riego de pastos y cultivos industriales. | E. coli: 200 UFC/ 100 mL | N.E. | N.E. | - SST:35 mg/L | N.E. | |
| | Grecia - Hellenic Ministry of Environment, Energy and Climate Change (2011) | Irrigación restringida | Todos los cultivos con todos los métodos de irrigación | E. coli: 5-50 UFC/100 ml | N.E. | N.E. | - SST:10 mg/L | N.E. |
| | | Irrigación sin restricción | | E. coli: 10 UFC/ 100 mL | | | SST: < 10 mg/L | |
| Comisión Europea - European Parliament and (2020) | A | N.E. | Nematodos intestinales: < 1 unidad /L | N.E. | N.E. | Turbidez: <5 NTU | DBO5 < 10 mg/L | |
| | B | N.E. | E. coli: 10 UFC/ 100 mL Nematodos intestinales: < 1 unidad /L | N.E. | N.E. | - SST:35 mg/L | N.E. | |

| Guía | Categoría | Aplicación | Microorganismos patógenos | Iones tóxicos | Nutrientes | Parámetros físicos | Otros parámetros |
|--|-----------------|---|---|--|---|--------------------|-----------------------------------|
| Jordania - Ministry of Water and Irrigation (2016) | C | N.E. | <i>E. coli</i> : 10 UFC/100 mL Nematodos intestinales: < 1 unidad /L | N.E. | N.E. | - SST:35 mg/L | N.E. |
| | D | N.E. | <i>E. Coli</i> : 10 UFC/100 mL Nematodos intestinales: < 1 unidad /L | N.E. | N.E. | - SST:35 mg/L | N.E. |
| | A | Vegetales cocinados, parques | <i>E. Coli</i> o FC: 100 UFC / 100 mL Nematodos intestinales: 1 unidad/L | N.E. | - Nitrógeno total < 70 mg/L - Nitratos < 6.8 mg/L - Fosfatos: <30 mg/L | - SST: 50 mg/L | - DBO5 <30 mg/L |
| | B | Árboles frutales, Riego de aceras | <i>E. Coli</i> o FC: 1000 UFC / 100 mL Nematodos intestinales: 1 unidad/L | N.E. | - Nitrógeno total < 100 mg/L - Nitratos < 16.1 mg/L - Fosfatos: <30 mg/L - Nitrógeno total < 70 mg/L | - SST: 200 mg/L | - DBO5 <200 mg/L |
| | C | Cultivos industriales y zonas forestales | - | N.E. | - Nitratos < 10.4 mg/L - Fosfatos: <30 mg/L - Nitrógeno total < 100 mg/L | - SST: 300 mg/L | - DBO5 <300 mg/L |
| Túnez- Institut National de la Normalisation et de la Propriété (1989) | D | Plantas ornamentales | <i>E. Coli</i> o FC: 10000 UFC / 100 mL Nematodos intestinales: 1 unidad/L | N.E. | - Nitratos < 16.1 mg/L - Fosfatos: <30 mg/L | - SST: 15 mg/L | - DBO5 <30 mg/L |
| | Restringido | N.E. | - Coliformes termotolerantes: 1000 UFC/100 mL - Nematodos intestinales: 1 unidad/ L - Cloro residual > 0.2 mg/L | - Cloruros <100 mg/L - Boro: <0.5 mg/L | Nitratos < 10 mg/L Amonio < 5 mg/L | - SST: 40 mg/L | - pH: 6.0-8.5 - DBO5 < 40 mg/L |
| | Sin restricción | N.E. | Coliformes termotolerantes: 2.2 UFC/100 mL Nematodos intestinales: 1 unidad/ L - Cloro residual: <0.2 mg/L | - Cloruros <100 mg/L - Boro: <0.5 mg/L | N.E. | - SST: 10 mg/L | - pH: 6.0-8.5 - DBO5 < 10 mg/L |
| FAO (1992) | A | Riego de cultivos que pueden ser comidos crudos, campos | - Coliformes fecales <1000 UFC/ 100 mL | Cloruros :<142 mg/L Sodio: 3 SAR | Nitratos <10 mg/L | N.E. | - pH: 6.5-8.0 |

| Guía | Categoría | Aplicación | Microorganismos patógenos | Iones tóxicos | Nutrientes | Parámetros físicos | Otros parámetros |
|------------|--|--|---|---|-------------------|--|--|
| OMS (2006) | B | deportivos y parques públicos | | Boro: < 0.75 mg/L | | | |
| | | Irrigaciones de cultivos de cereales, industriales, zonas de pastoreo y árboles | N.E. | Cloruros: 142- 355 mg/L Sodio: 69 SAR Boro: 0.7-4 | Nitratos <30 mg/L | N.E. | - pH: 6.5-8.1 |
| | | Irrigación localizada de cultivos de categoría B si la exposición con personas no ocurre | N.E. | Cloruros: 142 - 355 mg/L Sodio: 69 SAR | Nitratos <30 mg/L | N.E. | - pH: 6.5-8.2 |
| | Restringido | Riego de cultivos que pueden ser comidos crudos, campos deportivos y parques públicos | <i>E. Coli</i> <10000 UFC/100 ml (con existencia de contacto humano) <i>E. Coli</i> : <100000 UFC/100 ml (equipos altamente mecanizados) Nematodos intestinales: 1 unidad/L | N.E. | N.E. | N.E. | N.E. |
| | | Irrigaciones de cultivos de cereales, industriales, zonas de pastoreo y árboles | <i>E. Coli</i> <1000 UFC/100 ml (con existencia de contacto humano) Nematodos intestinales: 1 unidad/L | N.E. | N.E. | N.E. | N.E. |
| | Sin restricción | Irrigación localizada de cultivos de categoría B si la exposición con personas no ocurre | <i>E. Coli</i> <10000 UFC/100 ml (riego en las raíces) <i>E. Coli</i> <10000 UFC/100 ml (cultivos herbáceos) Nematodos intestinales: 1 unidad/L | N.E. | N.E. | N.E. | N.E. |
| | | Servicios al público con contacto directo | Coliformes totales: <240 NMP/ 100 mL Nematodos intestinales: 1 unidad/L | N.E. | N.E. | SST < 20 mg/L Aceites y grasas: 15 mg/L | - DBO5 > 20 mg/L - pH: 5.0-10 |
| | México - Secretaría de Medio & Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (1998) | Sin restricción | Servicios al público con contacto directo u ocasional | Coliformes totales: <1000 NMP/ 100 mL Nematodos | N.E. | N.E. | SST < 30 mg/L Aceites y grasas: 15 mg/L |

| Guía | Categoría | Aplicación | Microorganismos patógenos | Iones tóxicos | Nutrientes | Parámetros físicos | Otros parámetros |
|---|-----------|---|---|---------------|------------|--------------------|------------------|
| España - Ministerio de la Presidencia (2007) | | | intestinales: 5 unidad/L | | | | |
| | A | Usos industriales: torres de refrigeración y condensadores evaporativos Urbano: Riego de jardines privados y descarga de aparatos sanitarios Recarga de acuíferos por inyección directa | E. coli: ausencia Huevos nematodos: 1/ 10 L <i>Legionella spp</i> <100 UFC/L | N.E. | N.E. | SST: > 20 mg/L | N.E. |
| | B | Urbanos: Riego de zonas verdes urbanas, lavado de calles, sistemas contra incendios y lavado de vehículos. agrícola: Riego agrícola sin restricciones Recreativo: riego de campos de golf | E. coli <200 UFC/100 mL Huevos nematodos: 1 L <i>Legionela spp</i> <1000 UFC/L | N.E. | N.E. | SST: > 35 mg/L | N.E. |
| | C | agrícola: riego de productos agrícolas para consumo humano no en fresco, riego de pastos para animales productores y acuicultura. Industrial: Aguas de proceso y limpieza para la industria alimentaria Ambiental: Recarga de acuíferos por percolación a través del terreno | E. coli <1000 UFC/100 mL Huevos nematodos: 1 L | N.E. | N.E. | SST: > 35 mg/L | N.E. |
| | D | Agrícola: Riego de cultivos leñosos sin contacto con los frutos; riego de cultivos de flores, viveros e | <i>E. coli</i> <10000 UFC/100 mL Huevos nematodos: 1 L | N.E. | N.E. | SST: > 35 mg/L | N.E. |

| Guía | Categoría | Aplicación | Microorganismos patógenos | Iones tóxicos | Nutrientes | Parámetros físicos | Otros parámetros |
|------|-----------|---|---------------------------|---------------|------------|--------------------|------------------|
| | | invernaderos, sin contacto con producción y riego de cultivos industriales no alimentarios. Industrial: Otros usos industriales Recreativos: Estanques, masas de agua y caudales ornamentales con acceso impedido al público. Riego de bosques y zonas verdes no accesibles al público y silvicultura, | N.E. | N.E. | N.E. | N.E. | N.E. |

REFERENCIAS

- EPA, U. S. E. P. A. (2012). 2012 Guidelines for Water Reuse.
- European Parliament and of The Council. (2020). REGULATION (EU) 2020/741 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL.
- FAO, F. A. A. O. O. T. U. N. (1992). Wastewater treatment and use in agriculture. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Institut National de la Normalisation et de la Propriété. (1989). Norme tunisienne homologuée NT 106.03(1989): Protection de l'environnement—Utilisation des eaux usées traitées à des fins agricoles: Spécifications physico-chimiques et biologiques.
- ISO (16075), I. O. for S. (2020). Guidelines for treated wastewater use for irrigation projects.
- Measures, Limits and Procedures for Reuse of Treated Wastewater., Common Ministerial Decision No 145116 (354B)/08.03.11 (2011).
- Ministerio de la Presidencia. (2007). Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas.
- Ministry of Water and Irrigation. (2016). National Water Strategy of Jordan, 2016- 2025.
- Secretaría de Medio & Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. (1998). NOM-003-SEMARNAT-1997—Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público.
- Standards for the Reuse of Treated Wastewater for Irrigation, no. 296/03.06.05 Decree (2005).
- WHO, W. H. O. (2006). Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater. 4: Excreta and greywater use in agriculture. World Health Organization.

Apéndice D. Formato para la caracterización de asentamientos no planificados de países tropicales en desarrollo

D.1. Información preliminar

D.1.1. Nombre: _____

D.1.2. Antigüedad del asentamiento: _____ Años

D.1.3. Intervenciones en el asentamiento:

D.1.3. Grado de consolidación del asentamiento.

Alto

Medio

Bajo

D.1.4. Número de habitantes: _____ habitantes

D.1.5. Tasa de crecimiento anual: _____ %

D.1.6. Localización de asentamiento. : _____

D.1.7. Tipo de asentamiento según su localización.

Periurbano

Satelital

D.2. Condiciones del terreno

D.2.1. Superficie disponible: _____ m²

D.2.2. Permeabilidad del suelo: _____ mm/h

D.2.3. Pendiente promedio del terreno: _____ %

D.2.4. Nivel freático en período húmedo sin lluvia: _____ m

D.3. Condiciones ambientales del Asentamiento

D.3.1. Temperatura promedio época seca y lluviosa: _____ °C

D.3.2. Precipitación promedio: _____ mm / año

D.3.3. Tipo de fuente receptora.

Manantial, quebrada, arroyo

Río

Embalse

Ciénaga, lago, laguna

Pozos de agua subterránea

Suelo

Otro: _____

D.3.4. Existencia de captaciones de agua para consumo humano aguas debajo de la descarga.

Sí

No

D.4. Oferta de recursos y Servicios técnicos:

D.4.1. Fuente de energía eléctrica.

Interconexión nacional

Generación puntual

No hay energía

D.4.2. Continuidad del servicio de energía eléctrica.

< 95%

> 95%

D.4.3. Disponibilidad de repuestos y servicio técnico.

Sí

No

D.4.4. Estado de vías de acceso.

Pavimentada

No pavimentada

D.5. Capacidad instalada en la comunidad:

D.5.1. Vocación del uso del suelo: _____

D.5.2. Número de personas con estudios técnicos: _____

D.5.3. Número de mecánicos empíricos: _____

D.5.4. Número de electricistas empíricos: _____

D.5.5. Número de maestros de construcción empíricos: _____

D.5.6. Organismos presentes de la gestión en el asentamiento: _____

D.5.7. Ingresos medios de la comunidad _____

D.7. Características de las Aguas Residuales:

D.7.1. Volumen de AR generada: _____ L

D.7.2. Características fisicoquímicas y microbiológicas de las aguas Residuales

Sólidos suspendidos totales: _____ mg/L

DBO₅: _____ mg/L

DQO: _____ mg/L

DBO/DQO: _____

NT: _____ mg/L

PT: _____ mg/L

NH₃-N: _____ mg/L

E. Coli: _____ mg/L

Coliformes fecales: _____ NMP/100 mL

Coliformes totales: _____ NMP/100 mL

Contenido de metales pesados: _____ NMP/100 mL

D.7.3. Requerimientos normativos:

Sólidos suspendidos totales: _____ mg/L

DBO: _____ mg/L

DQO: _____ mg/L

NT: _____ mg/L

PT: _____ mg/L

NH₃-N: _____ mg/L

E. Coli: _____ mg/L

Coliformes fecales: _____ mg/L

Coliformes totales: _____ NMP/100 mL

Contenido de metales pesados: _____ mg/L

D.8. Percepción de la comunidad:

D.8.1. Porcentaje de la comunidad receptiva frente al reúso _____ %

D.8.2. Porcentaje de la comunidad que considera la generación de ruido un problema prioritario: _____ %

D.8.3. Porcentaje de la comunidad que considera la generación de olores un problema prioritario: _____ %

D.8.4. Porcentaje de la comunidad que considera el impacto visual un problema prioritario: _____ %

D.8.5. Tarifa máxima que la comunidad estaría dispuesta a pagar _____

D.9. valorización de subproductos

D.9.1. Se considerará el aprovechamiento de Agua tratada

Si

NO

D.9.2. Si su respuesta anterior fue negativa, le solicitamos amablemente que continúe con la pregunta 9.4. En caso contrario, le pedimos que escoja las posibles actividades relacionadas con la utilización de agua residual tratada con potencial de aplicación en el asentamiento.

Irrigación para alimentos procesados

Irrigación de cultivos leñosos

Riego de hierba para pastoreo

Riego ornamental sin acceso al público

Riego para reforestación

Recarga de acuíferos por percolación

Acuicultura

D.9.3. Los reúsos estipulados requieren remociones adicionales de contaminantes

Nutrientes

Patógenos

Ambos

D.9.4. Se considerará el aprovechamiento de lodos generados

Sí

No

Opcional

D.9.5. Se considerará el aprovechamiento de biogás

Sí

No

Opcional

D.10. Consideraciones adicionales:

Apéndice E. Criterios recopilados para la selección de tecnologías de tratamiento de aguas residuales

A continuación, en la Tabla E1 se encuentran los distintos criterios recopilados durante la revisión de literatura.

Tabla E1. Criterios recopilados para la selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales

| Fuente | Dimensión | Indicador | Unidad de medida |
|----------------------------|-----------|--|---|
| Galvão et al. (2005) | N.P. | Área requerida | m ² /Hab |
| | N.P. | Cantidad de concreto por habitante | m ³ /Hab |
| | N.P. | Potencia instalada por habitante | kW/Hab |
| | N.P. | Costo de construcción e instalación por habitante | €/Hab |
| Juznic-Zonta et al. (2022) | N.P. | EQI - Índice de Calidad del Efluente | g Pol/m ³ |
| | N.P. | CAPEX - Gastos de Capital | €/m ³ |
| | N.P. | OPEX - Gastos Operativos | €/m ³ |
| | N.P. | Beneficios | €/m ³ |
| | N.P. | NPV - Valor Presente Neto | €/m ³ |
| | N.P. | Tarifa | €/m ³ |
| | N.P. | Niveles de consolidación del Sistema | Alto- Medio- Bajo |
| | N.P. | Área | m ² /PE |
| | N.P. | GHG - Gases de Efecto Invernadero | kgCO ₂ /m ³ |
| Kalbar et al. (2013) | N.P. | EFN ₂ O - Emisiones de N ₂ O | Factor de emisión para N ₂ O |
| | Ambiental | Consumo de energía | kWh |
| | Ambiental | Partículas | g |
| | Ambiental | Dióxido de carbono | Kg |
| | Ambiental | Dióxido de azufre | g |
| | Ambiental | Óxidos de nitrógeno | g |
| | Ambiental | Monóxido de carbono | g |
| | Ambiental | Mercurio | mg |
| | Ambiental | Demanda Química de Oxígeno (DQO) | Kg |
| | Ambiental | Nitrógeno total | Kg |
| | Ambiental | Fósforo total | Kg |
| | Ambiental | Metales pesados | g |
| | Ambiental | Potencial de calentamiento global | g |
| | Ambiental | Potencial de eutrofización | g |
| | Ambiental | Valor Presente Neto | g |
| | Ambiental | Consumo de energía | kg/p.e.-año |
| | Ambiental | Partículas | kg/p.e.-año |
| | Económica | Dióxido de carbono | Rs. Lakh/MLD |
| Omran et al. (2021) | Ambiental | Explotación del terreno | N.P. |
| | Ambiental | Contaminación del aire | N.P. |
| | Ambiental | Consumo de energía | N.P. |
| | Ambiental | Eliminación de contaminantes | N.P. |
| | Ambiental | Sustancias tóxicas | N.P. |
| | Ambiental | Emisión de olores | N.P. |

| Fuente | Dimensión | Indicador | Unidad de medida |
|-------------------------|-------------|--|---------------------------------------|
| | Ambiental | Molestias y ruido | N.P. |
| | Ambiental | Uso de productos químicos | N.P. |
| | Ambiental | Producción de lodos | N.P. |
| | Ambiental | Calidad de los lodos | N.P. |
| | Ambiental | Urbanización | N.P. |
| | Social | Aceptación cultural | N.P. |
| | Social | Seguridad pública | N.P. |
| | Social | Creación de empleo | N.P. |
| | Social | Requisitos de competencia y formación | N.P. |
| | Social | Desarrollo local | N.P. |
| | Dimensión | Costo de construcción | N.P. |
| | Dimensión | Costo de operación y mantenimiento | N.P. |
| | Dimensión | Costo del terreno | N.P. |
| | Dimensión | Costo de los recursos utilizados | N.P. |
| | Dimensión | Costo de salarios y sueldos de los trabajadores | N.P. |
| | Dimensión | Gastos en salud y seguridad | N.P. |
| | Dimensión | Desempeño económico de la producción y gestión de residuos | N.P. |
| | Técnica | Durabilidad | N.P. |
| | Técnica | Fiabilidad y flexibilidad | N.P. |
| | Técnica | Facilidad de construcción | N.P. |
| Técnica | Complejidad | N.P. | |
| Shen et al. (2018) | Técnica | Efluente de DQO | mg/L |
| | Técnica | Efluente de NH ₃ -N | mg/L |
| | Técnica | Efluente de Nitrógeno Total (NT) | mg/L |
| | Técnica | Efluente de Fósforo Total (PT) | mg/L |
| | Técnica | Tasa de cumplimiento general | (%) |
| | Técnica | Facilidad de operación | N.P. |
| | Económica | Costo de inversión | Millón de yuanes/tonelada |
| | Económica | Costos operativos | Yuan/tonelada |
| | Económica | Área de cobertura | m ² /(m ³ -día) |
| | Económica | Personal | personas/millón de toneladas |
| | Económica | Incremento del valor del terreno circundante | % |
| | Ambiental | Tasa de reutilización del agua residual (%) | % |
| | Ambiental | Diversidad biológica | N.P. |
| Starkl et al. (2022) | Ambiental | Ajuste al sistema existente | N.P. |
| | Ambiental | Durabilidad (vida útil) | N.P. |
| | Ambiental | Concentración de contaminantes en el agua | N.P. |
| | Ambiental | Ecotoxicidad acuática | N.P. |
| | Ambiental | Conteo de organismos indicadores | N.P. |
| | Ambiental | Años de vida ajustados por discapacidad (AVAD) | N.P. |
| | Económica | Costos de capital | N.P. |
| | Económica | Costos del ciclo de vida (VPN) | N.P. |
| | Económica | Financiamiento | N.P. |
| | Económica | Distribución de costos | N.P. |

| Fuente | Dimensión | Indicador | Unidad de medida |
|------------------------------------|------------------------------|--|----------------------|
| | Económica | Justicia ambiental | N.P. |
| | Económica | Disposición a pagar (DAP) | N.P. |
| | Social | Distribución de ingresos | N.P. |
| | Social | Condiciones de trabajo en la PTAR | N.P. |
| | Social | Derechos humanos sociales | N.P. |
| | Social | Aplicación de regulaciones de calidad del agua | N.P. |
| Singhirunnusorn & Stenstrom (2010) | Económica | Requisito de terreno | N.P. |
| | Económica | Asequibilidad | N.P. |
| Anaokar et al. (2018) | N.P. | Temperatura | N.P. |
| | N.P. | Sólidos Disueltos Totales (TDS) | N.P. |
| | N.P. | Sólidos Suspendidos (SS) | N.P. |
| | N.P. | Demanda Biológica y Química de Oxígeno (DBO y DQO) | N.P. |
| | N.P. | pH | N.P. |
| | N.P. | Cloruros | N.P. |
| Arroyo & Molinos-Senante (2018) | Ambiental | Eficiencia de remoción de materia orgánica (OM) | % |
| | Ambiental | Eficiencia de remoción de sólidos en suspensión (SS) | % |
| | Ambiental | Eficiencia de remoción de nitrógeno (N) | % |
| | Ambiental | Eficiencia de remoción de fósforo | % |
| | Ambiental | Consumo de energía (E) | Kwh/m ³ |
| | Ambiental | Área de terreno requerida (L) | m ² /p.e. |
| | Ambiental | Producción de lodos cloacales (S) | kg/m ² |
| | Ambiental | Potencial para reutilización de agua (WR) | Alto- Medio - Bajo |
| | Ambiental | Potencial de recuperación de subproductos (RP) | Alto- Medio - Bajo |
| | Ambiental | Fiabilidad | Alto- Medio - Bajo |
| | Social | Impacto de olor (O) | Alto- Medio - Bajo |
| | Social | Impacto de ruido (NO) | Alto- Medio - Bajo |
| | Social | Impacto visual (VI) | Alto- Medio - Bajo |
| | Social | Aceptación pública (PA) | Alto- Medio - Bajo |
| Social | Complejidad de operación (C) | Alto- Medio - Bajo | |
| Avramenko et al. (2010) | Ambiental | DBO | Alto- Medio - Bajo |
| | Ambiental | DQO | Alto- Medio - Bajo |
| | Ambiental | SST (Sólidos Suspendidos Totales) | Alto- Medio - Bajo |
| | Ambiental | TDS (Sólidos Disueltos Totales) | Alto- Medio - Bajo |
| | Ambiental | Grasas, aceites y grasas | Alto- Medio - Bajo |
| | Ambiental | Nutrientes | Alto- Medio - Bajo |
| | Ambiental | Patógenos | Alto- Medio - Bajo |
| | Ambiental | Metales pesados | Alto- Medio - Bajo |
| | Ambiental | Requisitos de terreno | Alto- Medio - Bajo |
| | Económica | Costos de capital | Alto- Medio - Bajo |
| | Económica | Costos de operación y mantenimiento | Alto- Medio - Bajo |
| | Económica | Tiempo de retención hidráulica | Alto- Medio - Bajo |
| | Económica | Potencial de olor y generación de lodos | Alto- Medio - Bajo |

| Fuente | Dimensión | Indicador | Unidad de medida |
|----------------------------|--------------------------|---|--|
| | Económica | Impactos visuales | Alto- Medio - Bajo |
| Castillo et al. (2016) | Ambiental | Potencial de olor | Alto- Medio - Bajo |
| | Ambiental | Potencial de ruido | Alto- Medio - Bajo |
| | Ambiental | Requerimientos de espacio | Alto- Medio - Bajo |
| | Ambiental | Análisis del Ciclo de Vida (LCA) | m |
| | Ambiental | Simplicidad de operación | Factores de emisión de la base de datos Ecoinvent. |
| | Operacional | Flexibilidad | Alto- Medio - Bajo |
| | Operacional | Fiabilidad | Alto- Medio - Bajo |
| | Operacional | Control sobre el proceso | Alto- Medio - Bajo |
| | Operacional | Rendimiento | Alto- Medio - Bajo |
| | Operacional | Necesidad de personal especializado | Alto- Medio - Bajo |
| | Operacional | CAPEX (Gastos de Capital) | Alto- Medio - Bajo |
| | Económica | OPEX (Gastos Operacionales) | Millón de euros (MEUR) |
| | Económica | Emisiones de GEI | Millón de euros por año (MEUR/año) |
| | D'Silva et al. (2021) | Ambiental | Requisito de Energía |
| Ambiental | | Generación y disposición de lodos | Alto- Medio - Bajo |
| Ambiental | | Costo total de inversión | Alto- Medio - Bajo |
| Económica | | Costo de operación y mantenimiento | Alto- Medio - Bajo |
| Económica | | Requisito de área de terreno | Alto- Medio - Bajo |
| Económica | | Eficiencia de tratamiento | Alto- Medio - Bajo |
| Técnica | | Facilidad de operación | Alto- Medio - Bajo |
| Técnica | | Recuperación de energía y recursos | Alto- Medio - Bajo |
| Técnica | | Eficiencia de remoción de contaminantes | Alto- Medio - Bajo |
| Józwiakowski et al. (2015) | Técnica | Costos de inversión | % |
| | Económica | Costos de operación | \$ |
| | Económica | Impacto en el medio ambiente | \$ |
| | Ambiental | Espacio requerido | N.P. |
| | Ambiental | Estética | m ² /p.e. |
| | Ambiental | DBO | N.P. |
| Kalbar et al. (2013b) | Ambiental | Requisito de terreno | (m ² /MLD) |
| | Ambiental | Fiabilidad | Alto- Medio - Bajo |
| | Ambiental | Durabilidad | Alto- Medio - Bajo |
| | Ambiental | Flexibilidad | Alto- Medio - Bajo |
| | Ambiental | Aceptabilidad | Alto- Medio - Bajo |
| | Ambiental | Participación | Alto- Medio - Bajo |
| | Ambiental | Replicabilidad | Alto- Medio - Bajo |
| | Ambiental | Promoción del comportamiento sostenible | Alto- Medio - Bajo |
| | Ambiental | Potencial de calentamiento global | kg/p.e.-año |
| | Ambiental | Potencial de eutrofización | kg/p.e.-año |
| | Económica | Valor presente neto | Rs. Lakh/MLD |

| Fuente | Dimensión | Indicador | Unidad de medida |
|---------------------------|--|---|---|
| | Técnica | Requisito de terreno | m ² /MLD |
| | Técnica | Requerimiento de personal | número |
| | Técnica | Fiabilidad | Alto- Medio - Bajo |
| | Técnica | Durabilidad | Alto- Medio - Bajo |
| | Técnica | Flexibilidad | Alto- Medio - Bajo |
| | Técnica | Aceptabilidad | Alto- Medio - Bajo |
| | Técnica | Participación | Alto- Medio - Bajo |
| | Técnica | Replicabilidad | Alto- Medio - Bajo |
| | Técnica | Promoción del comportamiento sostenible | Alto- Medio - Bajo |
| Kamami et al. (2011) | Ambiental | DBO | mg/L |
| | Ambiental | DQO | mg/L |
| | Ambiental | SST | mg/L |
| | Ambiental | Nitrato | mg/L |
| | Económica | Costos de capital | \$/m ³ ·d |
| | Económica | Operación y Mantenimiento | \$/m ³ ·d |
| | Económica | Requisitos de terreno | m ² ·m ³ /d |
| | Económica | Requerimientos de energía | m ² ·m ³ /d |
| Khattiyavong & Lee (2019) | N.P. | Requisito de terreno | m ² |
| | N.P. | Uso de electricidad | kWh |
| | N.P. | Producción de lodos | kg/d |
| | N.P. | Emisión de CO2 | kg/d |
| Li et al. (2023) | Ambiental | Tasa de remoción de DQO | % |
| | Ambiental | Tasa de remoción de DBO | % |
| | Ambiental | Tasa de remoción de SST | % |
| | Ambiental | Tasa de remoción de Amoníaco | % |
| | Ambiental | Tasa de remoción de NT | % |
| | Ambiental | Producción de lodos | Producción diaria de lodos (toneladas) / agua tratada diaria (toneladas) |
| | Económica | Costo de inversión | (Costo de terreno + costo de construcción civil + costo de compra de equipos) (diez mil yuanes) / volumen de agua tratada diariamente (toneladas) |
| | Económica | Costo de operación | (Costo de electricidad + costo farmacéutico + costo laboral + costo de depreciación de equipos + otros costos) (diez mil yuanes) / volumen diario de agua (toneladas) |
| Técnica | Resistencia a carga hidráulica de choque | Tratamiento diario máximo de agua (toneladas) / Tratamiento diario promedio anual de agua (toneladas) | |

| Fuente | Dimensión | Indicador | Unidad de medida |
|--------|---------------------------|---|--|
| | Técnica | Estabilidad operacional | Días estándar de efluente anual (días) / días totales de operación anual (días) × 100% |
| | Técnica | Facilidad de manejo de operación | Cualitativa |
| | Generalidades | simplicidad de la construcción | N.P. |
| | Generalidades | requisitos de terreno | N.P. |
| | Generalidades | facilidad para agregar más corrientes de proceso o retrofit | N.P. |
| | Generalidades | eficiencia del tratamiento | N.P. |
| | Operación y mantenimiento | simplicidad de la fase de puesta en marcha operacional | N.P. |
| | Operación y mantenimiento | facilidad de operación | N.P. |
| | Operación y mantenimiento | requisito de experiencia externa | N.P. |
| | Operación y mantenimiento | demanda de energía | N.P. |
| | Operación y mantenimiento | necesidad de repuestos | N.P. |
| | Operación y mantenimiento | grado de automatización | N.P. |
| | Confiabilidad del proceso | efecto de la falla de la planta | N.P. |
| | Confiabilidad del proceso | capacidad para ajustar procesos | N.P. |
| | Confiabilidad del proceso | reacción a cargas de choque | N.P. |
| | Confiabilidad del proceso | formación de espuma | N.P. |
| | Confiabilidad del proceso | formación de lodos bulking | N.P. |

| Fuente | Dimensión | Indicador | Unidad de medida |
|--------------------------------|-----------------------------------|---|---|
| | Gestión de lodos | calidad de lodos producidos | N.P. |
| | Gestión de lodos | cantidad de lodos para disposición | N.P. |
| | Gestión de lodos | capacidad para reiniciar el proceso de tratamiento después de la inhibición | N.P. |
| Mena-Ulecia & Hernández (2015) | Ambiental | Requisito de área | m ² /habitante |
| | Ambiental | Uso de energía | kWh/habitante × año |
| | Ambiental | Demanda Bioquímica de Oxígeno | % de remoción |
| | Ambiental | Sólidos Suspendidos Totales | % de remoción |
| | Ambiental | Nitrógeno Total | % de remoción |
| | Ambiental | Remoción de coliformes totales | uLog de MPN/100 ml |
| | Ambiental | Generación de lodos | L/habitante × año |
| | Ambiental | Generación de olores | Alto, medio, bajo |
| | Ambiental | Generación de ruido | Alto, medio, bajo |
| | Económica | Costo de capital | USD/habitante |
| | Económica | Costo de operación y mantenimiento | USD/habitante × año |
| | Social | Aceptación | Alto, medio, bajo |
| Social | Personal | Unidades requeridas | |
| Molinos-Senante et al. (2015) | Económica | VPN | \$ |
| Muga & Mihelcic (2008) | Económica | Costos de capital | (\$/GPD) |
| | Económica | Operación y gestión | \$ |
| | Económica | Costo para el usuario | (\$/mes) |
| | Ambiental | Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) | (% de remoción) |
| | Ambiental | Sólidos Suspendidos Totales (SST) | (% de remoción) |
| | Ambiental | Nitrógeno (NH ₃) | (% de remoción) |
| | Ambiental | Fósforo | (% de remoción) |
| | Societal | Participación pública | en la selección de la tecnología de tratamiento |
| | Social | Tamaño de la comunidad servida | Población/MGD |
| | Social | Estética | Nivel medido de molestia por olor |
| | Social | Personal necesario para operar la planta | Personal/MGD |
| | Social | Nivel de educación (Requisitos operacionales) | licencia de operador |
| Social | Disponibilidad de espacio abierto | Área/MGD | |
| Ren & Liang (2017) | Económica | Costos de capital | N.P. |
| | Económica | Costos de operación y mantenimiento | N.P. |
| | Ambiental | Efecto en la mejora de la calidad del agua | N.P. |
| | Ambiental | Tierra ocupada | N.P. |
| | Tecnológica | Operabilidad y simplicidad | N.P. |
| | Tecnológica | Madurez | N.P. |
| | Tecnológica | Fiabilidad | N.P. |
| | Social | Aceptabilidad pública | N.P. |
| | Social | Trabajos añadidos | N.P. |
| Social | Apoyo gubernamental | N.P. | |

| Fuente | Dimensión | Indicador | Unidad de medida |
|------------------------------------|----------------|---|--|
| Rodríguez-Castillo et al. (2023) | N.P. | Carga patógena de bacterias en arroyo local | (E. coli: UFC / 100 ml) |
| | N.P. | Carga patógena de virus en arroyos locales | (Colifago \geq reducción de log 5; \leq 5/100 ml (media geométrica mensual)) |
| | N.P. | Cargas higiénicas a EDC en arroyos de agua locales | (Estradiol: [ng/L]) |
| | N.P. | Carga higiénica a lodos biosólidos: patógenos | (E. coli: UFC / 100 mg) |
| | N.P. | Emisiones y olores | H2S y/o CH4 [%v/v], [ppm] o ouE/m3 |
| | N.P. | Provisión de espacios urbanos verdes | m3 de agua residual tratada / año de agua residual tratada disponible |
| Singhirunnusorn & Stenstrom (2009) | Técnica | Operación a largo plazo | Cualitativa |
| | Técnica | Operación a corto plazo | Cualitativa |
| | Técnica | Fiabilidad mecánica | Cualitativa |
| | Técnica | Facilidad de construcción, instalación y puesta en marcha | Cualitativa |
| | Técnica | Requisito de operación y mantenimiento | Cualitativa |
| | Técnica | Remoción de constituyentes de aguas residuales | Cualitativa |
| | Socioeconómica | Requisito de tamaño de terreno | Cualitativa |
| | Socioeconómica | Condiciones de terreno favorables | Cualitativa |
| | Socioeconómica | Costo inicial de construcción | Cualitativa |
| | Socioeconómica | Costo anual de operación y mantenimiento | Cualitativa |
| | Socioeconómica | Aceptación social general | Cualitativa |
| | Socioeconómica | Impacto ambiental/percepción | Cualitativa |
| | Ambiental | Continuidad de la provisión o operación de la instalación | Cualitativa |
| | Ambiental | Posibilidad de recuperación de recursos | Cualitativa |
| Tjandraatmadja et al. (2013) | Ambiental | Uso neto de agua | kL de agua/año |
| | Ambiental | Volumen de aguas residuales generadas | kL/año |
| | Ambiental | Nitrógeno en el efluente | Toneladas de N/año |
| | Ambiental | Eutrofización por fósforo en las aguas residuales | kg de PO ₄ ³⁻ /año |
| | Ambiental | GEI, como CO ₂ generado | kg de CO ₂ equivalente/año |
| | Ambiental | Oxidación fotoquímica | Kg de C ₂ H ₂ /año |
| | Ambiental | Carcinógenos | K DALY/año |
| | Ambiental | Combustibles fósiles | MJ de excedente/año |
| | Ambiental | Uso de recursos minerales y combustibles fósiles | MJ de excedente/año |
| | Ambiental | Producción de lodos | Kg/Ha (3,2,1) |
| | Técnica | Capacidad de tratamiento | Persona equivalente |
| | Técnica | Cumplimiento con parámetros de salud | (1) /N (0) |

| Fuente | Dimensión | Indicador | Unidad de medida |
|--------------------|-----------|--|--------------------|
| | Técnica | Cumplimiento con regulaciones para P, N, SST y parámetros fisicoquímicos (NTU, pH, residual de Cl ₂) | S (1) /N (0) |
| | Técnica | Capacidad de control y monitoreo remoto | (1) /N (0) |
| | Técnica | Calidad del efluente | A, B, C (3,2,1) |
| | Técnica | Olor | Alto- Medio - Bajo |
| | Técnica | Ruido | Alto- Medio - Bajo |
| | Técnica | Potencial de mejora | Alto- Medio - Bajo |
| | Técnica | Adaptabilidad a la calidad del influente | Alto- Medio - Bajo |
| | Técnica | Límites de independencia climática | Sí (1) /No (0) |
| | Económica | Costo total de capital de la PTAR (PTAR + obras civiles + terreno) | \$k/año |
| | Económica | Costo de operación y mantenimiento de la PTAR (personal, electricidad, consumibles) | \$k/año |
| | Social | Fiabilidad total del suministro de agua al hogar | % año (0-100) |
| | Social | Experiencia requerida para la operación de la PTAR (empresa de agua) | Alto- Medio - Bajo |
| | Social | Interferencia en la PTAR por actividades domésticas | Alto- Medio - Bajo |
| | Social | Aceptación por parte del propietario de la vivienda | Alto- Medio - Bajo |
| Wang et al. (2012) | Ambiental | consumo de energía | Alto- Medio - Bajo |
| | Ambiental | uso de productos químicos | Alto- Medio - Bajo |
| | Ambiental | emisiones de GEI (CH ₄) | Alto- Medio - Bajo |
| | Ambiental | emisiones de GEI N ₂ O | Alto- Medio - Bajo |
| | Ambiental | emisiones de GEI CO ₂ | Alto- Medio - Bajo |
| | Ambiental | recuperación de recursos: energía | Alto- Medio - Bajo |
| | Ambiental | recuperación de recursos: compostaje | Alto- Medio - Bajo |
| | Ambiental | recuperación de recursos: estruvita | Alto- Medio - Bajo |

Nota: Hab = habitante, p.e. = población equivalente

REFERENCIAS

- Anaokar, G. S., Khambete, A. K., & Christian, R. A. (2018). EVALUATION OF A PERFORMANCE INDEX FOR MUNICIPAL WASTEWATER TREATMENT PLANTS USING MCDM - TOPSIS. INTERNATIONAL JOURNAL OF TECHNOLOGY, 9(4), Article 4. <https://doi.org/10.14716/ijtech.v9i4.102>
- Arroyo, P., & Molinos-Senante, M. (2018). Selecting appropriate wastewater treatment technologies using a choosing-by-advantages approach. Science of the Total Ambient, 625, 819–827. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.331>
- Avramenko, Y., Kamami, M., & Kraslawski, A. (2010). Fuzzy performance indicators for decision making in selection of wastewater treatment methods. Computer Aided Chemical Engineering, 28(C), Article C. [https://doi.org/10.1016/S1570-7946\(10\)28022-7](https://doi.org/10.1016/S1570-7946(10)28022-7)
- Castillo, A., Cheali, P., Gómez, V., Comas, J., Poch, M., & Sin, G. (2016). An integrated knowledge-based and optimization tool for the sustainable selection of wastewater treatment process concepts. Ambiental Modelling and Software, 84, 177–192. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.06.019>
- D'Silva, T. C., Ahmad, M., Nazim, M., Mirza, M. W., Arafat, T., Ashraf, M. A., Hasan, M. N., Gaur, R. Z., Tyagi, V. K., Mutiyar, P. K., Lew, R. G., Lew, B., & Khan, A. A. (2021). Performance and sustainability assessment of full-scale sewage treatment plants in northern india using multiple-criteria decision-making methods. JOURNAL OF AMBIENTAL ENGINEERING, 147(12), Article 12. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0001941](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001941)

- Galvão, A., Matos, J., Rodrigues, J., & Heath, P. (2005). Sustainable sewage solutions for small agglomerations. *Water Science and Technology*, 52(12), Article 12. <https://doi.org/10.2166/wst.2005.0420>
- Józwiakowski, K., Mucha, Z., Generowicz, A., Baran, S., Bielińska, J., & Wójcik, W. (2015). The use of multi-criteria analysis for selection of technology for a household WWTP compatible with sustainable development. *Archives of Ambient Protection*, 41(3), Article 3. <https://doi.org/10.1515/aep-2015-0033>
- Juznic-Zonta, Z., Guisasola, A., & Baeza, J. A. (2022). Smart-Plant Decision Support System (SP-DSS): Defining a multi-criteria decision-making framework for the selection of WWTP configurations with resource recovery. *JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION*, 367. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132873>
- Kalbar, P. P., Karmakar, S., & Asolekar, S. R. (2013a). Assessment of wastewater treatment technologies: Life cycle approach. *Water and Ambient Journal*, 27(2), Article 2. <https://doi.org/10.1111/wej.12006>
- Kalbar, P. P., Karmakar, S., & Asolekar, S. R. (2013b). The influence of expert opinions on the selection of wastewater treatment alternatives: A group decision-making approach. *Journal of Ambient Management*, 128, 844–851. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.06.034>
- Kamami, M. I., Ndegwa, G. M., & Home, P. G. (2011). Fuzzy based decision support method for selection of sustainable wastewater treatment technologies. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 4(1), Article 1. <https://doi.org/10.3965/j.issn.1934-6344.2011.01.0-0>
- Khattiyavong, C., & Lee, H. S. (2019). Performance simulation and assessment of an appropriate wastewater treatment technology in a densely populated growing city in a developing

- country: A case study in Vientiane, Laos. *Water (Switzerland)*, 11(5), Article 5. Scopus.
<https://doi.org/10.3390/w11051012>
- Li, J., Tang, W. Z., & Gu, L. (2023). Energy efficiency assessment of China wastewater treatment plants by unit energy consumption per kg COD removed. *AMBIENTAL TECHNOLOGY*, 44(2), Article 2. <https://doi.org/10.1080/09593330.2021.1969596>
- Markov, Z., Jovanoski, I., & Dimitrovski, D. (2017). MULTI-CRITERIA ANALYSIS APPROACH FOR SELECTION OF THE MOST APPROPRIATE TECHNOLOGY FOR MUNICIPAL WASTEWATER TREATMENT. *JOURNAL OF AMBIENTAL PROTECTION AND ECOLOGY*, 18(1), Article 1.
- Mena-Ulecia, K., & Hernández, H. H. (2015). Decentralized peri-urban wastewater treatment technologies assessment integrating sustainability indicators. *Water Science and Technology*, 72(2), Article 2. <https://doi.org/10.2166/wst.2015.209>
- Molinos-Senante, M., Gómez, T., Caballero, R., Hernández-Sancho, F., & Sala-Garrido, R. (2015). Assessment of wastewater treatment alternatives for small communities: An analytic network process approach. *Science of The Total Ambiental*, 532, 676–687.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.06.059>
- Muga, H. E., & Mihelcic, J. R. (2008). Sustainability of wastewater treatment technologies. *Journal of Ambiental Management*, 88(3), Article 3.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.03.008>
- Omran, I. I., Al-Saati, N. H., Al-Saati, H. H., Hashim, K. S., & Al-Saati, Z. N. (2021). Sustainability assessment of wastewater treatment techniques in urban areas of iraq using multi-criteria decision analysis (Mcda). *Water Practice and Technology*, 16(2), Article 2.
<https://doi.org/10.2166/wpt.2021.013>

- Ren, J., & Liang, H. (2017). Multi-criteria group decision-making based sustainability measurement of wastewater treatment processes. *Ambiental Impact Assessment Review*, 65, 91–99. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2017.04.008>
- Rodríguez-Castillo, M., Bolívar-Paypay, V., Poganietz, W.-R., & Prieto, A. L. (2023). Indicators for the sustainability assessment of MBR technologies for wastewater reuse in Chile: The good, the bad, and the ugly. *MethodsX*, 10. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2023.102111>
- Shen, X., Huang, D., Zhang, C., & Hu, K. (2018). Performance evaluation of constructed wetlands treating wastewater treatment plant effluent in taihu lake, china. *CLEAN-SOIL AIR WATER*, 46(1), Article 1. <https://doi.org/10.1002/clen.201600442>
- Singhirunnusorn, W., & Stenstrom, M. K. (2009). Appropriate wastewater treatment systems for developing countries: Criteria and indicator assessment in Thailand. *Water Science and Technology*, 59(9), Article 9. <https://doi.org/10.2166/wst.2009.215>
- Singhirunnusorn, W., & Stenstrom, M. K. (2010). A critical analysis of Económica factors for diverse wastewater treatment processes: Case studies in Thailand. *Sustainable Ambiental Research*, 20(4), Article 4.
- Starkl, M., Brunner, N., Das, S., & Singh, A. (2022). Sustainability Assessment for Wastewater Treatment Systems in Developing Countries. *Water*, 14(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/w14020241>
- Tjandraatmadja, G., Sharma, A. K., Grant, T., & Pamminer, F. (2013). A decision support methodology for integrated urban water management in remote settlements. *Water Resources Management*, 27(2), Article 2. <https://doi.org/10.1007/s11269-012-0195-x>
- Wang, X., Liu, J., Ren, N.-Q., Yu, H.-Q., Lee, D.-J., & Guo, X. (2012). Assessment of multiple sustainability demands for wastewater treatment alternatives: A refined evaluation scheme

and case study. *Ambiental Science and Technology*, 46(10), Article 10.

<https://doi.org/10.1021/es300761x>

Apéndice F. Procedimiento para el cálculo del índice de impacto ambiental

El Índice de Impacto Ambiental (IIA) se calcula en función de cuatro indicadores: generación de olores (GO), generación de ruido (GR), emisión de gases de efecto invernadero (EGEI) e impacto visual (IV).

F.1. Asignación de Puntajes:

Cada indicador presentado anteriormente se evaluará para cada alternativa de tratamiento descentralizado utilizando una escala de 1 a 5, donde:

- 1: representa un impacto alto respecto al indicador evaluado para a un tren de tratamiento específico.
- 3: representa un impacto ambiental medio respecto al indicador evaluado para a un tren de tratamiento específico.
- 5: representa un impacto ambiental bajo respecto al indicador evaluado para a un tren de tratamiento específico.

F.2. Estimación del indicador

El IIA se calculará como el promedio de los puntajes asignados a los cuatro indicadores.

La fórmula para calcular el IIA es la siguiente:

$$IIA = \frac{\text{Puntuación de generación de olores} + \text{Puntuación de ruido} + \text{Puntuación de gases de efecto invernadero} + \text{Puntuación de impacto visual}}{4}$$

$$IIA = \frac{GR + GO + EGEI + IV}{4}$$

F.3. Interpretación del Resultado:

Una vez estimado el valor de IAA para cada alternativa se establecen los siguientes umbrales de clasificación:

- Un IIA se considera bajo si tiene valores entre 4 y 5
- Un IIA se considera medio si tiene valores entre 2 y 4
- Un IIA se considera medio si tiene valores entre 2 y 4

Apéndice G - Formato de Caracterización del asentamiento Los Santos Bajo

Nota: Fuente de la información: UIS, amb (2023). Documento de análisis del impacto de los vertimientos de aguas residuales de asentamientos periurbanos no planificados sobre el servicio hidrológico de suministro de las cuencas receptoras en tres comunidades caso de estudio., Universidad Industrial de Santander (UIS) y Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (amb), Bucaramanga.

G.1. Información preliminar

G.1.1. Nombre: Los Santos Bajos

G.1.2. Antigüedad del asentamiento: 23 Años

G.1.3. Intervenciones en el asentamiento:

- En el 2008, se instaló una manguera para conducir las aguas residuales al río. Las diferentes casas de la zona más cercana a Chitota se conectaron. La manguera tenía alrededor de 3 pulgadas de diámetro.
- 2012, Se hicieron estudios de calidad de agua de la fuente de abastecimiento, aljibe Santa Isabel.
- 2013, se canalizaron parte de las aguas residuales provenientes de asentamientos aguas arriba que contaminaban el aljibe.
- 2015, Se construyeron varias cajas, por sectores, para evitar el taponamiento de las tuberías de recolección de aguas residuales.
- 2016, Se intentó hacer un Comité de Agua (independiente de la junta) pero no funcionó.
- 2018, Se construyó un canal para el drenaje del agua lluvia.
- 2020, A través de una acción legal se empezó a recibir agua del amb mediante carrotanque
- 2021, Se instaló un nuevo colector de aguas residuales de 4pulgadas.

G.1.4. Número de habitantes: 283 vivienda

G.1.5. Tasa de crecimiento anual: 28.7 %

G.1.6. Área del asentamiento: 9.93 Ha

G.1.7. Localización de asentamiento: Cerros nororientales de Bucaramanga

G.1.8. Tipo de asentamiento según su localización.

Periurbano

Satelital

G.2. Condiciones del terreno

G.2.1. Superficie disponible: 8166.06 m²

G.2.2. Permeabilidad del suelo: N.D. mm/h

G.2.3. Pendiente promedio del terreno: Predominio de pendientes a nivel (0-1%) y ligeramente escarpadas (25-50)

G.2.4. Nivel freático en período húmedo sin lluvia: N.D. m

G.3. Condiciones ambientales del Asentamiento

G.3.1. Temperatura promedio época seca y lluviosa: 22 °C

G.3.2. Precipitación promedio: 1300 mm / año

G.3.3. Tipo de fuente receptora.

Manantial, quebrada, arroyo

Río

Embalse

Ciénaga, lago, laguna

Pozos de agua subterránea

Suelo

Otro: _____

G.3.4. Existencia de captaciones de agua para consumo humano aguas debajo de la descarga.

Sí

No

G.4. Oferta de recursos y Servicios técnicos:

G.4.1. Fuente de energía eléctrica.

Interconexión nacional

Generación puntual

No hay energía

G.4.2. Continuidad del servicio de energía eléctrica.

< 95%

> 95%

G.4.3. Disponibilidad de repuestos y servicio técnico.

Sí

No

G.4.4. Estado de vías de acceso.

Pavimentada

No pavimentada

G.5. Capacidad instalada en la comunidad:

G.5.1. Vocación del uso del suelo: Zona de protección

G.5.2. Número de personas con estudios técnicos: N.D

G.5.3. Número de mecánicos empíricos: N.D

G.5.4. Número de electricistas empíricos: N.D

G.5.5. Número de maestros de construcción empíricos: N.D.

G.5.6. Organismos presentes de la gestión en el asentamiento:

Se identifican como instituciones afines con bajo poder:

- Comité de ambiente
- secretaria de desarrollo social
- Comité de trabajo
- Comité de deporte
- ICBF
- Asociación para acceder al aljibe

- Fundación GOLES
- Ediles del corregimiento 2

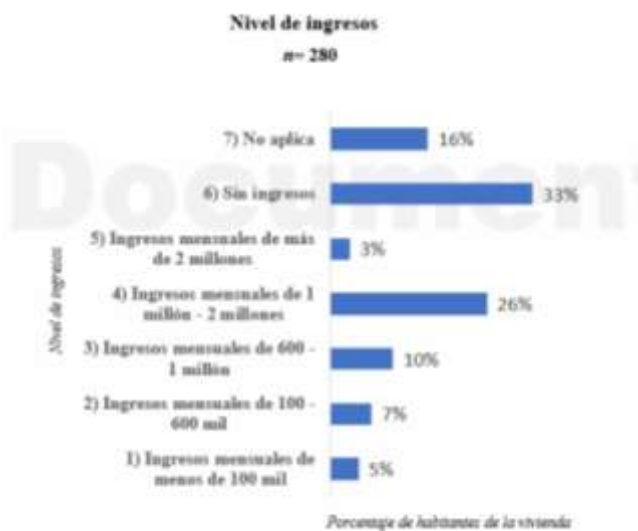
Se identifican como instituciones afines con poder medio:

- Secretaria del medio ambiente
- JAC Los Santos

Se identifican como instituciones afines con poder alto:

- Alcaldía de Bucaramanga
- amb

G.5.7. Ingresos medios de la comunidad: La mayor parte de la comunidad (55%) no tiene ingresos o sus ingresos son menores a un salario mínimo



G.7. Características de las Aguas Residuales:

G.7.1. Volumen de AR generada: 4.35 L/s

G.7.2. Características fisicoquímicas y microbiológicas de las aguas Residuales

Sólidos suspendidos totales: 34 ± 40 mg/L

DBO5: 69 ± 48 mg/L

DQO: 140 ± 156 mg/L

DBO/DQO: 69/140

NT: 10.7 ± 3.8 mg/L

PT: 4.76 ± 1.49 mg/L

NH3-N: 3.7 ± 3.9 mg/L

E. Coli: N.D. mg/L

Coliformes fecales: 2.9 ± 2.8 (10E6) NMP/100 mL

Coliformes totales: N.D. NMP/100 mL

G.7.3. Requerimientos normativos:

Sólidos suspendidos totales: 90 mg/L

DBO5: 180 mg/L

DQO: 90 mg/L

NT: N.A mg/L

PT: N.A mg/L

NH₃-N: N.A mg/L

E. Coli: N.A mg/L

Coliformes fecales: N.A mg/L

Coliformes totales: N.A NMP/100 mL

Contenido de metales pesados: N.A mg/L

G.8. Percepción de la comunidad:

G.8.1. Porcentaje de la comunidad receptiva frente al reúso 89 %

G.8.2. Porcentaje de la comunidad que considera la generación de ruido un problema prioritario: N.D %

G.8.3. Porcentaje de la comunidad que considera la generación de olores un problema prioritario: N.D %

G.8.4. Porcentaje de la comunidad que considera el impacto visual un problema prioritario: N.D %

G.8.5. Tarifa máxima que la comunidad estaría dispuesta a pagar: N.D

G.9. valorización de subproductos

G.9.1. Se considerará el aprovechamiento de Agua tratada

Si [X]

NO []

G.9.2. Si su respuesta anterior fue negativa, le solicitamos amablemente que continúe con la pregunta 9.4. En caso contrario, le pedimos que escoja las posibles actividades relacionadas con la utilización de agua residual tratada con potencial de aplicación en el asentamiento.

Irrigación para alimentos procesados

Irrigación de cultivos leñosos

Riego de hierba para pastoreo

Riego ornamental sin acceso al público

Riego para reforestación

Recarga de acuíferos por percolación

Acuicultura

G.9.3. Los reúsos estipulados requieren remociones adicionales de contaminantes

Nutrientes

Patógenos

Ambos

G.9.4. Se considerará el aprovechamiento de lodos generados

Sí

No

Opcional

G.9.5. Se considerará el aprovechamiento de biogás

Sí

No

Opcional

G.10. Consideraciones adicionales:

Nota: Fuente de la información: UIS, amb (2023). Documento de análisis del impacto de los vertimientos de aguas residuales de asentamientos periurbanos no planificados sobre el servicio hidrológico de suministro de las cuencas receptoras en tres comunidades caso de estudio., Universidad Industrial de Santander (UIS) y Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (amb), Bucaramanga.

Apéndice H. Procedimiento utilizado para la aplicación de método Fuzzy-TOPSIS

A continuación, aparece el procedimiento utilizado para la aplicación del método Fuzzy-TOPSIS, es importante recalcar que fue utilizada como referencia la metodología presentada por Chen (2000). El punto de partida para la aplicación de método fue la matriz caracterizada de trenes aplicables a asentamientos no planificados presentado en la sección 5.33 y el Anexo 6. Estas matrices fueron normalizadas utilizando las siguientes formulas:

$\tilde{r}_{ij} = \left(\frac{a_{ij}}{c_j^*}, \frac{b_{ij}}{c_j^*}, \frac{c_{ij}}{c_j^*} \right)$ donde $c_j^* = \max_i \{c_{ij}\}$ para criterios cuya función de deseabilidad sea maximizar

$\tilde{r}_{ij} = \left(\frac{a_j^-}{c_{ij}^-}, \frac{a_j^-}{b_{ij}^-}, \frac{a_j^-}{a_{ij}^-} \right)$ donde $a_j^- = \min_i \{a_{ij}\}$ para criterios cuya función de deseabilidad sea minimizar

Como calculo tipo para el criterio de facilidad de operación y mantenimiento (función de deseabilidad maximizar) para la alternativa T5 (TS+FAFA) se tiene:

$$\tilde{r}_{11} = \left(\frac{2}{4}, \frac{3}{4}, \frac{4}{4} \right) = (0.50, 0.75, 1.00)$$

La matriz de decisión normalizada aparece a continuación:

| Criterio | | Técnico | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------|-----|--|---------|---------|-------------------------|---------|---------|-------------------------|--------|--------|-------------------------|--------|--------|-------------------------|--------|--------|-------------------------|--------|--------|-------------------------|--------|--------|-------------------------|--------|--------|--|
| Subcriterio | | Facilidad de operación y mantenimiento | | | Consumo de energía | | | Eficiencia de remoción | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | SST | | | DBO | | | DQO | | | NT | | | PT | | | Coliformes Totales | | | |
| Deseabilidad | | Max | | | Min | | | Max | | | Max | | | Max | | | Max | | | Max | | | | | | |
| Alternativa | | Peso ponderado relativo | | | Peso ponderado relativo | | | Peso ponderado relativo | | | Peso ponderado relativo | | | Peso ponderado relativo | | | Peso ponderado relativo | | | Peso ponderado relativo | | | Peso ponderado relativo | | | |
| | | min | med | max | min | med | max | min | med | max | min | med | max | min | med | max | min | med | max | min | med | max | min | med | max | |
| | | 10.53 % | 14.97 % | 21.32 % | 7.46% | 10.17 % | 13.90 % | 1.69 % | 2.40 % | 3.39 % | 1.69 % | 2.40 % | 3.39 % | 1.69 % | 2.40 % | 3.39 % | 1.69 % | 2.40 % | 3.39 % | 1.69 % | 2.40 % | 3.39 % | 1.69 % | 2.40 % | 3.39 % | |
| TS/TF+FAFA | T5 | 0.50 | 0.75 | 1.00 | 1.00 | 0.50 | 0.33 | 0.63 | 0.79 | 0.95 | 0.42 | 0.61 | 0.79 | 0.44 | 0.64 | 0.83 | 0.00 | 0.06 | 0.12 | 0.00 | 0.08 | 0.17 | 0.00 | 0.10 | 0.20 | |
| TS/TF+FAFA+CL | T8 | 0.50 | 0.75 | 1.00 | 1.00 | 0.50 | 0.33 | 0.63 | 0.79 | 0.95 | 0.42 | 0.61 | 0.79 | 0.44 | 0.64 | 0.83 | 0.00 | 0.06 | 0.12 | 0.00 | 0.08 | 0.17 | 0.60 | 0.70 | 0.80 | |
| TF+FP | T10 | 0.50 | 0.75 | 0.75 | 0.50 | 0.33 | 0.25 | 0.89 | 0.95 | 1.00 | 0.89 | 0.92 | 0.95 | 0.89 | 0.92 | 0.94 | 0.24 | 0.32 | 0.41 | 0.67 | 0.83 | 1.00 | 0.20 | 0.20 | 0.20 | |
| TF+FP+CL | T11 | 0.50 | 0.75 | 0.75 | 0.50 | 0.33 | 0.25 | 0.89 | 0.95 | 1.00 | 0.89 | 0.92 | 0.95 | 0.89 | 0.92 | 0.94 | 0.24 | 0.32 | 0.41 | 0.67 | 0.83 | 1.00 | 0.80 | 0.90 | 1.00 | |
| TF+CBR | T12 | 0.25 | 0.50 | 0.75 | 0.50 | 0.33 | 0.25 | 0.89 | 0.95 | 1.00 | 0.89 | 0.92 | 0.95 | 0.89 | 0.92 | 0.94 | 0.24 | 0.32 | 0.41 | 0.67 | 0.83 | 1.00 | 0.20 | 0.30 | 0.40 | |
| TF+CBR+CL | T13 | 0.25 | 0.50 | 0.75 | 0.50 | 0.33 | 0.25 | 0.89 | 0.95 | 1.00 | 0.89 | 0.92 | 0.95 | 0.89 | 0.92 | 0.94 | 0.24 | 0.32 | 0.41 | 0.67 | 0.83 | 1.00 | 0.80 | 0.90 | 1.00 | |
| RAFA+CBR | T24 | 0.25 | 0.50 | 0.75 | 0.50 | 0.33 | 0.25 | 0.89 | 0.95 | 1.00 | 0.89 | 0.92 | 0.95 | 0.89 | 0.92 | 0.94 | 0.24 | 0.32 | 0.41 | 0.33 | 0.50 | 0.67 | 0.20 | 0.30 | 0.40 | |
| RAFA+CBR+CL | T25 | 0.25 | 0.50 | 0.75 | 0.50 | 0.33 | 0.25 | 0.91 | 0.95 | 1.00 | 0.91 | 0.93 | 0.95 | 0.90 | 0.92 | 0.94 | 0.25 | 0.33 | 0.41 | 0.33 | 0.50 | 0.67 | 0.80 | 0.90 | 1.00 | |
| RAFA+FP | T28 | 0.25 | 0.75 | 0.75 | 0.50 | 0.33 | 0.25 | 0.89 | 0.95 | 1.00 | 0.89 | 0.92 | 0.95 | 0.89 | 0.92 | 0.94 | 0.24 | 0.32 | 0.41 | 0.33 | 0.50 | 0.67 | 0.20 | 0.20 | 0.20 | |
| RAFA+FP+CL | T29 | 0.25 | 0.75 | 0.75 | 0.50 | 0.33 | 0.25 | 0.91 | 0.95 | 1.00 | 0.91 | 0.93 | 0.95 | 0.90 | 0.92 | 0.94 | 0.25 | 0.33 | 0.41 | 0.33 | 0.50 | 0.67 | 0.80 | 0.90 | 1.00 | |
| AE | T30 | 0.25 | 0.25 | 0.50 | 0.25 | 0.20 | 0.20 | 0.89 | 0.95 | 1.00 | 0.91 | 0.95 | 1.00 | 0.89 | 0.94 | 1.00 | 0.94 | 0.97 | 1.00 | 0.67 | 0.83 | 1.00 | 0.00 | 0.10 | 0.20 | |
| AE+CL | T31 | 0.25 | 0.25 | 0.50 | 0.25 | 0.20 | 0.20 | 0.89 | 0.95 | 1.00 | 0.91 | 0.95 | 1.00 | 0.90 | 0.95 | 1.00 | 0.95 | 0.98 | 1.00 | 0.67 | 0.83 | 1.00 | 0.80 | 0.90 | 1.00 | |

| Criterio | Económico | | | Ambiental | | | | | |
|--------------|-----------|------|-------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|--------------------------|--------------------------------|-----|
| | CAPEX | OPEX | Potencial reúso de biosólidos | Potencial de recuperación de energía | Potencial reúso de agua tratada | Índice de impacto ambiental | | | |
| Olores | | | | | | Ruidos | Integración paisajística | GEI (Gases efecto invernadero) | |
| Deseabilidad | Min | Min | Max | Max | Max | Min | Min | Min | Min |

| Alternativa | | Peso ponderado relativo | | | Peso ponderado relativo | | | Peso ponderado relativo | | | Peso ponderado relativo | | | Peso ponderado relativo | | | Peso ponderado relativo | | | Peso ponderado relativo | | | Peso ponderado relativo | | | Peso ponderado relativo | | | | | |
|---------------|-----|-------------------------|---------|---------|-------------------------|---------|---------|-------------------------|---------|---------|-------------------------|---------|---------|-------------------------|--------|---------|-------------------------|--------|--------|-------------------------|--------|--------|-------------------------|--------|--------|-------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | min | med | max | min | med | max | min | med | max | min | med | max | min | med | max | min | med | max | min | med | max | min | med | max | min | med | max | min | med | max |
| | | 8.52 % | 11.84 % | 16.69 % | 8.58 % | 11.92 % | 16.80 % | 7.18 % | 11.62 % | 18.34 % | 6.08 % | 10.02 % | 16.19 % | 5.20 % | 8.43 % | 13.81 % | 1.00 % | 1.65 % | 2.75 % | 1.00 % | 1.65 % | 2.75 % | 1.00 % | 1.65 % | 2.75 % | 1.00 % | 1.65 % | 2.75 % | 1.00 % | 1.65 % | 2.75 % |
| TS/TH+FAFA | T5 | 0.90 | 0.68 | 0.54 | 1.00 | 0.77 | 0.63 | 0.50 | 0.75 | 1.00 | 0.20 | 0.20 | 0.40 | 0.20 | 0.40 | 0.60 | 0.33 | 0.25 | 0.20 | 1.00 | 0.50 | 0.33 | 0.33 | 0.25 | 0.20 | 0.33 | 0.25 | 0.20 | 0.33 | 0.25 | 0.20 |
| TS/TH+FAFA+CL | T8 | 0.84 | 0.63 | 0.50 | 0.93 | 0.68 | 0.54 | 0.50 | 0.75 | 1.00 | 0.20 | 0.20 | 0.40 | 0.60 | 0.80 | 1.00 | 0.33 | 0.25 | 0.20 | 1.00 | 0.50 | 0.33 | 0.33 | 0.25 | 0.20 | 0.33 | 0.25 | 0.20 | 0.33 | 0.25 | 0.20 |
| TI+FP | T10 | 1.00 | 0.75 | 0.60 | 1.00 | 0.77 | 0.63 | 0.50 | 0.75 | 1.00 | 0.20 | 0.20 | 0.40 | 0.40 | 0.60 | 0.80 | 1.00 | 0.50 | 0.33 | 0.33 | 0.25 | 0.20 | 1.00 | 0.50 | 0.33 | 0.50 | 0.33 | 0.25 | 0.50 | 0.33 | 0.25 |
| TI+FP+CL | T11 | 0.93 | 0.69 | 0.55 | 0.93 | 0.68 | 0.54 | 0.50 | 0.75 | 1.00 | 0.20 | 0.20 | 0.40 | 0.60 | 0.80 | 1.00 | 1.00 | 0.50 | 0.33 | 0.33 | 0.25 | 0.20 | 1.00 | 0.50 | 0.33 | 0.50 | 0.33 | 0.25 | 0.50 | 0.33 | 0.25 |
| TI+CBR | T12 | 1.00 | 0.75 | 0.60 | 1.00 | 0.77 | 0.63 | 0.50 | 0.75 | 1.00 | 0.20 | 0.20 | 0.40 | 0.40 | 0.60 | 0.80 | 1.00 | 0.50 | 0.33 | 0.33 | 0.25 | 0.20 | 1.00 | 0.50 | 0.33 | 0.50 | 0.33 | 0.25 | 0.50 | 0.33 | 0.25 |
| TI+CBR+CL | T13 | 0.93 | 0.69 | 0.55 | 0.93 | 0.68 | 0.54 | 0.50 | 0.75 | 1.00 | 0.20 | 0.20 | 0.40 | 0.60 | 0.80 | 1.00 | 1.00 | 0.50 | 0.33 | 0.33 | 0.25 | 0.20 | 1.00 | 0.50 | 0.33 | 0.50 | 0.33 | 0.25 | 0.50 | 0.33 | 0.25 |
| RAFA+CBR | T24 | 1.00 | 0.75 | 0.60 | 0.83 | 0.67 | 0.56 | 0.50 | 0.75 | 1.00 | 0.80 | 1.00 | 1.00 | 0.40 | 0.60 | 0.80 | 0.25 | 0.20 | 0.20 | 0.33 | 0.25 | 0.20 | 1.00 | 0.50 | 0.33 | 1.00 | 0.50 | 0.33 | 1.00 | 0.50 | 0.33 |
| RAFA+CBR+CL | T25 | 0.93 | 0.69 | 0.55 | 0.78 | 0.60 | 0.49 | 0.50 | 0.75 | 1.00 | 0.80 | 1.00 | 1.00 | 0.60 | 0.80 | 1.00 | 0.25 | 0.20 | 0.20 | 0.33 | 0.25 | 0.20 | 1.00 | 0.50 | 0.33 | 1.00 | 0.50 | 0.33 | 1.00 | 0.50 | 0.33 |
| RAFA+FP | T28 | 1.00 | 0.75 | 0.60 | 0.83 | 0.67 | 0.56 | 0.50 | 0.75 | 1.00 | 0.80 | 1.00 | 1.00 | 0.40 | 0.60 | 0.80 | 0.25 | 0.20 | 0.20 | 0.33 | 0.25 | 0.20 | 1.00 | 0.50 | 0.33 | 1.00 | 0.50 | 0.33 | 1.00 | 0.50 | 0.33 |
| RAFA+FP+CL | T29 | 0.93 | 0.69 | 0.55 | 0.78 | 0.60 | 0.49 | 0.50 | 0.75 | 1.00 | 0.80 | 1.00 | 1.00 | 0.60 | 0.80 | 1.00 | 0.25 | 0.20 | 0.20 | 0.33 | 0.25 | 0.20 | 1.00 | 0.50 | 0.33 | 1.00 | 0.50 | 0.33 | 1.00 | 0.50 | 0.33 |
| AE | T30 | 0.54 | 0.43 | 0.36 | 0.63 | 0.42 | 0.31 | 0.50 | 0.75 | 1.00 | 0.20 | 0.20 | 0.40 | 0.40 | 0.60 | 0.80 | 1.00 | 1.00 | 0.50 | 0.25 | 0.20 | 0.20 | 1.00 | 0.50 | 0.33 | 1.00 | 0.50 | 0.33 | 1.00 | 0.50 | 0.33 |
| AE+CL | T31 | 0.52 | 0.41 | 0.34 | 0.60 | 0.39 | 0.29 | 0.50 | 0.75 | 1.00 | 0.20 | 0.20 | 0.40 | 0.80 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 0.50 | 0.25 | 0.20 | 0.20 | 1.00 | 0.50 | 0.33 | 1.00 | 0.50 | 0.33 | 1.00 | 0.50 | 0.33 |

Una vez calculada la matriz de decisión normalizada fue realizado el cálculo de la matriz de decisión normalizada ponderada, utilizando la siguiente formula:

$$\widetilde{V}_{ij} = \widetilde{r}_{ij} \times w_j = (a_1, b_1, c_1) \otimes (a_2, b_2, c_2) = (a_1 * a_2, b_1 * b_2, c_1 * c_2)$$

Como calculo tipo para \widetilde{V}_{11}

$$\begin{aligned} \widetilde{V}_{ij} = \widetilde{r}_{11} \times w_1 &= (0.50, 0.75, 1.00) \otimes (0.10, 0.14, 0.21) \\ &= (0.50 * 0.10, 0.75 * 0.14, 1.00 * 0.21) = (0.05, 0.11, 0.21) \end{aligned}$$

A continuación, se encuentra la matriz de decisión normalizada ponderada:

| Criterio | | Técnico | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------|-----|--|--------|--------|--------------------|--------|--------|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Subcriterio | | Facilidad de operación y mantenimiento | | | Consumo de energía | | | Eficiencia de remoción | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | SST | | | DBO | | | DQO | | | NT | | | PT | | | Coliformes | | | | | |
| Deseabilidad | | Max | | | Min | | | Max | | | Max | | | Max | | | Max | | | Max | | | | | | | | |
| Alternativa | | min | med | max | min | med | max | min | med | max | min | med | max | min | med | max | min | med | max | min | med | max | min | med | max | min | med | max |
| | | 10.53% | 14.97% | 21.32% | 7.46% | 10.17% | 13.90% | 1.69% | 2.40% | 3.39% | 1.69% | 2.40% | 3.39% | 1.69% | 2.40% | 3.39% | 1.69% | 2.40% | 3.39% | 1.69% | 2.40% | 3.39% | 1.69% | 2.40% | 3.39% | 1.69% | 2.40% | 3.39% |
| TS/TI+FAFA | T5 | 0.05 | 0.11 | 0.21 | 0.07 | 0.05 | 0.05 | 0.01 | 0.02 | 0.03 | 0.01 | 0.01 | 0.03 | 0.01 | 0.02 | 0.03 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.01 |
| TS/TI+FAFA+CL | T8 | 0.05 | 0.11 | 0.21 | 0.07 | 0.05 | 0.05 | 0.01 | 0.02 | 0.03 | 0.01 | 0.01 | 0.03 | 0.01 | 0.02 | 0.03 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.01 |
| TI+FP | T10 | 0.05 | 0.11 | 0.16 | 0.04 | 0.03 | 0.03 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.03 | 0.00 | 0.00 | 0.01 |
| TI+FP+CL | T11 | 0.05 | 0.11 | 0.16 | 0.04 | 0.03 | 0.03 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.03 | 0.01 | 0.02 | 0.03 |
| TI+CBR | T12 | 0.03 | 0.07 | 0.16 | 0.04 | 0.03 | 0.03 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.03 | 0.00 | 0.01 | 0.01 |
| TI+CBR+CL | T13 | 0.03 | 0.07 | 0.16 | 0.04 | 0.03 | 0.03 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.03 | 0.01 | 0.02 | 0.03 |
| RAFA+CBR | T24 | 0.03 | 0.07 | 0.16 | 0.04 | 0.03 | 0.03 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.00 | 0.01 | 0.01 |
| RAFA+CBR+CL | T25 | 0.03 | 0.07 | 0.16 | 0.04 | 0.03 | 0.03 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.01 | 0.02 | 0.03 |
| RAFA+FP | T28 | 0.03 | 0.11 | 0.16 | 0.04 | 0.03 | 0.03 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 0.01 |
| RAFA+FP+CL | T29 | 0.03 | 0.11 | 0.16 | 0.04 | 0.03 | 0.03 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.01 | 0.02 | 0.03 |
| AE | T30 | 0.03 | 0.04 | 0.11 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.01 | 0.02 | 0.03 | 0.01 | 0.02 | 0.03 | 0.00 | 0.00 | 0.01 |
| AE+CL | T31 | 0.03 | 0.04 | 0.11 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.01 | 0.02 | 0.03 | 0.01 | 0.02 | 0.03 | 0.01 | 0.02 | 0.03 |

| Criterio | | Económico | | | | | | Ambiental | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------|-----|-----------|---------|---------|--------|---------|---------|-------------------------------|---------|---------|--------------------------------------|---------|---------|---------------------------------|--------|---------|-----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------------------------|--------|--------|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|-----|-----|-----|
| Subcriterio | | CAPEX | | | OPEX | | | Potencial reúso de biosólidos | | | Potencial de recuperación de energía | | | Potencial reúso de agua tratada | | | Índice de impacto ambiental | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | Olores | | | Ruidos | | | Integración paisajística | | | GEI (Gases efecto invernadero) | | | | | | | | |
| Deseabilidad | | Min | | | Min | | | Max | | | Max | | | Max | | | Min | | | Min | | | Min | | | Min | | | | | | | | |
| Alternativa | | min | med | max | min | med | max | min | med | max | min | med | max | min | med | max | min | med | max | min | med | max | min | med | max | min | med | max | min | med | max | min | med | max |
| | | 8.52 % | 11.84 % | 16.69 % | 8.58 % | 11.92 % | 16.80 % | 7.18 % | 11.62 % | 18.34 % | 6.08 % | 10.02 % | 16.19 % | 5.20 % | 8.43 % | 13.81 % | 1.00 % | 1.65 % | 2.75 % | 1.00 % | 1.65 % | 2.75 % | 1.00 % | 1.65 % | 2.75 % | 1.00 % | 1.65 % | 2.75 % | 1.00 % | 1.65 % | 2.75 % | | | |
| TS/TI+FAFA | T5 | 0.08 | 0.08 | 0.09 | 0.09 | 0.09 | 0.11 | 0.04 | 0.09 | 0.18 | 0.01 | 0.02 | 0.06 | 0.01 | 0.03 | 0.08 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | | | |
| TS/TI+FAFA+CL | T8 | 0.07 | 0.07 | 0.08 | 0.08 | 0.08 | 0.09 | 0.04 | 0.09 | 0.18 | 0.01 | 0.02 | 0.06 | 0.03 | 0.07 | 0.14 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | | | |
| TI+FP | T10 | 0.09 | 0.09 | 0.10 | 0.09 | 0.09 | 0.11 | 0.04 | 0.09 | 0.18 | 0.01 | 0.02 | 0.06 | 0.02 | 0.05 | 0.11 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | | | |

Una vez realizado el cálculo de la matriz normalizada ponderada se procedió a computar la solución ideal positiva difusa (A^*) y la solución ideal negativa difusa (A^-) a través de la aplicación de las siguientes formulas:

$$A^* = (\tilde{v}_1^*, \tilde{v}_2^*, \tilde{v}_3^*, \dots, \tilde{v}_n^*), \text{ donde } \tilde{v}_j^* = \max_i\{v_j\}$$

$$A^- = (\tilde{v}_1^-, \tilde{v}_2^-, \tilde{v}_3^-, \dots, \tilde{v}_n^-), \text{ donde } \tilde{v}_j^- = \min_i\{v_j\}$$

Como cálculo tipo, para el criterio facilidad de operación y mantenimiento se tiene:

$$A^* = (0.05, 0.11, 0.21)$$

$$A^- = (0.03, 0.04, 0.11)$$

A continuación, se encuentran las soluciones ideales positivas y negativas para el caso de estudio:

| Técnica | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|-----|-----|-----|--------------------|-----|-----|------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------------|-----|-----|
| Facilidad de operación y mantenimiento | | | | Consumo de energía | | | Eficiencia de remoción | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | SST | | | DBO | | | DQO | | | NT | | | PT | | | Coliformes | | |
| Max | | | | Min | | | Max | | | Max | | | Max | | | Max | | | Max | | | | | |
| + | .05 | .11 | .21 | .02 | .02 | .03 | .02 | .02 | .03 | .02 | .02 | .03 | .02 | .02 | .03 | .02 | .02 | .03 | .01 | .02 | .03 | .01 | .02 | .03 |
| - | .03 | .04 | .11 | .07 | .05 | .05 | .01 | .02 | .03 | .01 | .01 | .03 | .01 | .02 | .03 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .01 | .00 | .00 | .01 |

| Económico | | | | | | | Ambiental | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------|-----|-----|------|-----|-----|-----|-------------------------------|-----|-----|--------------------------------------|-----|-----|---------------------------------|-----|-----|-----------------------------|-----|-----|--------|-----|-----|--------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| CAPEX | | | OPEX | | | | Potencial reúso de biosólidos | | | Potencial de recuperación de energía | | | Potencial reúso de agua tratada | | | Índice de impacto ambiental | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | Olores | | | Ruidos | | | Integración paisajística | | | GEI | | | | | |
| Min | | | Min | | | | Max | | | Max | | | Max | | | Min | | | Min | | | Max | | | Min | | | | | |
| + | .04 | .05 | .06 | .05 | .05 | .05 | .04 | .09 | .18 | .05 | .10 | .16 | .04 | .08 | .14 | .00 | .00 | .01 | .00 | .00 | .01 | .01 | .01 | .01 | .00 | .00 | .01 | .00 | .00 | .01 |
| - | .09 | .09 | .10 | .09 | .09 | .11 | .04 | .09 | .18 | .01 | .02 | .06 | .01 | .03 | .08 | .01 | .02 | .01 | .01 | .01 | .01 | .01 | .01 | .00 | .00 | .01 | .01 | .01 | .01 | .01 |

Una vez determinadas la solución ideal positiva difusa (A^*) y la solución ideal negativa difusa (A^-) para cada criterio j , fue calculada la distancia ideal positiva y negativa para cada alternativa i respecto a las soluciones ideales calculadas previamente. Para este procedimiento fue utilizada la siguiente formula:

$$d_i^+ = \sum_{j=1}^n d(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^+), \text{ donde } i = 1, 2, \dots, m$$

$$d_i^- = \sum_{j=1}^n d(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^-), \text{ donde } i = 1, 2, \dots, m$$

Como calculo tipo se tiene que la distancia a la solución positiva para el criterio facilidad de operación y mantenimiento para la alternativa T5 está definida por:

$$d_{11}^+ = \sqrt{\frac{1}{3}[(0.05 - 0.05)^2 + (0.11 - 0.11)^2 + (0.21 - 0.21)^2]} = 0.00$$

De esta manera se tiene que la distancia a la solución ideal de la primera alternativa se obtiene a través de:

$$d_1^+ = 0.00 + 0.04 + 0.00 + 0.01 + 0.01 + 0.02 + 0.02 + 0.02 + 0.03 + 0.04 + 0.00 + 0.07 \\ + 0.04 + 0.00 + 0.01 + 0.00 + 0.00 = 0.32$$

A continuación, se presentan tablas con cálculos de distancia a la solución ideal negativa y positiva para cada alternativa:

| Alternativa | | Criterio | | | | | | | | | | | | | | | | | d+ | |
|---------------|-----|--|--------------------|------------|------|------|------|------|------------|-------------------|-------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|--------|--------------------------|--------------------------------|------|------|
| | | Técnico | | | | | | | Económico | | Ambiental | | | | | | | | | |
| | | Facilidad de operación y mantenimiento | Consumo de energía | Remociones | | | | | | Inversión inicial | Costos de operación y mantenimiento | Potencial reúso de biosólidos | Potencial de recuperación de biogás | Potencial reúso de agua tratada | índice de impacto ambiental | | | | | |
| | | | | SST | DBO | DQO | NT | PT | Coliformes | | | | | | Olores | Ruidos | Integración paisajística | Gases efecto invernadero (GEI) | | |
| TS/TF+FAFA | T5 | 0.00 | 0.04 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.04 | 0.00 | 0.07 | 0.04 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.32 |
| TS/TF+FAFA+CL | T8 | 0.00 | 0.04 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.02 | 0.00 | 0.03 | 0.03 | 0.00 | 0.07 | 0.01 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.25 |
| TF+FP | T10 | 0.03 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.00 | 0.02 | 0.04 | 0.04 | 0.00 | 0.07 | 0.03 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.27 |
| TF+FP+CL | T11 | 0.03 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 0.03 | 0.03 | 0.00 | 0.07 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.22 |
| TF+CBR | T12 | 0.04 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.00 | 0.01 | 0.04 | 0.04 | 0.00 | 0.07 | 0.03 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.27 |
| TF+CBR+CL | T13 | 0.04 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 0.03 | 0.03 | 0.00 | 0.07 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.23 |
| RAFA+CBR | T24 | 0.04 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.04 | 0.03 | 0.00 | 0.00 | 0.03 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.20 |
| RAFA+CBR+CL | T25 | 0.04 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.01 | 0.00 | 0.03 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.15 |
| RAFA+FP | T28 | 0.03 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.01 | 0.02 | 0.04 | 0.03 | 0.00 | 0.00 | 0.03 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.19 |
| RAFA+FP+CL | T29 | 0.03 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.01 | 0.00 | 0.03 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.14 |
| AE | T30 | 0.07 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.07 | 0.03 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.21 |
| AE+CL | T31 | 0.07 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.07 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.16 |

| Alternativa | | Criterio | | | | | | | | | | | | | | | | | d- | |
|---------------|-----|--|--------------------|------------|------|------|------|------|------------|-------------------|-------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|--------|--------------------------|------|------|------|
| | | Técnico | | | | | | | | Económico | | Ambiental | | | | | | | | |
| | | Facilidad de operación y mantenimiento | Consumo de energía | Remociones | | | | | | Inversión inicial | Costos de operación y mantenimiento | Potencial Reusó de biosólidos | Potencial de recuperación de biogás | Potencial reúso de agua tratada | índice de impacto ambiental | | | | | |
| | | | | SST | DBO | DQO | NT | PT | Coliformes | | | | | | Olores | Ruidos | Integración paisajística | GEI | | |
| TS/TI+FAFA | T5 | 0.07 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.10 |
| TS/TI+FAFA+CL | T8 | 0.07 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.04 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.16 |
| TI+FP | T10 | 0.05 | 0.02 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.16 |
| TI+FP+CL | T11 | 0.05 | 0.02 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.04 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.21 |
| TI+CBR | T12 | 0.04 | 0.02 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.14 |
| TI+CBR+CL | T13 | 0.04 | 0.02 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.04 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.19 |
| RAFA+CBR | T24 | 0.04 | 0.02 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.07 | 0.02 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.22 |
| RAFA+CBR+CL | T25 | 0.04 | 0.02 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.01 | 0.02 | 0.00 | 0.07 | 0.04 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.27 |
| RAFA+FP | T28 | 0.05 | 0.02 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.07 | 0.02 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.23 |
| RAFA+FP+CL | T29 | 0.05 | 0.02 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.01 | 0.02 | 0.00 | 0.07 | 0.04 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.28 |
| AE | T30 | 0.00 | 0.04 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.02 | 0.00 | 0.04 | 0.04 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.20 |
| AE+CL | T31 | 0.00 | 0.04 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.04 | 0.04 | 0.00 | 0.00 | 0.04 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.25 |

Finalmente, fue calculado el coeficiente de proximidad de cada para la clasificación de las distintas alternativas aplicando la siguiente formula:

$$CC_i = \frac{d_i^-}{d_i^- + d_i^+}$$

Como cálculo tipo se tiene para la alternativa T5:

$$CC_i = \frac{0.10}{0.32 + 0.12} * 100 = 23.11$$

A continuación, se encuentran los coeficientes de cercanía calculados para cada alternativa con su respectiva clasificación:

| Alternativa | | CC | Clasificación |
|---------------|-----|-------|---------------|
| TS/TI+FAFA | T5 | 23.11 | 12 |
| TS/TI+FAFA+CL | T8 | 39.11 | 9 |
| TI+FP | T10 | 36.98 | 10 |
| TI+FP+CL | T11 | 49.13 | 6 |
| TI+CBR | T12 | 34.34 | 11 |
| TI+CBR+CL | T13 | 46.02 | 8 |
| RAFA+CBR | T24 | 52.85 | 5 |
| RAFA+CBR+CL | T25 | 63.92 | 2 |
| RAFA+FP | T28 | 54.47 | 4 |
| RAFA+FP+CL | T29 | 66.05 | 1 |
| AE | T30 | 48.92 | 7 |
| AE+CL | T31 | 61.39 | 3 |

REFERENCIAS

Chen, C.-T. (2000). Extensions of the TOPSIS for group decision-making under fuzzy environment. *Fuzzy Sets and Systems*, 114(1), 1–9. [https://doi.org/10.1016/S0165-0114\(97\)00377-1](https://doi.org/10.1016/S0165-0114(97)00377-1)