



**Evaluación de alternativas para el tratamiento de aguas residuales en la zona urbana del
municipio de Arboletes (Antioquia)**

Daniela Lemos Quiroga
Yessica Lorena Rodríguez Pereanez

Monografía presentada para optar el título de Especialista en Manejo y Gestión del Agua

Asesor
Darío Naranjo Fernández, Doctor (PhD) en Saneamiento

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería
Especialización en Manejo y Gestión del Agua
Medellín, Antioquia, Colombia

2024

Cita	(Lemos Quiroga & Rodríguez Pereanez, 2024)
Referencia Estilo APA 7 (2020)	Lemos Quiroga, D., & Rodríguez Pereanez, Y. L. (2024). <i>Evaluación de alternativas para el tratamiento de aguas residuales en la zona urbana del municipio de Arboletes (Antioquia)</i> [Trabajo de grado especialización]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.



Especialización en Manejo y Gestión del Agua, Cohorte XII.



Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Tabla de contenido

Resumen	6
Abstract	7
Introducción	8
1. Objetivos	11
1.1 Objetivo general	11
1.2 Objetivos específicos.....	11
2. Marco teórico	12
2.1 Tratamientos preliminares.....	12
2.2 Tratamientos primarios	13
2.3 Tratamientos secundarios	14
2.3.1. Lodos activados	15
2.3.2. Filtros percoladores.....	15
2.3.3. Lagunas aireadas	16
2.3.4. Lagunas de oxidación o estabilización	16
2.3.5. Biodiscos.....	18
3. Estado del arte.....	19
4. Metodología.....	24
4.1 Sitio de estudio.....	24
4.2 Determinación de variables técnicas	27
4.3 Evaluación cuantitativa de las alternativas por parte de profesionales relacionados	29
5. Resultados y análisis	30
6. Conclusiones y recomendaciones	34
6.1 Conclusión.....	34
6.2 Recomendaciones.....	34
Referencias	36
Anexo	39

Lista de tablas

Tabla 1. Generalidades de la laguna de oxidación.	8
Tabla 2. Niveles de tratamiento de agua residual.....	13
Tabla 3. Clasificación de tratamientos de aguas residuales.	14
Tabla 4. Ponderación por criterio.	28
Tabla 5. Resultado de evaluación de profesionales.....	30

Lista de figuras

Figura 1. Ubicación de la laguna de oxidación y río Volcán.	9
Figura 2. Entrada a la laguna de oxidación.	24
Figura 3. Estado físico de la laguna de oxidación.....	24
Figura 4. Estructuras de la laguna de oxidación.	25
Figura 5. Cerco de la estructura de la laguna de oxidación.	25
Figura 6. Cauce del río Volcán.	26

Resumen

El objetivo de cualquier tratamiento es eliminar los componentes definidos como contaminantes, molestos o con efectos nocivos para el medio ambiente, ajustar la calidad de las aguas vertidas a las normatividades, proteger la salud y promover el bienestar de una sociedad en general. El presente documento presenta la evaluación de diferentes alternativas de tratamiento: filtros percoladores, biodiscos, lagunas de estabilización o de oxidación, laguna de aireación y lodos activados, para las aguas servidas generadas en la zona urbana del municipio de Arboletes, ubicado en la subregión de Urabá del departamento de Antioquia, a través de una evaluación cualitativa de variables como: caudal, carga orgánica, seguridad física, generación de olores, ruidos y espumas, eficiencia de remoción, costos, disponibilidad de extensión o área de terreno constructivo, topografía, población, características del suelo y estudios hidrogeológicos empleando el método Saaty. Cada una de estas variables se califican respecto a las otras, que serían criterios de entrada para la matriz Saaty, a partir de categorías de respuesta: igualmente importante, ligeramente más importante, bastante más importante, considerablemente más importante o absolutamente más importante. Por lo tanto, se evalúa criterio por criterio hasta tener los coeficientes del promedio de cada calificación correspondiente, a partir del uso de la matriz. Los resultados indican que la laguna de estabilización o de oxidación es la alternativa de tratamiento de aguas residuales más adecuada de acuerdo a las características y necesidades de la zona urbana del municipio de Arboletes.

Palabras clave: tratamiento, aguas residuales, variables técnicas, método Saaty.

Abstract

The objective of any treatment is to eliminate components defined as contaminants, nuisances or with harmful effects on the environment, adjust the quality of the discharged water to legal specifications, protect health and promote the well-being of society in general. This document presents the evaluation of different treatment alternatives: trickling filters, biodisks, stabilization or oxidation lagoons, aeration lagoon and activated sludge, for wastewater generated in the urban area of Arboletes, located in the Urabá subregion at the department of Antioquia, through a qualitative evaluation of variables such as: flow, organic load, physical security, generation of odors, noises and foams, removal efficiency, costs, availability of extension or area of construction land, topography, population, characteristics soil and hydrogeological studies using the Saaty method. Each of these variables are qualified with respect to the others, which will be entry criteria for the Saaty matrix, based on response categories: important, slightly more important, considerably more important, considerably more important or absolutely more important. Therefore, criterion by criterion will be evaluated until the average coefficients of each corresponding qualification are obtained, based on the use of the matrix. The results indicate that the stabilization or oxidation lagoon is the most appropriate wastewater treatment alternative according to the characteristics and needs of the urban area of the municipality of Arboletes.

Keywords: treatment, wastewater, technical variables, Saaty method.

Introducción

De acuerdo al Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), la población de Arboletes para el 2021 se estimó en 30.984 habitantes; correspondiendo 11.151 habitantes para la zona urbana y 19.833 para la zona rural. La altitud de la cabecera municipal es de 4 m.s.n.m. y temperatura media 28 °C.

Según el Plan Maestro de Acueducto y Alcantarillado de Arboletes de julio de 2014, en el municipio se realiza el tratamiento de las aguas residuales mediante una laguna de oxidación, la cual se encuentra en el sector Las Marías, dentro del casco urbano, limitando con el río Volcán y la calle 29 sobre una terraza de aproximadamente 10 metros de altura y cerca de la zona norte de expansión; ésta recoge la mayor parte de las aguas del municipio. Su descarga se realiza por medio de un canal abierto al río Volcán, aproximadamente 300 metros antes de la desembocadura de éste al mar.

Su perímetro presenta diferentes grados de desprotección. En algunos tramos, la actividad pecuaria y la deforestación han ocasionado la pérdida del suelo. La alta sedimentación y la compactación de sus orillas y la poca profundidad de la laguna cuestionan la eficiencia actual de la misma y la señalan como una fuente de contaminación para el municipio. El estado físico y sanitario en general es bueno, aunque presenta algunas deficiencias. Algunas generalidades de la laguna se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Generalidades de la laguna de oxidación.

Área de la laguna	1,26 Ha
Profundidad	1,6 m
Q afluente	1814,1 m ³ /d = 21 L/s
Volumen de la laguna	19500 m ³
Tiempo de retención hidráulico (td)	10,7 días
Eficiencia de remoción de DBO	88%

Fuente: (Acueductos y Alcantarillados Sostenibles S.A. , 2014)

El sistema de alcantarillado de la zona urbana opera como un sistema residual. Sin embargo, en algunos sectores del municipio existen redes de aguas combinadas debido a la existencia de sumideros, cunetas u obras que drenan el agua lluvia y son transportadas por el mismo sistema; estas aguas combinadas pasan por las estaciones de bombeo de Pambelé y Villa Luz para luego ser descargadas al sistema de tratamiento. Las redes del servicio de alcantarillado no cubren todo el municipio.

El efluente de la laguna de oxidación es descargado a fuentes superficiales menores, el río Volcán y el caño Cementerio, que vierten posteriormente al mar Caribe. El río Volcán recibe los vertimientos de la laguna de oxidación junto con los vertimientos de las viviendas no conectadas al sistema de alcantarillado y el agua que se rebosa en periodos de lluvias provenientes de la estación de bombeo Villa Luz, en cuanto al caño cementerio recibe los vertimientos de los reboses periódicos de la estación de bombeo Pambelé. La Figura 1 muestra la ubicación de la laguna de oxidación.

Figura 1. Ubicación de la laguna de oxidación y río Volcán.



Fuente: Google Earth, 2024.

Dada la topografía, la disposición de las zonas construidas y los mecanismos de conducción existe en la actualidad cuatro puntos de descarga de las aguas residuales dentro del perímetro urbano del municipio de Arboletes:

- Descarga quebrada Pambelé.
- Descarga a la laguna de oxidación.
- Descarga 3 al río Volcán.
- Descarga a la PTAR sector Campomar (no corresponde a una PTAR, sino a una EBAR)

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Determinar cuál de las alternativas de tratamiento de aguas residuales es más adecuada para las características y necesidades de la zona urbana del municipio de Arboletes.

1.2 Objetivos específicos

- Proponer variables técnicas del Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS) para la evaluación de la mejor alternativa de tratamiento de aguas residuales.
- Evaluar cualitativamente las variables técnicas para el tratamiento de aguas residuales a través del método Saaty.
- Identificar cuáles son las principales dificultades que presenta el sistema de tratamiento de aguas residuales de la zona urbana del municipio de Arboletes.

2. Marco teórico

Toda actividad humana genera residuos o desechos sólidos, gaseosos y líquidos. La fracción líquida de los mismos conocida como aguas residuales, es esencialmente el agua que se obtiene una vez ha sido contaminada durante las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, de servicios, agrícolas, pecuarios, domésticas y en general cualquier otro uso, así como la mezcla de ellas. Las aguas residuales requieren de un proceso de tratamiento específico, porque pueden ocasionar graves problemas ambientales, sanitarios o de salud pública, como infecciones bacterianas (Hernandez & Margni, 2017).

Por aguas residuales se entiende a la acción y efecto en la que el hombre introduce materias contaminantes, formas de energía o inducir condiciones en el agua de modo directo o indirecto; implica alteraciones perjudiciales de su calidad con relación a los usos posteriores o con su función ecológica. El agua residual está compuesta de componentes físicos, químicos y biológicos; es una mezcla de materiales orgánicos e inorgánicos, suspendidos o disueltos (Díaz et al., 2012).

El tratamiento de ARD implica una serie de procesos físicos, químicos y biológicos para eliminar los contaminantes antes de ser liberados al medio ambiente. Estos procesos incluyen la eliminación de sólidos suspendidos, materia orgánica, nutrientes como nitrógeno y fósforo, la eliminación de patógenos y otros contaminantes orgánicos (Universidad de Antioquia, 2023). El tratamiento de las aguas residuales domésticas se clasifican en cuatro categorías (Tabla 2). En el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS), se cuenta con la clasificación presentada en la Tabla 3.

2.1 Tratamientos preliminares

Para el tratamiento preliminar los procesos de operación más recomendados (Metcalf & Eddy, 2015) son los siguientes:

- Cribado o rejas de barras (rejillas): el primer paso en el tratamiento del agua residual consiste en la separación de los sólidos gruesos. El procedimiento más habitual es hacer pasar el agua residual bruta a través de barras o de tamices.
- Desarenado: su función consiste en eliminar áreas y gravas generalmente a continuación del desbaste y de la dilaceración.

Tabla 2. Niveles de tratamiento de agua residual.

Nivel de tratamiento	Objetivos	Tecnologías más usadas
Preliminar	Eliminar materiales suspendidos y flotantes de gran tamaño, remover sólidos inorgánicos pesados y las cantidades excesivas de aceites y grasas.	Trampa de grasas Rejillas de cribado Tamices
Primario	Eliminar materiales sedimentables flotantes dado el caso.	Tanques sépticos Sedimentadores Flotación por aire disuelto
Secundario	Remueve la materia orgánica soluble y coloidal, además elimina sólidos suspendidos que no se removieron en el sistema primario.	Lodos activados Biofiltros Filtro anaerobio de flujo ascendente
Terciario	Remover nutrientes como nitrógeno, fósforo, remanentes de sólidos suspendidos (incluyendo DBO ₅).	Humedales construidos Filtros verdes Filtros intermitentes

Fuente: Lee & Shun (2007).

2.2 Tratamientos primarios

Para el tratamiento primario se recomienda la sedimentación primaria: La finalidad del tratamiento de sedimentación es eliminar los sólidos fácilmente sedimentables y el material flotante y, por lo tanto, reducir el contenido de sólidos en suspensión del agua (Tonatiuh, 2019). Los tanques de sedimentación primaria pueden proporcionar el principal grado de tratamiento del agua residual, o se pueden emplear como paso previo al tratamiento posterior cuando se utilizan como único medio de tratamiento, estos tanques sirven para la eliminación de: (1) sólidos

sedimentables capaces de formar depósitos de fangos en las aguas receptoras; (2) aceite libre, grasas, y otras materias flotantes, y (3) parte de la carga orgánica vertida a las aguas receptoras. La sedimentación primaria está cayendo en desuso como único medio de tratamiento. Cuando los tanques de sedimentación primaria se emplean como paso previo de tratamientos biológicos, su función es la reducción de la carga afluente a las unidades de tratamiento biológico. Los sedimentadores bien diseñados con eficiencia eliminan entre el 50 y 70% de los sólidos suspendidos y entre 25 y 40% de la DBO₅.

Tabla 3. Clasificación de tratamientos de aguas residuales.

Tratamiento preliminar	Tratamiento primario	Tratamiento secundario	Tratamiento terciario
Cribado	Sedimentación	Lodos activados	Filtración
Desarenado	Flotación	Lagunas de oxidación o estabilización: anaerobias, facultativas, de maduración.	Precipitación química
Tamizado	Separación de aceites		Coagulación
Neutralización		Filtros percoladores	Adsorción
Homogenización			Intercambio iónico
		Biodiscos	Osmosis inversa
			Oxidación química
		Lagunas aireadas	

Fuente: RAS, 2000.

2.3 Tratamientos secundarios

Los procesos biológicos o tratamientos secundarios se utilizan para convertir la materia orgánica disuelta y finamente dividida en flóculos biológicos sedimentables y en sólidos orgánicos que se puedan eliminar en los fangos de sedimentación. Estos procesos se emplean en la combinación con las operaciones y procesos unitarios que se utilizan para pretratamiento y tratamiento primario del agua residual (Troconis, 2010). Los procesos biológicos son más efectivos en la eliminación de compuestos orgánicos solubles o del tamaño de partículas coloidales. No obstante, algunos procesos como las lagunas aireadas, lagunas de estabilización y

sistemas de aireación prolongada, se proyectan para que funcionen sin sedimentación primaria. Los procesos biológicos de aplicación más comunes son: lodos activados, lagunas aireadas, filtros percoladores, biodiscos y lagunas de estabilización. En plantas de tratamiento de grandes dimensiones se suele adoptar el proceso de lodos activados o alguna de sus muchas variantes, y las lagunas de estabilización se usan principalmente en instalaciones de pequeño tamaño.

2.3.1. Lodos activados

En el tratamiento de aguas residuales, los lodos activados, tanto en su forma original como en alguna de sus muchas variantes, ha tenido un amplio uso. En el diseño del proceso de lodos activados, es necesario tener en cuenta: (1) la elección del tipo de reactor, (2) los criterios de carga, (3) la producción de lodos, (4) las necesidades y transferencia de oxígeno, (5) las necesidades de nutrientes, (6) el control de organismos filamentosos y (7) las características del efluente.

El proceso de lodos activados y sus varias modificaciones pueden ser usados cuando las aguas residuales puedan responder a un tratamiento biológico. Este proceso requiere atención cuidadosa y una operación de supervisión competente, incluido un control rutinario de laboratorio. Los siguientes requisitos deben ser considerados de manera general cuando se proponga este tipo de tratamiento: (1) requisitos de energía, (2) selección específica del proceso, (3) pretratamiento, (4) tanque de aireación y (5) tanque de sedimentación secundaria.

2.3.2. Filtros percoladores

Un filtro percolador consiste en un tanque que contiene un lecho de material grueso, compuesto en la gran mayoría de los casos de materiales sintéticos o piedras de diversas formas, de alta relación área/volumen, sobre el cual son aplicadas las aguas residuales por medio de brazos distribuidores fijos o móviles. Alrededor de este lecho se encuentra adherida una población bacterial que descompone las aguas residuales a medida que estas percolan hacia el fondo del tanque. Después de cierto tiempo, la capa bacterial adquiere un gran espesor y se

desprende hidráulicamente del lecho de piedras para pasar luego a un clarificador secundario en donde se efectúa la separación de los lodos formados.

Los filtros percoladores han sido utilizados para el tratamiento biológico del agua residual durante casi 100 años. Los filtros percoladores modernos están formados por un lecho de medio filtrante sobre el que se distribuye continuamente el agua residual.

Algunas características de diseño para los diferentes tipos de filtros percoladores son: (1) medio filtrante, (2) carga hidráulica, (3) carga orgánica, (4) tasa de recirculación, (5) eficiencia de remoción de DBO_5 , (6) efluente y (7) desprendimiento.

2.3.3. Lagunas aireadas

Una laguna aireada es un depósito en el que el agua residual se trata en la modalidad de flujo continuo con o sin recirculación de sólidos. Al igual que en otros sistemas de cultivo en suspensión, la turbulencia creada por los sistemas de aireación se utiliza para mantener en suspensión el contenido del depósito.

Dependiendo del tiempo de retención, el efluente de una laguna aireada puede contener entre un tercio y la mitad de la DBO_5 afluente, en forma de tejido celular. La mayor parte de estos sólidos se debe eliminar por sedimentación antes de la descarga del efluente (un tanque de sedimentación o un estanque suele ser elementos habituales en la mayoría de los sistemas de lagunas). Si se realiza una recirculación de sólidos a la laguna, el proceso no presenta diferencia alguna con un proceso de lodos activados modificado.

Los factores que hay que tener en cuenta en el diseño de lagunas aireadas son: (1) eliminación de DBO_5 , (2) características del efluente, (3) demanda de oxígeno, (4) efecto de la temperatura, (5) demanda energética para el mezclado y (6) separación de sólidos.

2.3.4. Lagunas de oxidación o estabilización

Una laguna de estabilización es una masa de agua relativamente poco profunda contenida en un estanque excavado en el terreno. Las lagunas de estabilización son de uso muy frecuente en

pequeñas comunidades, debido a que sus reducidos costes de construcción y explotación representan una importante ventaja frente a los demás sistemas de tratamiento.

El uso de lagunas de estabilización para el tratamiento de aguas residuales industriales y mezclas de aguas residuales domésticas e industriales susceptibles de tratamiento biológico también está muy extendido. Este tipo de instalaciones también se utilizan en industrias tales como refinerías de petróleo, plantas de beneficio animal (conocidas comúnmente como mataderos) y lecherías.

Las lagunas de estabilización se suelen clasificar en función de la naturaleza de la actividad biológica que tiene lugar: aerobia, anaerobia, o aerobia-anaerobia. También se han seguido otros esquemas de clasificación, en función del tipo de afluente (agua residual bruta, tamizada, sedimentada o si se trata de un efluente de un proceso de lodos activados), en función de las condiciones de salida del efluente del tanque (inexistente, intermitente o continua), y en función del método de oxigenación (fotosíntesis, reaeración superficial atmosférica, o aireadores mecánicos).

Las lagunas de estabilización se han utilizado, en unidades independientes o en forma de combinaciones de unidades, para el tratamiento tanto de aguas residuales domésticas como industriales. La principal aplicación de las lagunas de estabilización es el tratamiento de residuos orgánicos solubles efluentes de plantas de tratamiento. Las lagunas anaerobias-aerobias son las más frecuentes y se emplean en el tratamiento de aguas residuales domésticas y de una gran variedad de residuos industriales. Las lagunas anaerobias son especialmente eficaces en la rápida estabilización de residuos con grandes concentraciones de materia orgánica. Normalmente, las lagunas anaerobias-aerobias son especialmente eficaces en la rápida estabilización de residuos de grandes concentraciones de materia orgánica. Normalmente, las lagunas anaerobias se conectan en serie con lagunas aerobias-anaerobias para conseguir un tratamiento completo.

El tratamiento por lagunas de estabilización puede ser aplicable en los casos en los cuales la biomasa de algas y los nutrientes que se descargan en el efluente pueden ser asimilados sin problema por el cuerpo receptor.

En caso de que las algas descargadas al cuerpo receptor no puedan sobrevivir en él, generando una demanda de oxígeno adicional que impida cumplir con los objetivos de calidad

estipulados, debe incluirse en el proyecto la remoción de éstas en el efluente final antes de ser descargado.

En los niveles bajo, medio y medio-alto de complejidad debe siempre considerarse las lagunas de estabilización dentro de la evaluación de alternativas que se realiza para la selección del sistema de tratamiento.

Importante considerar que la ubicación del sitio para un sistema de lagunas debe estar aguas debajo de la cuenca hidrográfica, en un área extensa y fuera de la influencia de cauces sujetos a inundaciones y avenidas. En el caso de no ser posible, debe proyectarse obras de proyección, el área debe estar alejada de urbanizaciones con viviendas ya existentes.

2.3.5. Biodiscos

Conocidos comúnmente como contactores biológicos rotativos (RBC, por sus siglas en inglés). El 70% de los sistemas de biodiscos instalados se emplean únicamente para la eliminación de DBO carbonácea, el 25% combinan la eliminación de la DBO con nitrificación y el 5% se emplean para la nitrificación de efluentes de tratamientos secundarios.

Los biodiscos presentan numerosas ventajas en comparación con otros sistemas de tratamiento biológico: (1) no existen problemas de ruido; (2) puede eliminarse la sedimentación primaria, lo cual no afecta la capacidad de remoción de la DBO₅; (3) se eliminan moscas y malos olores; (4) se recuperan más rápido de la entrada de tóxicos al proceso que cualquier otro proceso biológico (lodos, filtros, RAFA, etc.); (5) no se necesita equipo de retrolavado, porque la rotación de los discos sumergidos en el agua residual elimina el exceso de biomasa que se adhiere a los discos; (6) las ampliaciones del sistema pueden hacerse fácilmente porque nuevos módulos de biodisco pueden añadirse con facilidad, así pueden solucionarse problemas de sobrecarga del sistema, aunque no se hayan planificado las expansiones; (7) no presenta el problema de formación de espumas durante el tratamiento de desechos que contienen surfactantes; (8) el requerimiento de área de tratamiento es menor, lo que constituye la ventaja principal del biodisco respecto a los demás sistemas de tratamiento biológico, en los que en muchos casos se requiere grandes extensiones para el tratamiento (Deloya, 2020).

3. Estado del arte

González, Cabrera y Junco (2005) describen su investigación la aplicación de los principios de la sostenibilidad al turismo, teniendo en cuenta una de las actividades más importantes dentro de la economía mundial actual y que las modalidades de disfrute en áreas naturales son las que mayor crecimiento presentan, demanda la existencia de un conjunto de indicadores, los cuales permitan preservar el entorno en ecosistemas caracterizados por una alta fragilidad. En ese trabajo, a partir de definir el término indicadores de sostenibilidad, se propone una nueva metodología para determinar los mismos. Específicamente se desarrolla la metodología diseñada para determinar los indicadores que garanticen la sostenibilidad del tratamiento eficiente de las aguas residuales en zonas costeras dedicadas al turismo y que al mismo tiempo contribuyen a la sostenibilidad de la actividad turística en el territorio. Se toma como referencia el polo turístico de Varadero (Cuba) teniendo en cuenta la importancia e incidencia en la economía nacional. Como resultado se obtienen indicadores cuya medición periódica y sistemática facilitará la evaluación ambiental y permitirá un adecuado manejo, en forma sostenible, del tratamiento de los residuales en el polo turístico y que podrán ser extensivos a otras zonas turísticas costeras con características similares.

López *et al.* (2014) en su investigación sobre el sistema experto para el tratamiento de aguas residuales (SECTRARES) en Cuba nos muestran la importancia vital del tratamiento de las aguas residuales, ya que estos eliminan gran parte de la contaminación de las mismas y contribuye con la protección del medio ambiente. En tal sentido resulta necesario llevar la experiencia adquirida por los especialistas a distintas empresas del territorio, provincia y el país. Esta metodología consta en utilizar las Redes Neuronales Artificiales (RNA) para predecir el tipo de tratamiento que se debe aplicar; como resultado se evidencia la posibilidad al usuario de dar un solo fichero y en ese caso seleccionar las muestras de aprendizaje y control a partir de un umbral con el 70% de los datos como muestra de aprendizaje.

Acuña (2015) muestra como la falta de normativas específicas que regulen el manejo de las aguas residuales originadas en las plantas de tratamiento de agua potable del país da lugar a prácticas cuestionables como las descargas a cauces naturales. Las descargas de aguas residuales

del tratamiento de agua potable no forman parte de la norma de descarga de efluentes líquidos a cuerpos de agua superficiales en Chile (D.S. N°90/2000). Esta falta de tratamiento provoca problemas ambientales, como embancamientos en el cauce. La ausencia de un control de las características y parámetros que deben ser reducidos en estas aguas es consecuencia de la falta de normativas que regulen su manejo, lo cual constituye un riesgo para la salud de la comunidad y su entorno. El objetivo es definir los procesos y las unidades que deben componer el tratamiento de las aguas residuales producidas. El propósito del estudio involucra la caracterización de las aguas residuales y la definición de los parámetros relevantes a reducir. Por otra parte, se busca recopilar los procesos de tratamiento que se utilizan en Chile para las aguas residuales de las plantas de agua potable y contrastarlo con las situaciones en aquellos países que han regulado el manejo de estas aguas en sus plantas. Para ello se realizó una revisión bibliográfica y recopilación de antecedentes para caracterizar las aguas residuales; se revisó la base de infraestructura de las plantas de tratamiento de agua potable de Chile para conocer si se provee algún tratamiento a las aguas residuales, y se revisaron normativas y estudios de países en los cuales se ha regulado el tema y los estándares que contemplan. Finalmente se define el tratamiento o el manejo de un agua residual de acuerdo a sus características.

Meoña, González y Morales (2016) muestran que la población de América Latina se encuentra concentrada en ciudades en más de un 80%. Sin embargo, la provisión de agua es insuficiente. Más aun, el 70% de las aguas residuales no tienen tratamiento, lo cual dificulta alcanzar el ciclo del agua, particularmente por el reusó del agua debido a su contaminación. En Perú, solamente se ha ejecutado el 30% de la inversión pública en tratamiento de agua, de acuerdo al Plan Nacional de Saneamiento Urbano y Rural 2006-2015. La contaminación ocurre a niveles primario, secundario y terciario de las fuentes de agua. Las sustancias que contaminan el agua son orgánicas e inorgánicas. En todos los casos, la contaminación del agua pone a la salud pública en peligro, de acuerdo a la Organización Mundial de la Salud (OMS). Una preocupación es la contaminación del agua que proviene de la presencia de altos niveles de arsénico inorgánico, plomo y cadmio por las consecuencias negativas tales como cáncer, diabetes mellitus, y enfermedades cardiovasculares. En el caso de los distritos de Lima, La Oroya y Juliaca, el rango de la concentración de arsénico inorgánico fue de 13 a 193 microgramos por litro para las aguas

subterráneas y superficiales, más alto que el límite de 10 microgramos por litro según lo recomendado por la OMS.

Peña, Mayorga y Montoya (2018) mencionan que, dentro de los procesos biológicos de tratamiento de aguas residuales, se destaca el de lagunas de estabilización por la amplia experiencia del uso de esta tecnología en los países latinoamericanos, además de su sencillez y su bajo costo inicial y de operación, y mínima capacitación del personal encargado de su funcionamiento. En este estudio se dimensiona una planta de tratamiento de aguas residuales para la ciudad de Yaguachi (Ecuador), que incluye cuatro (4) lagunas facultativas y ocho (8) lagunas de maduración. Como resultado se evidencia la reducción de la carga contaminante de 82 % para la DBO₅ y 99.99 % para los coliformes. El tamaño total de las lagunas es comparable al de sistemas similares en funcionamiento en varios países de Latinoamérica.

Wills *et al.* (2010) en su propuesta metodológica para la evaluación de sistemas de tratamiento de aguas residuales doméstica en el sitio de origen proponen un método el cual permite establecer de manera representativa su desempeño, asegurando, por medio de la instalación de dos (2) unidades de homogeneización, que todas las cargas contaminantes generadas en la vivienda estarán presentes en la muestra compuesta por analizar en el laboratorio. Dicha metodología arroja una propuesta para la evaluación hidráulica y técnica de sistemas de tratamiento en el origen y permite un acercamiento representativo a la calidad y a la generación de las aguas residuales en la vivienda y de su evolución a través de las unidades de tratamiento, contrario a los resultados que se pueden obtener con los métodos tradicionales. Las autoridades ambientales pueden estudiar y poner a consideración de los diferentes fabricantes de sistemas de tratamiento de aguas residuales en el origen la aplicación de la metodología propuesta. La aplicación de esta permitirá determinar el desempeño y, con base en este, avalar o no su uso masivo o cuando sea factible.

Rodríguez, García y Pardo (2015) realizaron una investigación para la selección de las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales en países en vía de desarrollo. Para la selección se deben considerar la composición típica del agua residual cruda, la eficiencia de remoción de contaminantes por tipo de tecnología, indicadores de desempeño por tecnología, aspectos ambientales sobre localización y la estrategia espacial para la localización. El artículo presenta la metodología desarrollada por los autores construida con base en los aspectos técnicos,

económicos y ambientales, como una herramienta para la toma de decisiones de inversiones futuras en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales.

Mendoza, Castro y Marín (2016) implementaron un sistema de fitorremediación a escala de laboratorio como alternativa de tratamiento para aguas residuales de la ciudad de Riohacha (Colombia), integrado por seis (6) unidades operadas a flujo semicontinuo y con un tiempo de retención hidráulico (TRH) de siete (7) días. Tres (3) unidades fueron provistas de plantas de *Eichhornia crassipes*, mientras que las tres (3) restantes sirvieron como control (sin plantas). Durante los ensayos se aplicaron tasas de renovación del efluente de 25, 50 y 75%, y se monitorearon los parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos siguientes: pH, oxígeno disuelto, amonio, ortofosfato, DQO, DBO₅, coliformes totales y fecales. Los resultados muestran que la calidad del efluente tratado cumple en su mayoría con los límites máximos permisibles establecidos en la legislación colombiana, obteniéndose la mejor eficiencia del sistema al aplicar tasas de renovación de 75% en las unidades con plantas, para porcentajes de remoción de 99,9% de amonio, 93,1% de ortofosfato, 93,9% de materia orgánica como DQO y 91,6% como DBO₅, y 99,9% de coliformes totales y fecales. Por lo anterior, la fitorremediación es una alternativa eficiente y viable para el tratamiento de las aguas residuales domésticas de la ciudad de Riohacha, requiriéndose sólo de un postratamiento de desinfección para eliminar los patógenos remanentes.

Finalmente, Vargas *et al.* (2020) presentan una revisión bibliográfica mediante la cual integran, examinan y analizan los diferentes sistemas de tratamiento de agua residual doméstica empleados en Colombia; con el objeto de identificar la evolución que han tenido estas tecnologías y sus posibles alternativas; identificando sus procesos de remoción, costos y la factibilidad en cuanto a la operación. Dentro del análisis, se evidencia que, en Colombia, los tratamientos más usados son los lodos activados, lagunas de estabilización y humedales artificiales. La mayoría de estos tratamientos biológicos alcanzan un 80% de remoción de DBO₅, DQO y SST. Cuando se emplean en conjunto, obtienen eficiencias porcentuales mayores al 90%, resaltando la viabilidad económica de los procesos biológicos, los cuales muestran una mejor rentabilidad económica, funcional y operacional. Como resultado se muestra la necesidad de mejorar los sistemas de tratamiento de aguas residuales existentes en el país, a fin de minimizar la

contaminación en aguas superficiales y subterráneas; ya que solo se está interviniendo alrededor del 30% de las aguas residuales totales, generadas o recibidas por los sistemas de alcantarillado.

4. Metodología

4.1 Sitio de estudio

El sitio de estudio es la zona urbana del municipio de Arboletes. La laguna de oxidación se encuentra ubicada en el barrio Las Marías. Las Figuras 2 a 6 muestran el estado físico de la laguna de oxidación.

Figura 2. Entrada a la laguna de oxidación.



Figura 3. Estado físico de la laguna de oxidación.

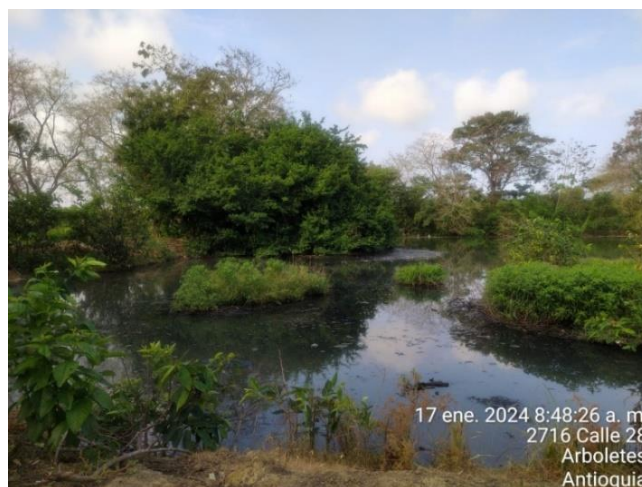


Figura 4. Estructuras de la laguna de oxidación.



Figura 5. Cerco de la estructura de la laguna de oxidación.



El municipio de Arboletes no cuenta con Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos (PSMV) a la fecha y de acuerdo a información suministrada por CORPOURABÁ, la empresa

A.A.S.S.A. E.S.P. presentó un documento del PSMV de Arboletes 2022-2041, el cual fue evaluado ante esta autoridad ambiental; sin embargo, no fue aprobado porque:

“requiere ser complementado y ajustado a la realidad del saneamiento básico del municipio de Arboletes el cual debe contener programas, actividades y/o proyectos acordes con la necesidad de lograr el 100% del tratamiento de las aguas residuales urbanas”.

Figura 6. Cauce del río Volcán.



También se menciona:

“Cabe destacar que en reiteradas reuniones realizadas con el operador del servicio de alcantarillado A.A.S.S.A. E.S.P., y la Administración Municipal, se ha manifestado que existen viviendas que no se han querido conectar a la red sanitaria existente construida entre los años 2015 a 2018, y continúan vertiendo a las redes antiguas o de aguas lluvias, soportando que las cotas de nivel de las redes no están acordes con las alturas de las viviendas, por lo cual tendrían que desarrollar un trabajo interno en los hogares para que les dé la conexión como es el caso del sector Hawaii.

Sin embargo, en los seguimientos realizados por CORPOURABÁ se han observan problemas con los aliviaderos del sistema de bombeo, ejemplo de esto el aliviadero existente en el sector Los Cocheros en el Puente San Isidro, el cual vierte constantemente, aun sin estar en periodo de lluvias, cuando técnicamente el principio

de operación de un aliviadero es dividir el caudal combinado de aguas lluvias y aguas residuales a drenajes que usualmente son naturales y de esta manera permitir que las aguas residuales sean los que continúen por el sistema o lleguen a hasta la planta de tratamiento.

Finalmente, CORPOURBÁ requiere la actualización del documento PSMV, el cual debe contener programas, actividades y/o proyectos acordes con la necesidad de eliminar los puntos de descarga que no están conectados al sistema de aguas residuales, lograr el saneamiento básico del área urbana y obtener el respectivo permiso de vertimientos”.

4.2 Determinación de variables técnicas

Para seleccionar la mejor alternativa para el tratamiento de aguas residuales en la zona urbana del municipio de Arboletes se tendrán en cuenta criterios de evaluación y las unidades convenientes para el caso del municipio, contemplados en la metodología Saaty.

Se utiliza la matriz Saaty, a partir de la selección de variables técnicas notablemente importantes en las etapas de un tratamiento de aguas residuales, como: (1) caudal; (2) carga orgánica; (3) seguridad física; (4) generación de olores, ruidos y espumas; (5) eficiencia de remoción; (6) costos; (7) disponibilidad de extensión/área de terreno constructivo; (8) topografía; (9) población; (10) características del suelo y, 11) estudios hidrogeológicos.

Cada una de estas variables se califican respecto a las otras, que serían criterios de entrada para la matriz Saaty, a partir de categorías de respuesta, así: a) igualmente importante, b) ligeramente más importante, c) bastante más importante, d) considerablemente más importante o absolutamente más importante.

Por lo tanto, se evaluará criterio por criterio hasta tener los coeficientes del promedio de cada calificación correspondiente, a partir del uso de la matriz. En la Tabla 4 se establecen los coeficientes o peso promedio para cada una de los 11 criterios seleccionados anteriormente, según el análisis de un profesional. Estos valores son importantes para la alternativa de tratamiento de aguas residuales.

Tabla 4. Ponderación por criterio.

Criterios	Procedimiento 1	Procedimiento 2	Peso Promedio
Caudal	0,11	0,12	0,12
Carga orgánica	0,12	0,12	0,12
Seguridad física	0,07	0,07	0,07
Generación de olores, ruidos y espumas	0,10	0,09	0,09
Eficiencia de remoción	0,14	0,14	0,14
Costos	0,08	0,07	0,08
Disponibilidad de extensión/área de terreno constructivo	0,06	0,05	0,05
Topografía	0,10	0,10	0,10
Población	0,06	0,06	0,06
Características del suelo	0,08	0,09	0,08
Estudios hidrogeológicos	0,08	0,09	0,08

Fuente: Matriz Saaty.

Teniendo en cuenta que la laguna de oxidación de la zona urbana del municipio de Arboletes no funciona de manera óptima, se presentan las siguientes alternativas a analizar y evaluar:

- 1) Rejillas de cribado – Sedimentadores – Filtros percoladores (**Alt – I**)
- 2) Rejillas de cribado – Sedimentadores – Biodiscos (**Alt – II**)
- 3) Rejillas de cribado – Sedimentadores – Laguna de estabilización (**Alt – III**)
- 4) Rejillas de cribado – Sedimentadores – Laguna de aireación (**Alt – IV**)
- 5) Rejillas de cribado – Sedimentadores – Lodos activados (**Alt – V**)

Cada una de las alternativas cuenta con un tratamiento preliminar, primario y secundario, partiendo de que es necesario la separación de los grandes sólidos, luego de los materiales sedimentables y finalizando con un tratamiento biológico para la disminución de la materia orgánica biodegradable.

5. Resultados y análisis

Los resultados de la evaluación se resumen en la Tabla 5; es notable que, la alternativa de tratamiento de aguas residuales que fue elegida más veces por los profesionales evaluadores fue la laguna de oxidación o de estabilización. De los cinco profesionales evaluadores, tres eligieron esta alternativa como la más adecuada para el municipio de Arboletes, dado las características y necesidades descritas a lo largo del documento.

Cabe anotar que la alternativa filtros percoladores fue elegida dos veces, es decir, por los evaluadores restantes, como siguiente mejor alternativa para el tratamiento de aguas residuales en Arboletes. Los resultados completos de la evaluación se pueden revisar en el Anexo.

Tabla 5. Resultado de evaluación de profesionales.

Alternativas	Profesional 1: Alexander Castro	Profesional 2: Camilo Muñoz	Profesional 3: Felipe Arbeláez	Profesional 4: Daniela Lemos	Profesional 5: Yessica Rodríguez
Alt - I	3.69	3.04	4.21	2.53	1,73
Alt - II	3.61	4.70	4.31	2.22	1,85
Alt - III	4.57	3.44	3.80	3.86	3,36
Alt - IV	4.47	3.98	3.80	3.29	2,31
Alt - V	4.47	4.26	4.05	3.79	2,47

Los biodiscos (RBC) son un sistema de tratamiento aerobio de aguas residuales donde el crecimiento biológico se desarrolla en la zona de nivel de líquido; es decir, en la fase de inmersión los microorganismos se alimentan de la materia orgánica que se encuentra en el agua, mientras que el giro del rotor y la biopelícula bacteriana, a medida de un tiempo de contacto óptimo estos degradan la carga contaminante, contribuyendo a la disminución de las concentraciones de los parámetros de calidad de agua en el efluente final. Dado que es un proceso aerobio, la cantidad de aire captado durante la exposición a la atmósfera del rotor debe ser suficiente para el consumo de oxígeno de la actividad bacteriana, debido a que el 90% de la biopelícula se encuentra adherida al rotor (Ortega de Miguel *et al.*, 2010).

El porcentaje de remoción de esta unidad, que, por lo general trata de tres etapas, depende de los parámetros que se analicen, siendo el nitrógeno y el fósforo los contaminantes que presentan una menor reducción de su carga luego de que el influente haga contacto con los biodiscos, pero hay posibilidades de nitrificación y desnitrificación del efluente. Los sólidos suspendidos totales, la DQO y la DBO₅ presentan una reducción de hasta 95%. Cabe mencionar que la aplicación de biodiscos disminuye su efectividad si el rango de habitantes equivalentes supera los 2.000 (Ortega de Miguel *et al.*, 2010), debido a que el influente tendría mayor caudal, mayor carga y el tiempo de contacto entre la biopelícula y el agua a tratar no es suficiente, afectando la degradación de los contaminantes por parte de las bacterias. Además, la operatividad y eficiencia de los biodiscos es afectada si el agua a tratar tiene elevadas concentraciones de grasas, por lo que se debe tener en cuenta un tratamiento primario para esto.

Si bien los discos biológicos rotativos presentan amplias ventajas en relación a la operatividad; cuenta con costes elevados de los equipos, por lo que la inversión en el sistema de tratamiento es elevada; la poca flexibilización a diferentes condiciones de diseño, debido a la alteración de su eficiencia por la existencia de alta carga contaminante; y la pérdida de biomasa por las rotaciones que realiza (Arichábala, 2023; Menéndez & Dueñas, 2020). Entonces, en Arboletes, en términos de presupuesto no se podría aplicar esta nueva tecnología, conociendo los costos elevados de adquisición de los equipos y de mantenimiento, además de que de la carga orgánica por habitante puede ser mayor a las condiciones de diseño.

Los filtros percoladores son biorreactores de crecimiento asistido, que tiene una capa permeable de biomasa (microorganismos) donde los microorganismos eliminan la mayor parte de la materia orgánica y el agua tratada se dirige, por medio de gravedad, hacia la parte de abajo del reactor para su posterior proceso en otra unidad. El efecto de remoción de este reactor varía entre 80 y- 90% de la DBO₅, y generalmente se acompaña con un proceso de lodos activados (Carvajal, 2020). En el contexto de Arboletes, y teniendo de referencia las evaluaciones por parte de los profesionales, este sistema no fue seleccionado debido a que se debe adecuar un espacio considerable para instalar el reactor, además de adecuar e invertir en ductos que permitan la entrada y salida de las aguas tratadas en un espacio distinto al que tiene el municipio. Por otro lado, dado que el filtro percolador requiere, en muchas ocasiones, otra unidad de tratamiento para

la disminución de las concentraciones de otros parámetros, se hace menos factible económicamente.

Una laguna de aireación es un estanque que varía en profundidad entre 2 a 5 m, con aireación mecánica por medio de difusores con el objetivo de administrar oxígeno a las bacterias que están presentes en el agua residual. Estas lagunas se optan cuando el agua tratada tiene pocos sólidos en suspensión, debido a que facilita la oxidación biológica de las aguas por medio de las bacterias. La laguna de aireación se implementa cuando la cantidad de oxígeno que es suministrada de forma natural no es suficiente para la oxidación de la materia orgánica (Alviz & Cueto, 2012). En el municipio de Arboletes hay un espacio de laguna con aireación natural, pero para la instalación de los dispersores es necesario adecuar las condiciones de diseño de la laguna de oxidación que está fuera de funcionamiento, por lo que sería un proyecto nuevo con un presupuesto para implementación.

Los lodos activados son un proceso que corresponde al tratamiento secundario o biológico de las aguas residuales, que depende de la actividad metabólica de las comunidades microbianas (Díaz Ruiz *et al.*, 2022), en donde la edad de los lodos y el tiempo de retención hidráulica son parámetros de diseño fundamentales en el proceso de degradación de la materia orgánica. En relación a la edad de los lodos, corresponde al tiempo promedio que los microorganismos permanecen en el reactor antes de ser retirados, por lo que el tiempo máximo es de 30 días y el tiempo de retención hidráulico suele ser de 8 horas, para que la relación alimento por unidad de biomasa no presenten relaciones bajas (Arcos, 2013). Cabe mencionar que los lodos activados no son una alternativa pertinente si no se cuentan con otras unidades de tratamiento como el sistema de aireación y el tanque de sedimentación secundaria, necesario debido al crecimiento microbiano generado en el proceso de degradación de materia orgánica. En ese sentido, para Arboletes los profesionales no seleccionaron la aplicación de los lodos activados debido a que requiere otro tipo de procesos y por la supervisión constante del control de olores y análisis rutinario de laboratorio que, de alguna u otra forma, para el municipio, serían gastos económicos considerables.

Las lagunas de estabilización o también denominadas de oxidación funcionan a partir de un sistema abierto de lagunaje, en donde las microalgas y algunas bacterias que se agrupan en el fitoplancton proveen oxígeno al sistema. Esta alternativa requiere de grandes áreas para su

efectividad en términos de remoción de la carga orgánica, con un tiempo de retención de 20 a 30 días, además que depende totalmente de factores como el grado de mezcla de la laguna, pH y temperatura. La laguna de estabilización es el método más simple para el tratamiento de aguas residuales y cuenta con eficiencia de remoción de hasta 80% de la DBO₅ y casi del 99% de los coliformes fecales. En el caso de la DQO la remoción se acerca al 60% (Echavarría, 2008).

En Arboletes existe una laguna de oxidación aerobia, pero, por falta de mantenimiento y de monitoreo constante está fuera de funcionamiento. Entonces, a partir de las evaluaciones de los profesionales, se tiene que la mejor alternativa es una laguna de estabilización, por lo que la opción viable para el municipio corresponde al mantenimiento de la laguna que está actualmente en el espacio para el tratamiento de aguas residuales, para que pueda seguir en funcionamiento, pero con un plan de monitoreo periódico para evitar la colmatación y eutroficación de la misma.

6. Conclusiones y recomendaciones

6.1 Conclusión

De acuerdo a la evaluación realizada por los profesionales, la alternativa de tratamiento de aguas residuales más adecuada en cuanto a aspectos técnicos como: caudal, carga orgánica, seguridad física, generación de olores, ruidos y espumas, eficiencia de remoción, costos, disponibilidad de extensión o área de terreno constructivo, topografía, población, características del suelo y estudios hidrogeológicos es la Alternativa III, compuesta por los siguientes unidades: rejillas de cribado, sedimentadores y laguna de estabilización. De la evaluación de cinco (5) ingenieros, tres (3) seleccionaron esta alternativa.

6.2 Recomendaciones

- Se sugiere a las entidades encargadas de la operación de la actual laguna de estabilización, adelantar acciones para realizar los mantenimientos adecuados al sistema: realizar el cerco perimetral del mismo, de tal manera que se impida el ingreso directo de terceros al sitio de tratamiento de aguas residuales de la zona urbana del municipio; realizar la siembra alrededor de la laguna de plantas que dispersen los malos olores, dado que en épocas de reboses de la laguna los olores afectan a la población asentada a los alrededores; adecuar o cambiar las rejillas que impiden el paso de sólidos de gran tamaño a la laguna y disponer de manera adecuada el lodo generado en su operación.
- Se recomienda a las entidades involucradas en la prestación del servicio de alcantarillado priorizar la formulación del Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos (PSMV), el cual no se le ha realizado los ajustes técnicos exigidos por la Autoridad Ambiental competente para su posterior aprobación. Este plan contempla la eliminación de puntos de descarga directa a los ríos y a caños o quebradas, así como proyectos para mejorar el saneamiento básico.

- Tener en cuenta que la población del municipio de Arboletes se encuentra en crecimiento y que es necesario priorizar zonas donde se pueda ampliar el sitio de tratamiento de aguas residuales.
- En los momentos en que el municipio se prioricen proyectos enfocados al sistema de alcantarillado, remitirse al Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS), a las guías para la presentación de proyectos de la Gerencia de Servicios Públicos de la Gobernación de Antioquia y a las Guías del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio.
- El municipio de Arboletes cuenta con convenio de vinculación al Plan Departamental de Agua ante el ente gestor del PDA – Gerencia de Servicios Públicos del Departamento de Antioquia desde el 02 de junio de 2008 mediante el convenio 09-CF-37-PDA-006, vinculación que sirve para mejorar las condiciones del sistema de alcantarillado del municipio y del tratamiento de las aguas residuales de la zona urbana.

Referencias

- Acueductos y Alcantarillados Sostenibles S.A. . (2014). Sistema de alcantarillado. En A. y. S.A., Elaboración de los estudios y diseños de los Planes Maestros de Acueducto y Alcantarillado en las zonas urbanas de los Municipios del Departamento de Antioquia Resumen Ejecutivo (págs. 59-70). Medellín : Acueductos y Alcantarillados Sostenibles S.A.
- Alcaldía de Arboletes. (2020). Plan de Desarrollo del Municipio de Arboletes 2020 - 2023.
- Alviz, A., & Cueto, D. (2012). Diseño de un sistema de aireación para una planta de lodos activados en zofranca Mamonal. Universidad de Cartagena.
- Arcos, Y. (2014). Microbiología de lodos activados. Hechos Microbiológicos, 4(2).
- Arichábalá, E. (2020). Diseño y evaluación de un reactor de contactores biológicos rotativos (biodiscos) a escala para el tratamiento de aguas residuales de la Central Termica El Descanso. Universidad Politécnica Salesiana .
- Carvajal, C. (2020). Modelo para comparar diseños de filtro percolador. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- CORPOURABÁ. (2006). Establecimiento de los objetivos de calidad requerimiento de los Planes de Saneamiento y Manejo de Vertimientos (PSMV) a las entidades prestadoras del servicio de alcantarillado de la jurisdicción de CORPOURABÁ.
- CORPOURABÁ. (2024). Actualización Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos del Área Urbana de Arboletes.
- Deloya, A. (2001). Biodiscos: Una alternativa de tratamiento biológico para aguas residuales cuando no se dispone de grandes extensiones de terreno. Tecnología En Marcha, 13(4).
- Departamento Administrativo de Planeación de Antioquia. (2020). Arboletes.
- Díaz, E., Alvarado, A., & Camacho, K. (2012). El tratamiento de agua residual doméstica para el desarrollo local sostenible: el caso de la técnica del sistema unitario de tratamiento de aguas, nutrientes y energía (SUTRANE) en San Miguel Almaya, México. Quivera, 14(1), 78–97.
- Díaz Ruíz, A., Arenas Taborda, A., Hoyos Bastidas, O., Ramírez, D., Niño García, J., & García Cháves, M. (2023). Dinámica funcional de la comunidad bacteriana del lodo activado de una

- planta de tratamiento de agua residual y su relación con variables ambientales y de operación. *Rev. Colomb. Biotecnol*, 24(2), 26-35.
- Echavarría, J. C. (2008). Lagunas de estabilización como sistema de tratamiento de aguas residuales. *Politecnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid*.
- Gerencia de Servicios Públicos de la Gobernación de Antioquia. (2024). Solicitud de información . Medellín: Gobernación de Antioquia.
- Giraldo, J. (2004). Herramienta matriz Saaty.
- Gobernación de Antioquia, & Universidad de Antioquia. (2012). Diagnóstico Técnico - Municipio de Arboletes (Antioquia).
- Google Earth (2024). <https://www.google.com/earth>
- González, C. (2023). Tratamiento de Aguas, Especialización en Manejo y Gestión del Agua. Medellín: Universidad de Antioquia.
- Hernandez, F., & Margni, M. (2017). Assessing wastewater treatment in Latin America and the Caribbean: Enhancing life cycle assessment interpretation by regionalization and impact assessment sensibility. *Journal of Cleaner Production*, 142(4), 2140-2153.
- Lee C.C., & Shun Dar Lin. (2007). *Handbook of Environmental Engineering Calculations* (Mc Graw-Hill Education, Ed.; 2nd ed.).
- Menéndez, C., & Dueñas, J. (2020). Criterios de diseño y escalado de biodiscos para el tratamiento de aguas residuales. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 41(2), 64–74.
- Metcalf & Eddy. (2015). *Ingeniería de Aguas Residuales: Tratamiento, vertido y reutilización*. En Segunda Edición. México: McGraw Hill.
- Ministerio de Desarrollo Económica. (2000). Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS). Título E: Tratamiento de aguas residuales.
- Mora, A. (2022). Evaluación del uso de lodo de un proceso de potabilización convencional, en el . Medellín : Universidad de Antioquia.
- Ortega de Miguel, E., Ferrer Medina, Y., Salas Rodríguez, J. J., Aragón Cruz, C., & Real Jiménez, Á. (2010). Manual para la implantación de sistemas de depuración en pequeñas poblaciones.
- Secretaría Seccional de Salud y Protección Social de Antioquia. (2021). Análisis de la situación de salud, actualización 2021. Medellín: Gobernación de Antioquia.

Tonatiuh, Z. (2019). Tratamiento de aguas residuales.

Troconis, A. (2010). Tratamiento de Aguas Residuales (1st ed.). Belzona Inc.

Anexo

Anexo. Resultados de alternativas de tratamiento por profesionales.

Alexander Castro				Asignar un valor de 1 a 5 (de forma horizontal) en cuanto a importancia de la variable frente a la alternativa				
				Filtros percoladores	Biodiscos	Laguna de estabilización	Laguna de aireación	Lodos activados
Variables técnicas	Procedimiento 1	Procedimiento 2	Peso promedio	Alt - I	Alt - I	Alt - III	Alt - IV	Alt - V
Caudal	0.10	0.10	0.10	5.00	5.00	3.00	2.00	2.00
Carga orgánica	0.12	0.12	0.12	5.00	5.00	4.00	4.00	4.00
Seguridad física	0.13	0.13	0.13	2.00	2.00	5.00	5.00	5.00
Generación de olores ruidos y espumas	0.06	0.06	0.06	3.00	3.00	4.00	4.00	4.00
Eficiencia de remoción	0.11	0.12	0.12	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
Costos	0.12	0.13	0.13	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
Disponibilidad de extensión o área de terreno constructivo	0.07	0.07	0.07	3.00	3.00	5.00	5.00	5.00
Topografía	0.09	0.09	0.09	3.00	3.00	5.00	5.00	5.00
Población	0.06	0.05	0.05	3.00	3.00	4.00	4.00	4.00
Características del suelo	0.08	0.08	0.08	3.00	2.00	5.00	5.00	5.00
Estudios hidrogeológicos.	0.05	0.05	0.05	1.00	1.00	5.00	5.00	5.00

Alternativa seleccionada	
Alt - I: Rejillas de cribado – Sedimentadores – Filtros percoladores	3.69
Alt - I: Rejillas de cribado – Sedimentadores – Biodiscos	3.61
Alt - III: Rejillas de cribado – Sedimentadores – Laguna de estabilización	4.57
Alt - IV: Rejillas de cribado – Sedimentadores – Laguna de aireación	4.47
Alt - V: Rejillas de cribado – Sedimentadores – Lodos activados	4.47

Camilo Muñoz				Asignar un valor de 1 a 5 (de forma horizontal) en cuanto a importancia de la variable frente a la alternativa				
				Filtros percoladores	Biodiscos	Laguna de estabilización	Laguna de aireación	Lodos activados
Variables técnicas	Procedimiento 1	Procedimiento 2	Peso promedio	Alt - I	Alt - I	Alt - III	Alt - IV	Alt - V
Caudal	0.19	0.20	0.20	4.00	5.00	3.00	4.00	5.00
Carga orgánica	0.22	0.26	0.24	4.00	5.00	4.00	4.00	4.00
Seguridad física	0.12	0.12	0.12	2.00	4.00	2.00	3.00	4.00
Generación de olores ruidos y espumas	0.12	0.11	0.11	1.00	5.00	3.00	4.00	4.00
Eficiencia de remoción	0.11	0.12	0.12	3.00	5.00	4.00	5.00	5.00
Costos	0.06	0.05	0.05	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
Disponibilidad de extensión o área de terreno constructivo	0.08	0.06	0.07	2.00	5.00	4.00	4.00	4.00
Topografía	0.03	0.03	0.03	3.00	4.00	3.00	3.00	3.00
Población	0.04	0.03	0.04	2.00	5.00	4.00	4.00	5.00
Características del suelo	0.03	0.02	0.02	2.00	2.00	4.00	4.00	2.00
Estudios hidrogeológicos.	0.01	0.01	0.01	5.00	3.00	5.00	5.00	3.00

Alternativa seleccionada	
Alt - I: Rejillas de cribado – Sedimentadores – Filtros percoladores	3.04
Alt - I: Rejillas de cribado – Sedimentadores – Biodiscos	4.70
Alt - III: Rejillas de cribado – Sedimentadores – Laguna de estabilización	3.44
Alt - IV: Rejillas de cribado – Sedimentadores – Laguna de aireación	3.98
Alt - V: Rejillas de cribado – Sedimentadores – Lodos activados	4.26

Felipe Arbeláez				Asignar un valor de 1 a 5 (de forma horizontal) en cuanto a importancia de la variable frente a la alternativa				
				Filtros percoladores	Biodiscos	Laguna de estabilización	Laguna de aireación	Lodos activados
Variables técnicas	Procedimiento 1	Procedimiento 2	Peso promedio	Alt - I	Alt - I	Alt - III	Alt - IV	Alt - V
Caudal	0.19	0.20	0.19	5.00	5.00	3.00	3.00	3.00
Carga orgánica	0.19	0.21	0.20	5.00	5.00	3.00	3.00	4.00
Seguridad física	0.06	0.05	0.05	2.00	2.00	1.00	1.00	1.00
Generación de olores ruidos y espumas	0.06	0.06	0.06	3.00	3.00	5.00	5.00	5.00
Eficiencia de remoción	0.05	0.05	0.05	5.00	5.00	4.00	4.00	5.00
Costos	0.17	0.16	0.16	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
Disponibilidad de extensión o área de terreno constructivo	0.12	0.11	0.12	3.00	3.00	5.00	5.00	5.00
Topografía	0.04	0.05	0.04	4.00	4.00	5.00	5.00	5.00
Población	0.07	0.07	0.07	4.00	5.00	3.00	3.00	3.00
Características del suelo	0.03	0.03	0.03	2.00	3.00	5.00	5.00	5.00
Estudios hidrogeológicos.	0.02	0.02	0.02	1.00	1.00	5.00	5.00	5.00

Alternativa seleccionada	
Alt - I: Rejillas de cribado – Sedimentadores – Filtros percoladores	4.21
Alt - I: Rejillas de cribado – Sedimentadores – Biodiscos	4.31
Alt - III: Rejillas de cribado – Sedimentadores – Laguna de estabilización	3.80
Alt - IV: Rejillas de cribado – Sedimentadores – Laguna de aireación	3.80
Alt - V: Rejillas de cribado – Sedimentadores – Lodos activados	4.05

Daniela Lemos				Asignar un valor de 1 a 5 (de forma horizontal) en cuanto a importancia de la variable frente a la alternativa				
				Filtros percoladores	Biodiscos	Laguna de estabilización	Laguna de aireación	Lodos activados
Variables técnicas	Procedimiento 1	Procedimiento 2	Peso promedio	Alt - I	Alt - I	Alt - III	Alt - IV	Alt - V
Caudal	0.17	0.18	0.18	2.00	3.00	5.00	4.00	3.00
Carga orgánica	0.15	0.16	0.15	3.00	2.00	4.00	5.00	2.00
Seguridad física	0.15	0.17	0.16	3.00	4.00	2.00	1.00	5.00
Generación de olores ruidos y espumas	0.13	0.15	0.14	3.00	1.00	3.00	2.00	5.00
Eficiencia de remoción	0.13	0.15	0.14	3.00	2.00	4.00	4.00	5.00
Costos	0.08	0.07	0.08	2.00	1.00	4.00	5.00	3.00
Disponibilidad de extensión o área de terreno constructivo	0.05	0.04	0.05	2.00	1.00	5.00	2.00	3.00
Topografía	0.07	0.05	0.06	1.00	2.00	5.00	3.00	4.00
Población	0.02	0.02	0.02	2.00	2.00	5.00	2.00	3.00
Características del suelo	0.02	0.01	0.02	2.00	2.00	5.00	4.00	3.00
Estudios hidrogeológicos.	0.01	0.01	0.01	2.00	1.00	4.00	5.00	3.00

Alternativa seleccionada	
Alt - I: Rejillas de cribado – Sedimentadores – Filtros percoladores	2.53
Alt - I: Rejillas de cribado – Sedimentadores – Biodiscos	2.22
Alt - III: Rejillas de cribado – Sedimentadores – Laguna de estabilización	3.86
Alt - IV: Rejillas de cribado – Sedimentadores – Laguna de aireación	3.29
Alt - V: Rejillas de cribado – Sedimentadores – Lodos activados	3.79

Yessica Rodríguez

Asignar un valor de 1 a 5 (de forma horizontal) en cuanto a importancia de la variable frente a la alternativa

Variables técnicas	Procedimiento 1	Procedimiento 2	Peso promedio	Filtros percoladores	Biodiscos	Laguna de estabilización	Laguna de aireación	Lodos activados
				Alt - I	Alt - I	Alt - III	Alt - IV	Alt - V
Caudal	0.11	0.12	0.12	1.00	1.00	2.00	5.00	1.00
Carga orgánica	0.12	0.12	0.12	2.00	1.00	4.00	2.00	2.00
Seguridad física	0.07	0.07	0.07	1.00	1.00	3.00	2.00	2.00
Generación de olores ruidos y espumas	0.10	0.09	0.09	2.00	1.00	4.00	1.00	3.00
Eficiencia de remoción	0.14	0.14	0.14	3.00	4.00	3.00	2.00	3.00
Costos	0.08	0.07	0.08	2.00	3.00	5.00	1.00	3.00
Disponibilidad de extensión o área de terreno constructivo	0.06	0.05	0.05	4.00	5.00	3.00	1.00	4.00
Topografía	0.10	0.10	0.10	1.00	1.00	4.00	2.00	2.00
Población	0.06	0.06	0.06	1.00	2.00	3.00	1.00	2.00
Características del suelo	0.08	0.09	0.08	1.00	1.00	5.00	2.00	5.00
Estudios hidrogeológicos.	0.08	0.09	0.08	1.00	1.00	1.00	5.00	1.00

Alternativa seleccionada	
Alt - I: Rejillas de cribado – Sedimentadores – Filtros percoladores	1.73
Alt - I: Rejillas de cribado – Sedimentadores – Biodiscos	1.85
Alt - III: Rejillas de cribado – Sedimentadores – Laguna de estabilización	3.36
Alt - IV: Rejillas de cribado – Sedimentadores – Laguna de aireación	2.31
Alt - V: Rejillas de cribado – Sedimentadores – Lodos activados	2.47