

Evaluación de sistemas de tratamiento del agua lluvia del edificio de la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones de la Universidad Industrial de Santander

Neidy Alejandra Hurtado

Tesis de maestría presentada para optar al título de Magíster en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental

Directora

Daniela Cristina Rey Romero

Ing. Ambiental – MSc Planificación y desarrollo de recursos hidráulicos

Codirector

Edgar Ricardo Oviedo Ocaña

Ing. Sanitario – PhD Ingeniería sanitaria y ambiental

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Maestría Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental

Bucaramanga

2024

Dedicatoria

A mi hermosa Victoria por escogerme como mamá y deslumbrarme con el milagro de la vida, por llenar mi vida de amor y luz, por detener el tiempo con su mirada y su sonrisa, por enseñarme el don de la paciencia, por hacer mis días cortos y mis noches largas. Te amo mi Vito preciosa.

A mi esposo Luis Francisco Caicedo por tener siempre fe en mí y creer en mis destrezas y habilidades, por su apoyo constante e incondicional, por ser mi cómplice y compañero de aventuras. Por enseñarme que el tiempo de Dios es perfecto y que toda la honra y la gloria sea para él.

A mi madre hermosa mi pequeña “Lulu” por su amor y apoyo incondicional, por forjar la mujer que soy hoy en día.

A mi padre Misael que está en el cielo, que siempre quiso ver triunfar a su ingeniera favorita. Padre gracias por haber compartido conmigo tu sabiduría.

Agradecimientos

Quiero expresar mi agradecimiento a la Universidad Industrial de Santander por abrirme las puertas y brindarme la oportunidad de avanzar profesionalmente, al Grupo de Investigación en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental (GPH) por permitirme realizar y culminar este trabajo de investigación con éxito, a mi directora de tesis la Ingeniera Daniela Rey y mi codirector el Ingeniero Ricardo Oviedo por su apoyo incondicional en este proyecto, por compartir su sabiduría y no dejarme vencer por el cansancio y las vicisitudes.

Al profesor José Miguel Benjumea y a Pedro Cavadia por su aporte de datos para el desarrollo de esta investigación.

A Jessica Burgos, Juan Sebastián Rincón y Edwar García por su atenta y efectiva colaboración, durante mi permanencia en el laboratorio y, en general, durante gran parte del montaje y ejecución de este trabajo.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	11
1. Objetivos	15
1.1 Objetivo General	15
1.2 Objetivos Específicos.....	15
2. Marco de referencia	16
2.1 Aprovechamiento del agua lluvia	16
2.2 Calidad del agua lluvia.....	17
2.3 Tecnologías de tratamiento de agua lluvia.....	18
2.4 Análisis multicriterio para la selección de tecnologías de tratamiento.....	19
2.5 Estado del Arte.....	20
3. Metodología	24
3.1 Fase I: Identificación de opciones tecnológicas con potencial para el tratamiento del agua lluvia.	24
3.1.1 Proceso de filtrado de documentos	24
3.1.2 Revisión y análisis de datos	25
3.2 Fase II: Selección de opciones tecnológicas	27
3.3 Fase III: Análisis del desempeño técnico de las tecnologías	31
3.3.1 Selección de parámetros para análisis de calidad del agua.....	31
3.3.2 Montaje y puesta en marcha de los prototipos.....	32
3.3.3 Evaluación del desempeño de la tecnología	35
4. Resultados	38

4.1 Identificación de opciones tecnológicas con potencial para el tratamiento del agua lluvia ...	38
4.1.1 Resultado de filtrado y selección de documentos	38
4.1.2 Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del agua lluvia	39
4.1.2.1. Calidad fisicoquímica del agua lluvia:.....	43
4.1.2.2 Calidad microbiológica del agua lluvia.	47
4.1.3 <i>Caracterización de tecnologías</i>	47
4.1.3.1 Tratamiento Preliminar	49
4.1.3.2 Tratamiento	51
4.1.3.3 Desinfección	56
4.2 Propuesta de trenes de tratamiento para el edificio de E3T	59
4.2.1 <i>Selección de criterios y subcriterios</i>	60
4.2.2 <i>Resultados del AHP</i>	65
4.2.3 <i>Resultados de TOPSIS</i>	67
4.3 Análisis del desempeño técnico de las tecnologías para tratamiento del agua lluvia.....	68
4.3.1 Calidad del agua lluvia captada en el Edificio E3T	68
4.3.2 Evaluación de los prototipos a escala de laboratorio	72
4.3.3 Comparación de calidad del agua lluvia tratada con estándares internacionales.....	78
4.3.4 Propuesta del tren de tratamiento para agua lluvia captada en el edificio E3T	80
5. Conclusiones	82
6. Recomendaciones	85
Referencias Bibliográficas	86

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 <i>Número de documentos seleccionados para la revisión de literatura</i>	26
Tabla 2 <i>Valoración cualitativa de subcriterios administrativos</i>	31
Tabla 3 <i>Parámetros de calidad del agua lluvia captada y/o tratada en instituciones educativas</i>	40
Tabla 4 <i>Caracterización de tecnologías para el tratamiento de agua lluvia</i>	49
Tabla 5 <i>Criterios y subcriterios empleados en la selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales</i>	61
Tabla 6 <i>Criterios y subcriterios de la herramienta de selección de tecnologías de tratamiento de agua lluvia en el edificio E3T</i>	63
Tabla 7 <i>Pesos de criterios y subcriterios obtenidos con AHP</i>	66
Tabla 8 <i>Evaluación de las alternativas de tratamiento del agua lluvia a partir de los subcriterios técnicos, económicos y administrativos</i>	67
Tabla 9 <i>Proximidad relativa y ranking de TOPSIS</i>	68
Tabla 10 <i>Calidad del agua lluvia cruda captada en el edificio E3T de la UIS</i>	71
Tabla 11 <i>Evaluación del desempeño de la membrana de ultrafiltración (UF) y el filtro lento de arena</i>	72
Tabla 12 <i>Resultados de prueba de normalidad Shapiro-Wilk</i>	77
Tabla 13 <i>Resultados de pruebas de comparación de medias entre los efluentes de la membrana de ultrafiltración (MUF) y el filtro lento de arena (FLA)</i>	77
Tabla 14 <i>Normativa internacional para el aprovechamiento de agua lluvia</i>	79

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 <i>Trenes de tratamiento a escala de laboratorio</i>	34
Figura 2 <i>Visualización del filtro lento de arena a escala de laboratorio</i>	35
Figura 3 <i>Caja de inspección en el sitio de muestreo</i>	36
Figura 4 <i>Recipientes para recolección del agua lluvia</i>	37
Figura 5 <i>Distribución de documentos encontrados por año de publicación</i>	39
Figura 6 <i>Frecuencia de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del agua lluvia reportados en los documentos seleccionados</i>	43
Figura 7 <i>Tecnologías para tratamiento de agua lluvia utilizadas en instituciones educativas de 31 casos de estudio.</i>	48
Figura 8 <i>Trenes de tratamiento propuestos para la evaluación mediante análisis multicriterio.</i>	60
Figura 9 <i>Precipitación diaria registrada en estación climatológica de la UIS¹</i>	69
Figura 10 <i>Desempeño de los prototipos a escala de laboratorio para el tratamiento del agua lluvia: turbiedad (UNT), pH, conductividad eléctrica (CE)(μS/cm), DBO₅ (mgO₂/L), DQO (mgO₂/L), SST (mg/L) y Nitrato (mg NO₃ -N/L)</i>	73

Lista de Apéndices

Los apéndices están adjuntos en un archivo comprimido y pueden consultarse en el Repositorio Institucional.

Apéndice A. Datos encontrados en la bibliografía para casos de estudio sobre aprovechamiento de aguas lluvias en instituciones educativas.

Apéndice B. Encuesta realizada por medio de la herramienta Formularios de Google

Apéndice C. Curvas intensidad duración frecuencia- IDF de la estación meteorológica de la UIS

Apéndice D. Datos reportados para los parámetros más frecuentes empleados en la caracterización del agua lluvia en instituciones educativas

Apéndice E. Artículos seleccionados por filtración (tecnologías de tratamiento)

Apéndice F. Predimensionamiento tecnologías seleccionadas.

Apéndice G Aplicación de herramientas AHP y TOPSIS.

Apéndice H. Resultados de laboratorio de calidad de agua lluvia

Resumen

Título: Evaluación de sistemas de tratamiento del agua lluvia del edificio de la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones de la Universidad Industrial de Santander.*

Autor: Neidy Alejandra Hurtado **

Palabras Clave: Agua lluvia, universidad, tratamiento, calidad, análisis multicriterio

Descripción: El mundo se enfrenta a la escasez del recurso hídrico y el aprovechamiento del agua lluvia es una solución potencial a este problema. Sin embargo, la calidad del agua lluvia puede verse afectada por la presencia de microorganismos, metales y sustancias orgánicas. Por lo tanto, se requiere de un tratamiento que permita la remoción de contaminantes específicos para su posterior aprovechamiento en diferentes usos. En este estudio se proponen dos tecnologías para el tratamiento del agua en el sistema de aprovechamiento de agua lluvia del edificio de la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones (E3T) de la Universidad Industrial de Santander (UIS), que puedan contribuir a abastecer la demanda del recurso hídrico de la comunidad del campus universitario, con agua no potable para la descarga de instalaciones sanitarias, servicio de aseo y riego de cultivos. Para tal efecto, se hizo una revisión literaria relacionada con tecnologías para el tratamiento de agua lluvia en ámbitos educativos, posteriormente se seleccionaron dos trenes de tratamiento con potencial para la remoción de contaminantes del agua lluvia, mediante análisis multicriterio, utilizando la metodología Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) y considerando criterios técnicos, económicos y administrativos. Adicionalmente, se empleó la técnica para el orden de preferencia por similitud con la solución ideal (TOPSIS). El primer tren de tratamiento seleccionado (A2) está compuesto por una membrana de UF (ultrafiltración) y el segundo tren (A3) por un filtro lento de arena. Además de dichas tecnologías, ambos trenes cuentan con desviador de primer flujo, seguido de un sedimentador y, un sistema de desinfección mediante cloración. Posteriormente se realizó el montaje de las tecnologías a escala piloto y la evaluación de su desempeño en la eliminación de contaminantes. Las dos tecnologías mejoran significativamente la calidad del agua lluvia, alcanzando remociones 99.7% (A2) y 91.6% (A3) para turbiedad, de 84.9% (A2) y 99.7% (A3) para DBO₅, y de 97.7%(A2) y 71.2% (A3) para coliformes totales. En cuanto a DQO y SST, A3 presentó mayor eficiencia frente a A2 con una reducción del 93.8% y 97.2%, respectivamente. El análisis del desempeño de los dos trenes tecnológicos mostró que A2 tuvo buenos resultados en remoción de contaminantes y comparado con A3 requiere un área superficial reducida, bajo costo de inversión, operación y mantenimiento. Este estudio demostró la factibilidad de implementar un sistema de tratamiento de agua lluvia en edificio E3T que satisfaga la demanda de agua para actividades que no requieren agua potable.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería civil. Director: Daniela Cristina Rey Romero. Ing. Ambiental – MSc Planificación y desarrollo de recurso hidráulicos. Codirector: Edgar Ricardo Oviedo Ocaña. Ing. Sanitario – PhD Ingeniería sanitaria y ambiental.

Abstract

Title: Evaluation of rainwater treatment systems of the building of the School of Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering of the Industrial University of Santander *

Author(s): Neidy Alejandra Hurtado **

Key Words: Rainwater, university, treatment, quality, multicriteria analysis

Description: Rainwater harvesting is a potential solution for addressing water scarcity scenarios worldwide. However, rainwater quality may be affected by the presence of microorganisms, metals and organic substances. Therefore, it is required a treatment that allows the removal of specific pollutants for subsequent rainwater for different uses. This study evaluates two technologies for water treatment in the rainwater harvesting system at the building of the School of Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering (E3T) of the Universidad Industrial de Santander (UIS), which contribute to supplying the water demand of the campus community, with non-potable water for the discharge of sanitary facilities, cleaning services, and irrigation of crops. For that purpose, a literature review was conducted to characterize technologies for rainwater treatment used in educational institutions. Further, two treatment trains were selected using multi-criteria analysis, i.e., Analytic Hierarchy Process (AHP), considering technical, economical, and administrative criteria. In addition, the Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) was used and led to the selection of the alternative A2 which consisted of an ultrafiltration (UF) membrane, and the alternative A3 which consisted of a slow sand filter. Besides those technologies, both treatment trains contain a first flow diverter, followed by a settler, and a chlorination disinfection system. Subsequently, A2 and A3 technologies were assembled at the pilot scale, and their performance for pollutant removal was evaluated at the laboratory. The two technologies significantly improve rainwater quality, reaching removals of 99.7% (A2) and 91.6% (A3) for turbidity, 84.9% (A2) and 99.7% (A3) for BOD₅, and 97.7% (A2) and 71.2% (A3) for total coliforms. Regarding COD and TSS, A3 showed higher efficiency compared to A2 with a reduction of 93.8% and 97.2%, respectively. The analysis of the technologies' performance showed that A2 had good results in pollutant removal and compared to A3 requires a reduced surface area, low investment cost, operation, and maintenance. This study demonstrated the feasibility of implementing a rainwater treatment system in E3T building that meets the demand for water for activities that do not require potable water.

* Degree Work

** Faculty of Physicomechanics. School of Civil Engineering. Director: Daniela Cristina Rey Romero. Environmental Engineer – MSc Planning and development of hydraulic resources. Co-director: Edgar Ricardo Oviedo Ocaña. Sanitary Engineer – PhD Sanitary and environmental engineering.

Introducción

La distribución de los recursos hídricos se presenta de manera poco equitativa en el mundo, algunos países tienen alta disponibilidad de agua, mientras que otros se ven enfrentados a su escasez, debido a que parte de este recurso no es accesible y asequible para todos. La escasez del recurso hídrico genera desplazamientos a las ciudades sobrecargando sus infraestructuras y aumentando los precios de los alimentos (UNHCR, 2021). La ONU estima que podría desplazar a 700 millones de personas para el año 2030 (ONU, 2020). Este problema afecta a más del 40% de la población mundial y esta cifra podría aumentar (ONU, 2015).(ONU, 2015)

Ante esta realidad, realizar inversiones en diferentes sistemas de aprovechamiento de agua no convencionales, como la recolección de agua lluvia, la reutilización de aguas residuales y la desalinización del agua, constituyen una alternativa importante para compensar la escasez del recurso (FAO, 2013). Entre estas opciones, la recolección de agua lluvia durante eventos de precipitación, presenta un alto potencial para ser aprovechada de forma eficiente y ser una fuente valiosa para suplir algunos usos del agua. Este tipo de agua puede ser utilizada después de implementar una serie de tratamientos al agua captada, que posteriormente permita utilizar el recurso en el uso de sanitarios, servicios de aseo y riego de cultivos (Słyś, 2009).

El aprovechamiento de agua lluvia ha sido factible en contextos institucionales que han demostrado su potencial para contribuir a satisfacer las demandas de agua. Diferentes universidades a nivel internacional (Dao et al., 2013; Miorando et al., 2017; Yulistyorini et al., 2018) y nacional (Ballén Suárez et al., 2006; Chinchilla & Paredes, 2019; García & Rivera, 2020;

EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DEL AGUA LLUVIA DEL E3T12

Garzón & Gualdrón, 2019; León & Muñoz, 2021; Rodríguez & Corrales, 2016) son una muestra de proyectos e investigaciones realizadas utilizando tecnologías innovadoras para el tratamiento de agua lluvia que permiten que este recurso pueda ser utilizado posteriormente en diferentes usos.

Con el propósito de contribuir a la búsqueda de alternativas para la adaptación a escenarios de escasez hídrica, desde el 2012, la Universidad Industrial de Santander (UIS) en la sede principal de Bucaramanga, cuenta con un sistema de aprovechamiento de aguas lluvias en el edificio de la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones (E3T), esta infraestructura está destinada a fines educativos; cuenta con dos terrazas con un sistema de cubiertas verdes; la primera terraza ubicada en el quinto piso con extensión de 137 m² y la segunda terraza ubicada en el sexto piso con un área 429 m². El agua captada es conducida a un sistema de drenaje con tuberías de PVC, canaletas en concreto y cajas de inspección de concreto destinadas a la recolección y conducción de agua lluvia hasta el tanque de almacenamiento subterráneo con capacidad de 22000 L. Además, cuenta con bombas que permiten la distribución del agua hasta la descarga de inodoros y riego de agrícola en las terrazas. La infraestructura, además cuenta con paneles fotovoltaicos, iluminación por tubos reflectantes solares y riego automatizado para la vegetación plantada de raíz corta (berenjena, tomate Cherry entre otros) (Chinchilla & Paredes, 2019). Actualmente el sistema de aprovechamiento del agua lluvia no se encuentra en funcionamiento y no posee un sistema de tratamiento que permita mejorar la calidad del agua lluvia, para su aprovechamiento en diferentes usos que no requieran agua potable dentro del edificio, tales como: riego de jardines, descarga de sanitarios, entre otros.

En este contexto, el Grupo de Investigación en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental (GPH) ha venido trabajando en varios proyectos de investigación relacionados con sistemas de captación y aprovechamiento de agua lluvia (SCALL). Estos trabajos abarcaron el

EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DEL AGUA LLUVIA DEL E3T13

dimensionamiento del tanque de almacenamiento (Garzón & Gualdrón, 2019) y el análisis de la calidad del agua lluvia del edificio E3T, donde se obtuvo como resultado que parámetros de calidad como turbiedad, color aparente, coliformes fecales y *Escherichia coli* no se acogían a los estándares para uso del recurso en descarga de sanitarios y riego agrícola (Chinchilla & Paredes, 2019; García & Rivera, 2020). Como solución a esta problemática, se propusieron diferentes opciones tecnológicas (García & Rivera, 2020) que posteriormente fueron instalados a escala de laboratorio para determinar sus condiciones de operación y mantenimiento (León & Muñoz, 2021).

Para dar continuidad a estas investigaciones y profundizar en la búsqueda de una alternativa adecuada al contexto de la UIS, en este trabajo de grado se propone evaluar opciones tecnológicas para el tratamiento de agua lluvia captada en el edificio E3T teniendo en cuenta el empleo de herramientas de análisis multicriterio que permitan establecer si las tecnologías propuestas son las más adecuadas, de tal forma que puedan contribuir con la demanda del recurso hídrico de la comunidad académica de edificio E3T, con agua no potable para el funcionamiento de sanitarios, servicio de aseo y riego de cultivos. De este modo se podrá contribuir con la sostenibilidad ambiental, al reducir la demanda del recurso en actividades que no requieran de elevados estándares de calidad.

Este trabajo representa un aporte hacia el logro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Específicamente, se articula con los ODS 6 y 11 (ONU, 2015). Además, tiene en consideración la Política Nacional para la Gestión Integrada del Recurso Hídrico; particularmente, contribuye con la satisfacción de la demanda de agua en el país, implementando y utilizando tecnologías en procesos de ahorro, uso eficiente y sostenible del recurso hídrico (MinAmbiente, 2010). Adicionalmente, el presente trabajo de grado es consistente con el Plan de Desarrollo Institucional 2019-2030 de la Universidad Industrial de Santander, que tiene como compromiso,

EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DEL AGUA LLUVIA DEL E3T14

dentro de sus principios y valores institucionales, la implementación de acciones estratégicas que fomenten la sostenibilidad ambiental (UIS, 2019).

Por último, este trabajo de aplicación está en concordancia las políticas públicas de construcción sostenible en el país, específicamente, con el CONPES 3919, que tiene como objeto la inclusión de criterios de sostenibilidad ambiental, concretamente: i) eficiencia del agua con la implementación de sistemas para la recolección y uso de aguas lluvias, ii) eficiencia energética implementando mecanismos que optimicen el uso de energía en tratamiento de agua y iii) gestión ambiental y resiliencia con la implementación de sistemas pluviales (Forero & Valdivieso, 2019).

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Evaluar al menos dos trenes de tratamiento con potencial para el tratamiento del agua lluvia en el edificio E3T de la Universidad Industrial de Santander.

1.2 Objetivos Específicos

Identificar opciones tecnológicas con potencial para el tratamiento del agua en el sistema de aprovechamiento de agua lluvia del edificio E3T.

Seleccionar al menos dos opciones tecnológicas con potencial para el tratamiento del agua en el sistema de aprovechamiento de agua lluvia del edificio E3T.

Analizar el desempeño técnico de las tecnologías de tratamiento del agua seleccionadas a escala de laboratorio.

2. Marco de referencia

2.1 Aprovechamiento del agua lluvia

Los SCALL consisten en la captación y almacenamiento de la escorrentía generada por la lluvia en tanques, cisternas o embalses provenientes de superficies permeables o impermeables como techos, jardines, área de estacionamiento y calles; que permiten obtener agua para diferentes usos como: riego agrícola, jardinería, uso doméstico, consumo de agua potable y bebida de animales (Pizarro et al., 2015). El aprovechamiento de aguas lluvias es una práctica que se remonta a antiguas civilizaciones que se vieron enfrentadas a ocupar regiones áridas y semiáridas donde la oferta de aguas superficiales era casi nula (Ballén Suárez et al., 2006).

Para el diseño e implementación de los SCALL es necesario considerar diversos factores, entre los que se encuentran los técnicos, económicos y sociales. Los factores técnicos están relacionados directamente con la precipitación (oferta), la necesidad de abastecimiento de agua (demanda) y aspectos de construcción, operación y mantenimiento de la infraestructura. Los factores económicos corresponden a los costos de inversión, operación y mantenimiento requeridos para implementar el sistema y los factores sociales están directamente relacionados con las costumbres y aceptación del uso del agua lluvia de la comunidad donde se va implantar el SCALL (OPS/CEPIS, 2004).

Los SCALL cuentan con los siguientes componentes: captación, recolección y transporte, tratamiento, almacenamiento y red de distribución (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022). El área de captación del edificio debe contar una pendiente no menor al 5% que facilite el escurrimiento de la lluvia (OPS/CEPIS, 2003); las superficies pueden ser de diferentes materiales, cada uno de los cuales podría afectar la calidad del agua recolectada. Por ejemplo, las

cubiertas verdes podrían ser una fuente de nutrientes, las cubiertas asfálticas pueden aportar residuos de hidrocarburos y las cubiertas metálicas podrían aportar iones metálicos (AQUA ESPAÑA, 2016).

Otro componente de los SCALL consiste en la estructura de conducción del agua, que generalmente se realiza por medio de canaletas que drenan al sistema de tratamiento o al tanque de almacenamiento. Estas estructuras deben ser de materiales como el PVC y material galvanizado (OPS/CEPIS, 2003, 2004; Pizarro et al., 2015) que sean resistentes al agua y reduzcan su deterioro rápidamente. Por su parte, el tratamiento es un conjunto de elementos destinados a la remoción de contaminantes concretos como partículas y microorganismos. Este sistema está directamente relacionado con el tipo de contaminante a remover y el tipo de uso que se le va a dar al recurso hídrico. Finalmente, se tiene el almacenamiento, que corresponde a la infraestructura diseñada para almacenar el volumen de agua lluvia tratada para su posterior utilización y la red de distribución que transporta el agua a los puntos hidráulicos de consumo (Giraldo Agudelo, 2016; OPS/CEPIS, 2004).

2.2 Calidad del agua lluvia

La calidad de agua lluvia se evalúa midiendo parámetros físicos, químicos y microbiológicos. Como se mencionó anteriormente, esta puede verse afectada por los materiales utilizados para la construcción de los SCALL. Adicionalmente, la calidad del agua lluvia puede estar influenciada por actividades de mantenimiento del sistema (Lee et al., 2016), y por la presencia de microorganismos, metales, sustancias orgánicas y partículas presentes en las superficies de captación y la atmósfera (Estupiñán Perdonó & Zapata Garcia, 2010).

Entre los parámetros de calidad de agua lluvia que podrían limitar su uso para determinados fines, se puede mencionar el pH, cuyo valor podría estar por debajo de los límites aceptables,

debido al fenómeno de lluvia ácida, especialmente en áreas con importante actividad industrial, desarrollo urbano y tráfico vehicular (Melidis et al., 2007). Otros contaminantes comunes en el agua lluvia son los metales pesados como hierro, cadmio y plomo presentes debido a aplicaciones de fertilizantes agrícolas, al tipo de material de los sistemas de conducción y transporte del agua lluvia y emisiones industriales (Morrow et al., 2010), los cuales podrían restringir su uso dado que influye directamente en la calidad y representan un riesgo para la salud (Imarhiagbe & Osarenotor, 2020). También se pueden encontrar contaminantes poco comunes, como fenoles, ftalatos, fosfatos, hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), bifenilos policlorados (PCB) y piridinas (Polyakova et al., 2018).

La calidad microbiológica del agua lluvia juega un papel importante en la selección de tratamientos para su uso potencial. La presencia de organismos patógenos podría depender de condiciones climáticas como por ejemplo régimen de lluvias, la presencia de fauna, el tipo de material del área de captación seleccionado y el mantenimiento de esta (Campisano et al., 2017).

2.3 Tecnologías de tratamiento de agua lluvia

Actualmente existe una amplia gama de tecnologías para el tratamiento de agua lluvia en el mundo y la implementación de estas dependerá del uso final, la cantidad y la calidad del recurso a tratar (Moreira Neto et al., 2012). En primera medida lo recomendado es la implementación de un tratamiento preliminar (Abbasi & Abbasi, 2011). Esta etapa generalmente consiste en un desviador de primer flujo, el cual es un dispositivo que se encarga de desviar el agua lluvia inicial, previene y reduce la carga contaminante antes de ingresar en el tanque de almacenamiento. Adicionalmente, contribuye con el ajuste del pH, incrementa la concentración de oxígeno disuelto (OD), y reduce las concentraciones de sólidos disueltos totales (SDT), sólidos suspendidos totales (SST) y la turbiedad (Hernández Avilés & Chaparro, 2020). Esta etapa preliminar del tratamiento,

adicionalmente, puede incluir un sedimentador, cuyo objetivo es separar los sólidos más densos que el agua por acción de la gravedad (Arboleda, 2000).

Después de estos procesos se realiza el tratamiento primario, orientado a la remoción de compuestos inorgánicos. Esto puede realizarse por procesos como: filtración, coagulación/floculación, humedales construidos, filtración por membrana, filtro de carbón activado, entre otros (García & Rivera, 2020). Aunque estos tratamientos sean eficaces para retirar ciertos contaminantes, generalmente es necesario que se complemente con el proceso de la desinfección, el cual permite que el agua tratada sea apta microbiológicamente para diferentes usos (Moreira Neto et al., 2012).

2.4 Análisis multicriterio para la selección de tecnologías de tratamiento

La selección de tecnologías para el tratamiento de agua lluvia requiere considerar diversos criterios que permitan escoger la tecnología con mayor potencial de sostenibilidad (Galarza-Molina et al., 2015; Kalbar et al., 2016). El análisis de decisiones multicriterio (MCDA por sus siglas en inglés) es una herramienta útil que permite simplificar situaciones y decisiones complejas de tomar; a partir de una representación numérica que permite clasificar las preferencias de diferentes alternativas para la evaluación de tecnologías en el tratamiento de agua lluvia (Galarza-Molina et al., 2015) y agua residual, considerando aspectos técnicos, económicos, ambientales y administrativos (Wei et al., 2020). Existen diferentes métodos de análisis multicriterio entre los cuales se encuentra el proceso analítico jerárquico (AHP por sus siglas en inglés) y la técnica para el orden de preferencia por similitud con la solución ideal (TOPSIS por sus siglas en inglés).

AHP es una herramienta que permite tomar decisiones complejas, considerando criterios y subcriterios de carácter cualitativo y cuantitativo. Requiere de un grupo de personas expertas en el problema a solucionar. Los tomadores de decisiones realizan comparaciones pareadas subjetivas

respecto a la importancia de los criterios y subcriterios establecidos, utilizando la escala de valores de Saaty que tiene valores desde 1 a 9 (Saaty, 1987). AHP cuenta con ventajas frente a otras herramientas multicriterio, como por ejemplo, presenta un apoyo matemático, desglosa de forma simple el problema, tiene en cuenta la inclusión de criterios cuantitativos y cualitativos, admite la participación de diferentes actores, en caso de inconsistencia acepta su corrección y permite utilizar otra herramienta de análisis multicriterio complementariamente para su óptima solución (Toskano, 2005).

La técnica TOPSIS, por su parte, se utiliza para establecer un orden de las alternativas propuestas para solucionar un problema y seleccionar la mejor de ellas; es deseable que la selección de esta alternativa posea una menor distancia a la solución positiva o ideal y lo más lejos de la solución negativa o anti -ideal (Sawik, 2011).

2.5 Estado del Arte

Actualmente el mundo se enfrenta a escenarios de escasez hídrica y la búsqueda de alternativas para la adaptación a estos escenarios ha convertido el aprovechamiento del agua lluvia en una alternativa de interés general. Países como: Japón, Corea del Sur, Tailandia, China, Taiwán, Reino Unido, Alemania, España, Francia, Austria, Suiza, Bélgica, Dinamarca y Estados Unidos, han tenido una tendencia creciente en el aprovechamiento de agua lluvia (Campisano et al., 2017). Australia no es la excepción a esta problemática, dado que ha impulsado el desarrollo de tecnologías y sistemas de aprovechamiento para la utilización del agua de lluvia para usos como riego, jardinería, recarga de acuíferos entre otros, debido a su baja precipitación y a que las tres cuartas partes su territorio son áridos o semiáridos (Duan et al., 2008).

En América del Sur, países como Brasil están realizando esta práctica para enfrentar los problemas de escasez, mediante el programa “Un millón de cisternas” producto de la 3ª

EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DEL AGUA LLUVIA DEL E3T21

Conferencia de las Partes de la Convención de Naciones Unidas de Lucha Contra la Desertificación. A través de dicho programa se propuso la construcción de sistemas de captación de agua lluvia y tanques de almacenamiento, diseñados para suministrar agua para consumo humano y uso agrícola (Acevedo-García., 2016).

En diferentes instituciones educativas a nivel mundial se han desarrollado experiencias satisfactorias de aprovechamiento del agua lluvia para diferentes usos. Ejemplo de ello es el estudio realizado por la Universidad de Ingeniería Civil de Hanoi (HUCE), en Vietnam, a partir de un tratamiento de filtración con membranas, mediante el cual se logró obtener una calidad apta para el consumo humano (Dao et al., 2013). Otro estudio realizado en Irán, en la Universidad Malayer, en el cual se implementó un SCALL para satisfacer la demanda hídrica para el riego de jardines (Saeedi & Goodarzi, 2020). Otro caso reciente se presentó en la Universidad Central de Haryana, India, en donde, a partir de la captación de agua lluvia y posterior tratamiento con filtro de arena, se logró contribuir a la recarga de agua subterránea para suplir la demanda de agua potable para estudiantes y profesores del campus universitario (Garg et al., 2022).

Otras experiencias muestran novedosas tecnologías y el empleo de nuevos materiales en el tratamiento del agua lluvia, como es el caso de la Universidad Técnica de Estambul, Turquía. En ese caso, se logró reducir más del 99% de la concentración de materia orgánica y sulfatos por medio de membranas de nanofiltración (Köse-Mutlu, 2021). En la Universidad Estatal de Malang, en Indonesia, se evaluaron procesos de filtración a partir de la combinación de zeolita y carbón activado. El resultado de esta investigación mostró que la combinación de 25% carbón activado y 75% zeolita redujo los SDT y los coliformes totales en 37% y 36%, respectivamente (Yulistyorini et al., 2018). Otro caso relevante corresponde a la Universidad Tecnológica Jawaharlal, en Hyderabad, India, que comparó las eficiencias de un filtro tradicional de arena y la inclusión de un

EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DEL AGUA LLUVIA DEL E3T22

filtro de geomembrana en el proceso de filtración. En este estudio, se evidenció que el filtro de geomembrana tuvo la tasa de filtración más rápida en comparación con el filtro de arena (Viswnadh et al., 2018). Recientemente, en la Universidad Gottfried Wilhelm Leibniz de Hannover (LUH), en Alemania, se probaron dos líneas de tratamiento para agua lluvia. La primera línea estaba compuesta por una membrana de ultrafiltración y la segunda línea por un filtro lento de arena combinado con carbón activado. Los resultados obtenidos fueron positivos mostrando reducción de turbiedad de 90.4% y 20.4% respectivamente. Además, la segunda tecnología obtuvo una reducción DQO del 77%, pero para la membrana no se evidenciaron resultados claros de eliminación (Köster et al., 2023).

Otros estudios revelan la influencia que tienen los materiales de captación sobre la calidad del agua lluvia. El estudio realizado en el campus de la Universidad Autónoma de Barcelona (UAB), evidenció que las áreas de captación asfaltadas tienden a acumular más material particulado en comparación con las áreas de concreto que presentaron la mejor calidad de agua lluvia; las áreas asfaltadas presentaron valores altos DQO (55.7 mg O₂/L), HCO₃⁻ (80.8 mg/L) y NO₃⁻ (5.52 mg/L) (Angrill et al., 2017). En la Universidad Nacional de Seúl, también se ha incursionado en este tipo de propuestas analizando la influencia de los materiales del área de captación del agua lluvia. En este caso de estudio, el agua lluvia captada en techo de mármol mostró resultados más altos en parámetros como el pH, conductividad eléctrica, turbiedad y sólidos suspendidos en comparación con el agua captada en los techos verdes y de concreto (Mun et al., 2012). La Universidad Tecnología de Luleå, en Suecia, demostró que la presencia de microcontaminantes está influenciada por los materiales de la superficie de captación. Los resultados de esta investigación reflejaron que las láminas de cobre, láminas zinc galvanizadas y láminas de PVC liberaban Cu y ftalato de diisononilo (DINP) a la esorrentía (Müller et al., 2023).

EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DEL AGUA LLUVIA DEL E3T23

Colombia, en concordancia con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en su legislación ha incorporado a la construcción de edificaciones que tengan en cuenta criterios de sostenibilidad ambiental, implementando y utilizando tecnologías en procesos de ahorro, uso eficiente y sostenible del recurso hídrico (IDEAM, 2018). A nivel educativo, como ejemplo de lo anterior, se encuentra el edificio de la Universidad Libre, sede Bosque, la cual empleó un sistema de filtración con filtros de luffa cylindrica (estropajo) y cascarilla de arroz (Suárez et al., 2015), o el caso de la Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, que cuenta con un humedal construido de flujo subsuperficial horizontal para la remoción de contaminantes microbiológicos del agua lluvia (Rodríguez & Corrales, 2016). También se encuentra el caso reportado por la Universidad Militar Nueva Granada, en la que se implementó un sistema de filtros con diferente material filtrante (antracita, carbón activado granular, carbón natural, carbón natural y antracita y espuma) obteniendo un mejor desempeño en la reducción *E. coli*, materia orgánica, color y sólidos totales con la combinación de filtros de carbón natural acompañado de desinfección solar (Hernández y Chaparro, 2020).

Las experiencias en el aprovechamiento de aguas lluvias en Colombia dependen de cada necesidad específica. Particularmente, en el caso del edificio E3T de la UIS, se busca la utilización de agua lluvia en la descarga de instalaciones sanitarias, servicio de aseo y riego de cultivos, de allí la importancia de este trabajo para evaluar sistemas de tratamiento con potencial para el tratamiento de agua lluvia.

3. Metodología

3.1 Fase I: Identificación de opciones tecnológicas con potencial para el tratamiento del agua lluvia.

Para llevar a cabo la revisión bibliográfica se utilizó la base de datos de la biblioteca de la UIS, mediante los portales Scopus, Scielo, Science Direct y Redalyc. Se efectuó una búsqueda avanzada con palabras clave, utilizando los siguientes términos y se probaron diferentes combinaciones entre ellos: “Rainwater” “Rainwater harvesting” (treatment OR technology OR “system desing” OR “traintreatment”) AND quality OR (“physicochemical parameters” OR “microbiological parameters” OR characterization) AND “laboratory scale” AND (“educational institutions” OR university OR school) AND treatment. Para esta revisión se tuvieron en cuenta artículos científicos, libros y memorias de congresos.

3.1.1 Proceso de filtrado de documentos

Los artículos obtenidos, se sometieron a un proceso de filtrado y fueron organizados en un documento Excel, que contenía información sobre: autores, título, año de publicación, tipo de documento, revista de publicación y resumen. Para la selección de documentos se tuvieron en cuenta los siguientes criterios:

- Año: se incluyeron artículos publicados desde el año 2012 hasta el año 2021 para limitar el alcance a las tecnologías más actualizadas para tratamiento de agua lluvia.
- Título: se seleccionaron aquellos documentos cuyo título hiciera referencia a las palabras de búsqueda.
- Resumen: una vez realizada una selección de los artículos encontrados por título se realizó la lectura del resumen, de estos se seleccionaron aquellos artículos que indicaran casos de

EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DEL AGUA LLUVIA DEL E3T25

estudios realizados en alguna institución educativa, que consignaran parámetros de calidad de agua lluvia y/o información sobre tecnologías utilizadas para el tratamiento de agua lluvia.

- Contenido: se seleccionaron documentos que cuantificaran parámetros específicos, eficiencia de remoción de parámetros de calidad o que presentaran criterios de diseño, construcción, operación y/o mantenimiento de los sistemas de tratamiento del agua lluvia.

3.1.2 Revisión y análisis de datos

Una vez escogidos los artículos de interés, se organizaron creando una tabla en Excel que permitió su análisis posterior. Se extrajo la información de interés como: lugar donde se realizó el estudio, características generales de la institución educativa (p.ej. tipo de área de captación, área de captación de la institución), usos del agua tratada, tipo de tecnología, componentes del tren de tratamiento, costos de construcción operación y mantenimiento, parámetros de calidad del agua lluvia (físicoquímicos y microbiológicos) con valores estadísticos valores máximos y mínimos, normatividad ambiental empleada para cumplir con estándares de calidad, materiales de construcción, tipo de flujo, requerimientos de energía y porcentajes de remoción. La información extraída de cada documento se presenta en el Apéndice A.

Los parámetros de calidad del agua lluvia analizados se trabajaron en las mismas unidades de medida para poder realizar un análisis práctico. Los datos contenidos en los artículos de los parámetros físicoquímicos que no se encontraban registrados en las mismas unidades (por ejemplo, $\mu\text{g/L}$) fueron convertidos a mg/L ; para el caso de los parámetros microbiológicos se dejaron plasmados según las unidades encontradas, ya sea en UFC/100 ml o NMP/100ml. Una vez obtenida la información cuantitativa y cualitativa, se realizaron gráficos de distribución de

EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DEL AGUA LLUVIA DEL E3T26

documentos encontrados, usos del agua lluvia parámetros fisicoquímicos y microbiológicos más reportados y tecnologías más utilizadas en el tratamiento de agua lluvia. Además, se aplicó estadística descriptiva para su análisis posterior. Para el análisis de resultados de los parámetros obtenidos en cada estudio estos fueron analizados teniendo en cuenta la normatividad internacional (EPA, OMS, QCVN 01-1/2018-BYT de Vietnam y la Guía para la Aplicación del Real decreto 1620/2007) para el reúso de agua residual.

De las búsquedas propuestas anteriormente se obtuvo un total de 2345 artículos. Posteriormente, al realizar el proceso de filtrado, se obtuvieron 1667 documentos empleando el criterio de año de publicación; al aplicar el filtro por título se eligieron 205; luego se realizó una lectura de los resúmenes y, se filtraron 139. Finalmente, revisando el contenido de estos, se seleccionaron 37 artículos de los que se descartaron 6 archivos debido a que se encontraban repetidos, la búsqueda de los documentos se realizó en el mes de abril del año 2022. En la Tabla 1 se aprecia con mayor detalle el proceso de filtrado realizado.

Tabla 1

Número de documentos seleccionados para la revisión de literatura

Bases de datos	Documentos encontrados por búsqueda avanzada	Documentos seleccionados durante el proceso de filtrado			
		Año	Título	Resumen	Contenido
Scopus	699	281	126	109	30
Science Direct	1453	1235	50	26	4
Redalyc	168	132	22	2	1
Scielo	24	18	6	1	1
Independiente	1	1	1	1	1
Total	2345	1667	205	139	37
Descartados		678	473	334	6 (repetidos)
Seleccionados					31

3.2 Fase II: Selección de opciones tecnológicas

A partir de los artículos seleccionados en la fase I, se propusieron tres (3) trenes de tratamiento con potencial para la remoción de contaminantes del agua lluvia, de los cuales se seleccionaron dos (2) teniendo en cuenta los parámetros críticos encontrados en las caracterizaciones y resultados de calidad de agua lluvia de anteriores estudios realizados en el edificio E3T de la UIS (Chinchilla & Paredes, 2019; García & Rivera, 2020). Los trenes propuestos cuentan todos con un desviador del primer flujo, seguido de un sedimentador y un sistema de cloración. Entre las etapas de sedimentación y desinfección, cada tren propuesto cuenta con un sistema de tratamiento distinto, en donde para el primer tren de tratamiento (A1) se propuso un humedal de flujo subsuperficial, para el segundo (A2) una membrana de ultrafiltración y para el tercer tren (A3) un filtro lento de arena.

Para la selección de los dos trenes de tratamiento que podrían ser más apropiados para el contexto del edificio E3T de la UIS, se aplicó análisis multicriterio, utilizando las metodologías AHP y TOPSIS. La aplicación de AHP inició con la definición de los criterios de decisión (económicos, administrativos y técnicos). Posteriormente, se definieron los subcriterios (p. ej. remoción de contaminantes, costos de inversión de infraestructuras, facilidad de operación, costos de operación y mantenimiento). Para la elección de los criterios y subcriterios se realizó una revisión de la literatura de artículos publicados en revistas indexadas teniendo en cuenta publicaciones que abordaran la selección de tecnologías para el tratamiento de agua residual y que hubieran empleado herramientas de análisis multicriterio como las propuestas en este estudio. A su vez, se incluyeron estudios similares, siguiendo una metodología de búsqueda que inició desde la referencia de artículos previamente seleccionados. A partir de esta revisión exhaustiva, se identificaron los criterios y subcriterios más utilizados en la selección de sistemas de tratamiento

EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DEL AGUA LLUVIA DEL E3T28

de aguas residuales, los cuales también resultan aplicables para la selección de tecnologías apropiadas para reducir los contaminantes presentes en el agua lluvia. Es importante destacar que solo se tuvieron en cuenta artículos publicados entre el año 2010 y 2022. De este proceso de revisión se seleccionaron un total de nueve (9) artículos.

La evaluación de los criterios y subcriterios se realizó mediante una matriz de importancia calificada cuantitativamente por un grupo de expertos. La configuración del grupo de expertos se realizó teniendo en cuenta la formación técnica y experiencia de profesionales en el tema a tratar. El grupo de expertos fue seleccionado de diferentes universidades nacionales e internacionales, corporaciones autónomas, entidades del Estado, consultorías y organizaciones internacionales. El número de personas inicialmente encontradas para este trabajo fue de 88 personas, pero solo 22 aceptaron participar. Una vez establecidos los evaluadores de la herramienta y definidos los criterios y subcriterios, el conjunto de expertos asignó la importancia y el peso relativo a cada criterio y subcriterio. Para esta ponderación se utilizó AHP y se aplicó una encuesta por medio de la herramienta Formularios de Google. El cuestionario empleado en la encuesta se presenta en el Apéndice B. Para el análisis de las opiniones emitidas por los expertos, las respuestas se estandarizaron teniendo en cuenta la escala de Saaty (1987), donde 1 es el valor menor y 9 el mayor valor de calificación para los criterios y subcriterios. Las evaluaciones de los criterios y subcriterios se realizaron en comparaciones por pares. Posteriormente se elaboró una matriz de orden $n \times n$ cuya consistencia se evaluó indicando si los juicios personales dados por cada experto eran racionales. El orden de cada matriz (n) depende del número de subcriterios evaluados.

Dado que cada experto consultado se desempeña en un área profesional distinta, los juicios emitidos fueron variables, por ende, fue complejo encontrar una sola respuesta a los criterios analizados. Por esta razón, se ajustaron los juicios de valor, utilizando la media geométrica como

EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DEL AGUA LLUVIA DEL E3T29

lo plantea Saaty (1987). Seguidamente, se evaluó la consistencia de la matriz y, posteriormente, se calculó un nuevo vector consensuado obtenido para cada criterio y subcriterio. Dado que las matrices utilizadas en este caso de estudio fueron de orden 3x3 y 4x4, se consideró que su consistencia no debía superar el 5% y 9%, respectivamente (Wei et al., 2020). En los casos en que la consistencia superó los valores anteriormente mencionados, fue necesario solicitar nuevamente la valoración por los expertos (Wei et al., 2020). Por lo anterior, de las respuestas obtenidas, solo 12 fueron consistentes.

Finalmente, se jerarquizaron las alternativas que permitieron tomar la mejor decisión mediante la herramienta de TOPSIS, ofreciendo una solución al problema de los juicios subjetivos dados por el grupo de expertos. Para llevar a cabo el análisis de propuestas tecnológicas, TOPSIS requiere un conjunto de datos específicos, los cuales fueron tomados de casos de estudio y del predimensionamiento de las tecnologías. Para el prediseño de las tecnologías se calculó el caudal de diseño utilizando el método racional, recomendado en el Título D del Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (MVCT, 2017). Para ello, se empleó el coeficiente de escorrentía de 0.513 que corresponde al área de captación del zona de estudio (Garzón & Gualdrón, 2019) y una intensidad 41.8 mm/h, tomada de las curvas de intensidad duración y frecuencia (IDF) de la estación meteorológica de la UIS (IDEAM, 2017). Las curvas IDF se presentan en el Apéndice C. El periodo de retorno empleado fue de 2 años con un tiempo de duración de 60 minutos, siguiendo las recomendaciones de MVCT (2017) y datos de precipitación reportados por Cavadia (2024). A partir de estos datos y la ecuación (1) se obtuvo un caudal de diseño 9.22 L/s.

$$Q = 2.78 * C * I * A \quad (1)$$

Donde

EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DEL AGUA LLUVIA DEL E3T30

Q = Caudal pico de aguas lluvias (L/s).

C = Coeficiente de escorrentía definido para cada área tributaria (adimensional).

I = Intensidad de precipitación correspondiente al tiempo de concentración utilizado (mm/h).

A = Área tributaria de drenaje (ha).

Para el cálculo de valores correspondientes a los subcriterios referentes a costos de inversión inicial, operación y mantenimiento, en los trenes de tratamiento A1 y A2; los datos fueron tomados de reportes en la literatura (Arias & Brown, 2009; Kristjánsdóttir et al., 2023). Para el tratamiento A3 se tomaron datos encontrados en la literatura (Sánchez et al., 2012) y de comunicación personal con Ordoñez (2022), profesional vinculado a la empresa fabricante de membranas de ultrafiltración Martin Membrane Systems. Todos los costos fueron indexados al año 2023. En los costos ahorrados se tuvo en cuenta el valor del m^3 cobrado por el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga de USD\$ 0.71, incluyendo el costo de tasas ambientales y a estos costos se les restó los costos de inversión inicial, operación y mantenimiento por m^3 de agua tratada. Para los datos de los subcriterios técnicos, se tuvo en cuenta la información encontrada en la literatura (Arias & Brown, 2009; Ortega Sandoval et al., 2019; RAS, 2017; Rodríguez & Corrales, 2016; Sánchez et al., 2012; Shatnawi, 2019), mientras que el área requerida se obtuvo con el prediseño de las tecnologías. Respecto de los subcriterios administrativos, se realizó una calificación cualitativa que evaluó cada subcriterio (i.e., facilidad de operación y dificultad de reposición de elementos) asignándoseles un valor de 1 a 3 (ver Tabla 2). Para los ítems de evaluación de los subcriterios administrativos se designó una valoración numérica bajo criterio propio, con base en la revisión de la literatura descrita en los incisos 2.3 y 2.5.

Tabla 2

Valoración cualitativa de subcriterios administrativos

Subcriterio	Descripción	Valores posibles	Variable Cualitativa	Asignación
Facilidad de operación	Refleja el nivel de complejidad de operación de la tecnología, si se requiere de personal calificado o un profesional que se encargue de tiempo completo de la operación de la tecnología.	1	Alto	Tecnologías que requieran personal altamente capacitado y mayor disposición de tiempo tendrán un puntaje menor de calificación.
		2	Moderado	
		3	Bajo	
Dificultad de reposición de elementos	Comprende el nivel de complejidad para hacer el recambio o reposición de elemento, accesorio o pieza de la tecnología seleccionada.	1	Muy fácil	Tecnologías para las que sea más difícil y dispendioso el cambio o recambio de algún elemento tendrán valores más altos de calificación.
		2	Fácil	
		3	Difícil	

Una vez valoradas las alternativas de acuerdo con los criterios y subcriterios ya establecidos, se determinó con TOPSIS la solución ideal positiva y la solución anti-ideal negativa calculando las distancias de cada alternativa a las soluciones encontradas; en seguida, se calculó el índice de proximidad relativa a la solución ideal positiva, y por último se ordenaron las alternativas de manera decreciente (Osorio Gómez et al., 2018).

3.3 Fase III: Análisis del desempeño técnico de las tecnologías

3.3.1 Selección de parámetros para análisis de calidad del agua

Se seleccionaron y evaluaron los parámetros físicos, químicos y microbiológicos más empleados para analizar la calidad de agua lluvia como: pH, turbiedad, conductividad eléctrica, plomo, sólidos suspendidos totales, nitratos y coliformes totales. Estos parámetros se tuvieron en cuenta por resultados de las investigaciones previas que se han realizado en el edificio E3T (Chinchilla & Paredes, 2019; García & Rivera, 2020). Adicionalmente, se tuvo en consideración parámetros como DBO₅ y DQO ya que, según revisión de la literatura en la fase I, estos son

indicadores clave para los usos del agua tratada en el edificio dado que parte del área de captación es un techo verde que puede contribuir con la presencia de compuestos orgánicos.

3.3.2 Montaje y puesta en marcha de los prototipos

Se realizó el montaje y construcción de prototipos a escala de laboratorio de los trenes de tratamiento seleccionados, teniendo en cuenta criterios reportados en la literatura (i. e., tiempos de retención, caudales, parámetros hidráulicos, entre otros). Los prototipos se ubicaron en el laboratorio del grupo de investigación GPH de la UIS y están a disposición del mismo. El montaje de los prototipos se realizó teniendo en cuenta el diseño realizado por García y Rivera (2020) y los ajustes de Burgos (2023). Como se mencionó en la fase II, los trenes propuestos cuentan con un desviador del primer flujo, seguido de un sedimentador y un sistema de cloración. Cada tren propuesto varía únicamente en el tratamiento donde se proponen diferentes procesos de filtración: una membrana de UF y un filtro lento de arena; para el desarrollo de este trabajo no se evaluó la etapa de cloración en ninguno de los dos trenes de tratamiento seleccionados, dado que no se encuentra dentro del alcance de esta investigación. Los dos trenes de tratamiento comparten un tanque que funciona como sedimentador, este cuenta con una llave tipo “Y” de ½ pulgada que se encarga de suministrar el agua a los dos trenes.

El primer prototipo está conformado por una membrana de ultrafiltración un “mini filtro CUBE®” con diámetro de poro de 35 nm fabricado por Martin-Systems, con dimensiones 250x75x260 mm, un área de membrana 0.45 m², además cuenta con 3 capas de membranas y espacios entre ellas de 6 mm, cuenta con un flux de 10 a 20 L/m²*h. La activación e instalación se realizó siguiendo los procedimientos propuestos por León y Muñoz (2022) y del fabricante. La instalación de la membrana se llevó a cabo utilizando dos contenedores plásticos de 18 L de capacidad, dispuestos uno encima del otro. El contenedor superior albergó el módulo de filtración,

EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DEL AGUA LLUVIA DEL E3T33

con un tubo de 8 mm para conectar la membrana y un tubo de PVC para controlar el nivel del agua. El contenedor inferior contenía una llave de paso para recolectar las muestras de agua filtrada. El proceso de activación de la membrana consistió en sumergirla en una solución de hipoclorito de sodio durante 3 horas, seguido por un lavado con agua potable para eliminar residuos. Este proceso aseguró un flujo completo a través de la membrana y eliminó posibles microorganismos patógenos.

La membrana se dispuso en un tanque de plástico con un volumen de 45 L. El sedimentador se ubicó por encima del tanque de la membrana y del filtro lento de arena, para lograr que el flujo se presentara por diferencia de alturas (ver Figura 1). Durante las corridas del experimento, el tanque de la membrana de UF se llenaba a su capacidad máxima y se operaba hasta que éste quedara vacío.

Figura 1

Trenes de tratamiento a escala de laboratorio



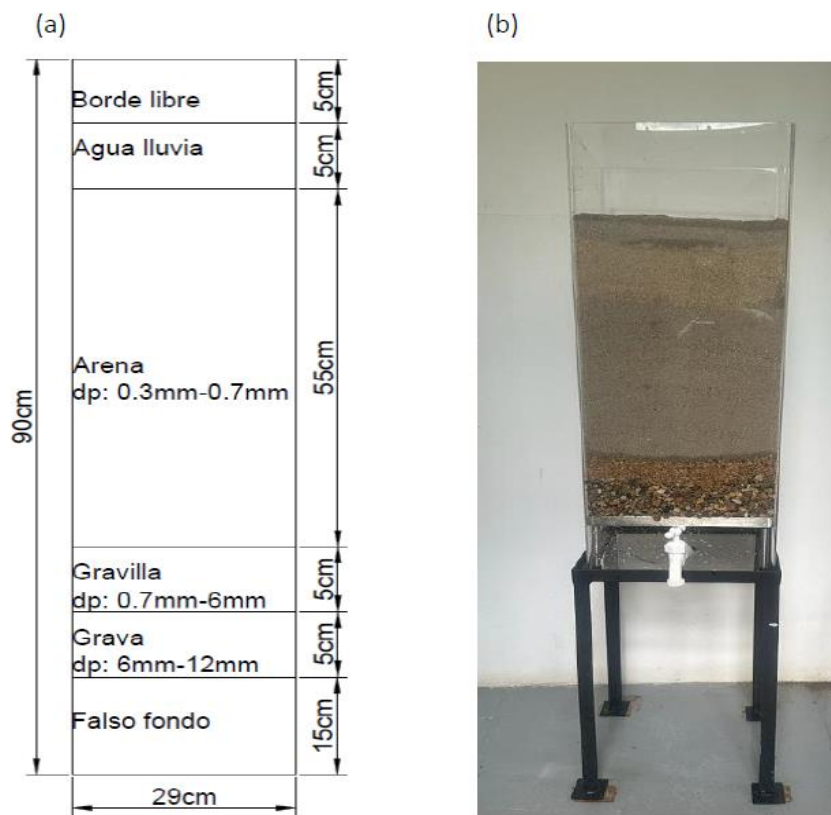
El segundo tren de tratamiento a escala de laboratorio, además del sedimentador, está conformado por un filtro lento de arena construido en acrílico siguiendo las dimensiones y especificaciones empleadas por Burgos (2023). El material para construir el lecho filtrante fue arena, la cual fue tamizada, seleccionada y lavada para retirar impurezas. Además, se utilizó una capa de grava y gravilla en el fondo para estabilizar el material filtrante. El medio filtrante y de soporte fueron puestos encima de un falso fondo de acero inoxidable dentro de un reactor de acrílico con dimensiones y características indicadas en el estudio previo realizado por Burgos (2023). Las capas de arena, gravilla y grava tienen un total de altura de 55, 5 y 5 cm, respectivamente. La Figura 2 muestra el diseño de las capas del filtro y el material filtrante utilizado. El filtro se operó con una velocidad de filtración de 0.3 m/h, y con una cabeza hidráulica

EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DEL AGUA LLUVIA DEL E3T35

de 5 cm por encima de la arena para garantizar la presencia de capa biológica que permite eliminar patógenos de agua (G Castaño, J Latorre, 1998). Para promover la formación de la capa biológica, después de realizar su montaje y previo a su operación, el filtro se dejó completamente lleno de agua potable por más de 20 días (G Castaño, J Latorre, 1998).

Figura 2

Visualización del filtro lento de arena a escala de laboratorio



3.3.3 Evaluación del desempeño de la tecnología

Para evaluar el desempeño de los prototipos, se empleó el agua lluvia captada en el edificio E3T, considerando seis (6) eventos de precipitación. Para la selección del sitio de muestreo de agua lluvia, se tuvo en cuenta la descripción realizada por Chinchilla y Paredes (2019). Las fechas

EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DEL AGUA LLUVIA DEL E3T36

para los respectivos muestreos se ajustaron a la segunda temporada de lluvias de 2023, correspondiente al mes de septiembre. Los datos de precipitación registrados en el campus de la UIS, durante el mes de septiembre de 2023, fueron obtenidos del trabajo realizado Cavadia (2024) de una estación climatológica ubicada a aproximadamente 400m del edificio E3T.

Para la recolección de agua cruda se realizaron visitas técnicas para reconocimiento del sitio específico del punto de muestreo, que correspondió a la caja de inspección ubicada al noroccidente del edificio E3T (ver Figura 3). La recolección del agua lluvia se realizó empleando diferentes envases plásticos (ver Figura 4).

Figura 3

Caja de inspección en el sitio de muestreo

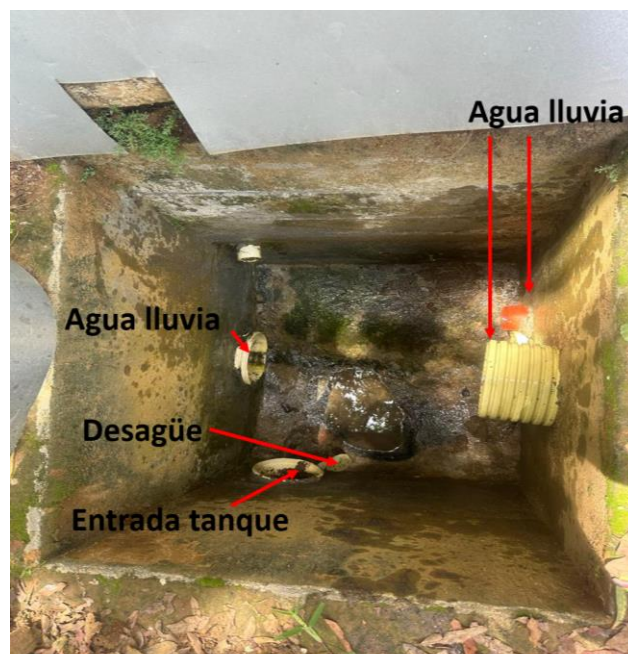


Figura 4

Recipientes para recolección del agua lluvia



El pH, la conductividad eléctrica y la turbiedad se midieron en el laboratorio del grupo de investigación GPH de la UIS. Los dos primeros parámetros se analizaron con un equipo multiparámetro portátil Mettler Toledo® y la turbiedad se midió con un turbidímetro Hach® 2100q portable. El resto de los parámetros fueron determinados por el laboratorio externo ECOSAM, acreditado por el IDEAM. La toma de muestras, el almacenamiento y el posterior análisis de los parámetros se realizaron según los protocolos de los Métodos Normalizados para el Análisis de Aguas Potables y Residuales (APHA-AWWA-WEF, 2017). Con el fin de obtener eficiencias de remoción de contaminantes, se analizó el afluente y efluente de cada uno de los trenes de tratamiento elegidos. Para determinar si existía diferencia entre las dos tecnologías probadas, se empleó estadística inferencial. Para ello, en primer lugar, se aplicó la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk. Posteriormente, se realizó la Prueba T Pareada a los parámetros que

cumplían con la distribución normal para el afluente y efluente de las dos tecnologías, mientras que en los casos donde la distribución de los datos no fue normal, la comparación se realizó mediante la prueba de los rangos con signo de Wilcoxon.

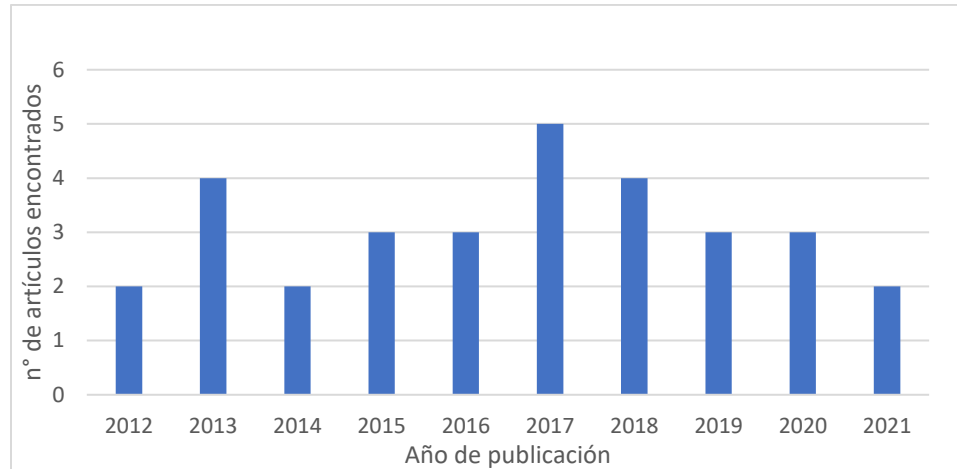
Como parte de la evaluación del desempeño de los prototipos, se realizó una comparación de la calidad del efluente con valores admisibles de los parámetros analizados para usos no potables, según normatividades existentes a nivel internacional (EPA, OMS, QCVN 01-1/2018-BYT de Vietnam y la Guía para la Aplicación del Real decreto 1620/2007) para el reúso de agua residual. Los usos del agua lluvia considerados correspondieron a descarga de instalaciones sanitarias, servicio de aseo y riego de cultivos. Finalmente, se seleccionó la mejor opción no solo en términos de eficiencia de remoción, sino también considerando su asequibilidad, factibilidad y efectividad con el fin de exponer sus ventajas y desventajas al momento de ser implementada en el SCALL del edificio E3T.

4. Resultados

4.1 Identificación de opciones tecnológicas con potencial para el tratamiento del agua lluvia

4.1.1 Resultado de filtrado y selección de documentos

Se evidencia con respecto a la bibliografía seleccionada, que la cantidad de artículos publicados por año es variable sobre la temática específica investigada (ver Figura 5), observando que el mayor número de publicaciones se obtuvieron en 2017 (5 artículos) y los años con menos reportes obtenidos fueron 2014 y 2012 (2 artículos).

Figura 5*Distribución de documentos encontrados por año de publicación*

De los artículos seleccionados se extrajo información sobre el uso del agua lluvia recolectada en las diferentes instituciones educativas, permitiendo visualizar los usos de mayor aplicación. Se evidencia que el reúso de agua lluvia es factible en instituciones educativas y su tratamiento dependerá del uso final que se le desee dar al agua recolectada. De acuerdo con la revisión de la literatura, el agua lluvia es utilizada para uso potable (26%), riego de áreas verdes (24%), descarga de sanitarios (20%), contraincendios (6%), limpieza de pisos (16%), riego agrícola (hortalizas) (4%) y recarga de acuíferos respectivamente.

4.1.2 Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del agua lluvia

Los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del agua lluvia determinan los usos potenciales del recurso hídrico, su grado de contaminación y la eficiencia de remoción de contaminantes que se obtiene cuando se emplean tecnologías para su posterior aprovechamiento. La Tabla 3 indica los rangos reportados de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del agua lluvia cruda y tratada en instituciones educativas, además de los datos reportados por García y Rivera (2020) de agua lluvia cruda captada en el edificio E3T de la UIS.

EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DEL AGUA LLUVIA DEL E3T40

Tabla 3

Parámetros de calidad del agua lluvia captada y/o tratada en instituciones educativas

Parámetros	Unidades	Agua cruda				Agua tratada		
		Mínimo	Máximo	n	Edificio E3T ¹	Mínimo	Máximo	n
Temperatura	°C	13	27	8	-			
pH	Unidades	4.34	11.26	29	-	6.36	11.6	14
Alcalinidad	mg CaCO ₃ /L	2	142	5	52-186	6.14	91.3	2
Turbiedad	UNT	0	1349	27	12-105	0.06	7.6	14
Color	Pt/Co	1	84.33	11	60-475	1.67	54.8	4
conductividad eléctrica C. E	µs/cm	0.074	429	23	-	14.16	456.3	11
Sólidos suspendidos totales SST	mg/L	4	2678.57	18	94-342	0	129.13	6
Sólidos disueltos totales SDT	mg/L	0.9	537	21	-	0	292	12
Sustancias orgánicas (KMnO ₄)	mg/L	16.5	16.5	1	-	-	-	-
Cloruros	mg/L	0	26.73	9	<5	0	10.54	2
Nitrógeno	mg/L	0.038	10.35	7		0.02	1.58	4
Nitratos	mg/L	0.25	3.97	12	0.23-3.82	0.355	1.9	7
Nitritos	mg/L	0.22	0.58	7	0.01-0.03	0.006	0.68	4
Amonio	mg/L	0.09	2.05	11	-	0.03	0.98	5
Dureza total	mg CaCO ₃ /L	5	920.65	13	49-192	3.6	28.24	5
Fosfatos	mg/L	0.15	0.49	3	-	0.01	0.35	4
Bicarbonato	mg/L	0	0	0	-	13.8	13.8	1
Sulfatos	mg/L	<1	23.18	10	<10-19	0	22.37	5
Sulfuro de hidrogeno	mg/L	0.0025	0.0295	2	-	0.03	0.035	2
Flúor	mg/L	0.14	1.18	3	-	0.07	0.07	1
Aluminio	mg/L	<0.001	0.3	7	-	<0.001	0.042	3
Cloro	mg/L	0.59	65.5	4	-	0.59	11.34	2
Calcio	mg/L	0.934	11.8	7	-	8.47	11.2	2
Sodio	mg/L	0.92	18.7	9	-	2.2	12.4	2
Potasio	mg/L	0.0028	19.5	5	-	0.0022	0.5	2
Plomo	mg/L	0	0.362	16	<0.01-0.03	0	0.18	12
Hierro	mg/L	1	5.475	14	<0.08-3.64	0	0.59	11
Cobre	mg/L	0	0.095	10	-	0	0.106	6
Magnesio	mg/L	0.106	6.1	7	-	1.3	1.82	2
Manganeso	mg/L	0	0.182	14	<0.2	0	0.035	7
Mercurio	mg/L	0	<0.001	9	-	0.0002	<0.002	5
Arsénico	mg/L	0	<0.005	9	-	0	<0.006	7
Níquel	mg/L	0.002	0.082	8	-	0.0018	0.05	8
Selenio	mg/L	0.001	0.023	7	-	0	<0.01	6

EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DEL AGUA LLUVIA DEL E3T41

Parámetros	Unidades	Agua cruda			Edificio E3T ¹	Agua tratada		
		Mínimo	Máximo	n		Mínimo	Máximo	n
Cadmio	mg/L	0	0.026667	8	-	0.0002	0.03	5
Cromo	mg/L	0	0.15	8	-	0.002	0.32	6
Bario	mg/L	0.03717	0.18	4	-	0.0215	0.0215	1
Zinc	mg/L	0.004	0.322	15	<0.1-0.1	0.004	0.468	12
Fenol	mg/L	0	0.01	6	-	0.00024	0.00068	3
Cianuro	mg/L	0	0.03	3	-	-	-	-
Surfactantes	mg/L	0.13	0.13	1	-	-	-	-
Cloro residual libre	mg/L	0	0	3	-	-	-	-
Potencial Redox	Mv	60	60	1	-	-12.91	-12.91	1
Ácidos Húmicos	mg/L	0.03	0.04	2	-	0.003	0.003	1
Demanda bioquímica de oxígeno DBO ₅	mg/L	0.4	64	7	-	3.56	44.49	5
Demanda química de oxígeno DQO	mg/L	1.54	980	12	-	1.05	24.5	4
Carbono orgánico total COT	mg/L	10.1	10.1	1	-	9.8	9.8	1
Oxígeno disuelto OD	mg/L	1.02	8	4	-	0.55	7.65	2
Grasa y aceites	mg/L	5	72.28	4	-	40.83	59.11	2
<i>P. aeruginosa</i> (UFC)	UFC	350	440	1	-	17.5	22	1
Coliformes totales (UFC)	UFC	600	175000	3	-	0.008	610	3
Bacterias heterotrofas (UFC)	UFC	30000	30000	1	-	300	300	1
Coliformes fecales (UFC)	UFC	200	1440	5	-	0	815	4
<i>E. coli</i> (UFC)	UFC	2	920	6	-	0	37	5
<i>P. aeruginosa</i>	NMP	0	30	2	-	0	0	2
Coliformes totales (NMP)	NMP	50	130000	8	47-920	0	92000	4
Bacterias heterotrofas (NMP)	NMP	0	0	0	-	-	-	-
Coliformes fecales (NMP)	NMP	0	24000	13		0	549.4	4
<i>E. coli</i> (NMP)	NMP	0	734	4	2-40	0	41.7	4

Nota: ¹ Resultados de laboratorio de la caracterización realizada al agua lluvia captada en el edificio E3T(García & Rivera, 2020). n: número de datos total reportados en casos de estudio.

De los 31 artículos, se descartaron siete (7) para este análisis por no incluir parámetros de calidad. En el resto se encontraron un total de 717 registros de datos referentes a la calidad de agua lluvia para el desarrollo de esta investigación. En las investigaciones consultadas, el muestreo se realizó en diferentes puntos como: tanque de almacenamiento, áreas de captación y a la salida de los sistemas de tratamiento instaurados; sin embargo, para facilitar el análisis de los datos, estos

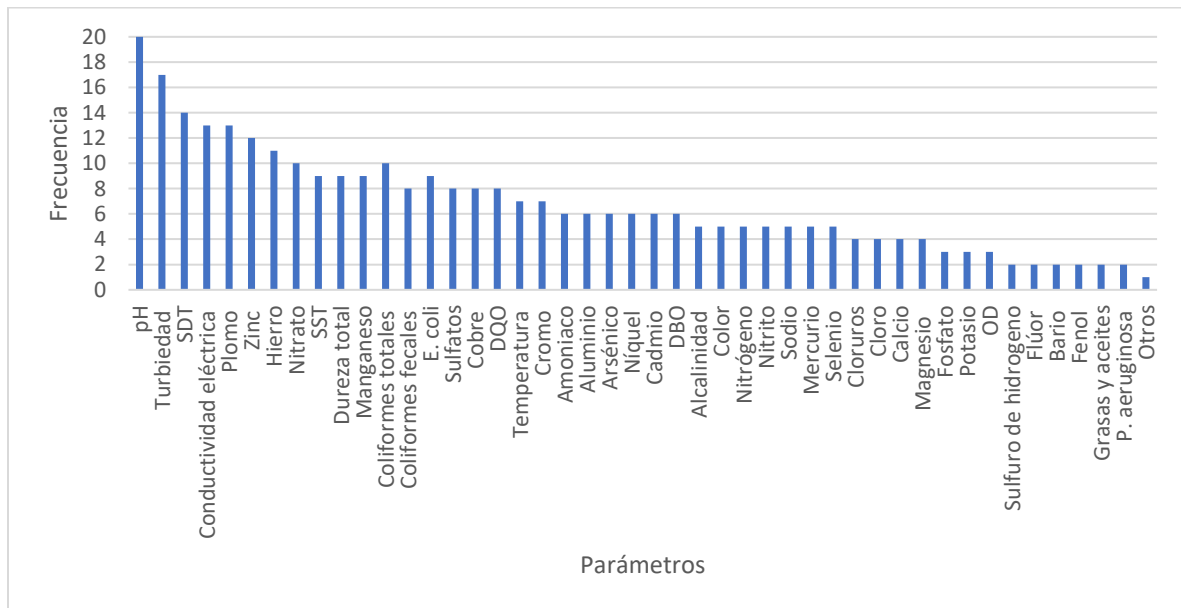
EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DEL AGUA LLUVIA DEL E3T42

se agruparon en dos categorías (i.e., agua cruda y agua tratada) sin especificar la localización dentro del sistema de aprovechamiento de agua lluvia. De los datos reportados se evidencia que la calidad del agua lluvia es variable y depende de las características de las áreas de influencia cercanas y de las superficies de drenaje de las aguas lluvias.

En la Figura 6, se presentan las frecuencias de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos empleadas para caracterizar el agua lluvia en las instituciones educativas. Los parámetros más empleados son: pH, turbiedad, sólidos disueltos totales (SDT), plomo, conductividad eléctrica, hierro, nitratos, manganeso, coliformes fecales, *E. coli* y los parámetros menos empleados son: sustancias orgánicas (KMnO_4), bicarbonato, flúor, bario, fenol, ácidos húmicos, carbono orgánico total (COT), grasas y aceites, y algunos parámetros microbiológicos como *P. aeruginosa* y bacterias heterótrofas. Cabe destacar que dentro de las caracterizaciones se encontró un estudio que empleó pruebas de PCR que indicaron la presencia de adenovirus y bacterias como *Klebsiella spp.*, *Legionella spp.*, *Pseudomonas spp.* y *Yersinia spp.*

Figura 6

Frecuencia de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del agua lluvia reportados en los documentos seleccionados



4.1.2.1. Calidad fisicoquímica del agua lluvia: para un análisis más detallado se analizaron los parámetros más estudiados dentro de las investigaciones (Apéndice D), los cuales se agruparon por rangos debido a la alta variación encontrada dentro de los datos. Para este análisis, no se tuvieron en cuenta los parámetros que se reportaban en rangos en los estudios consultados.

- pH:** fue el parámetro más empleado dentro de las caracterizaciones realizadas en los estudios. El pH estuvo en el rango de 4.34 a 11.6. Sin embargo, la mayoría de los datos (70.9%) estuvieron alrededor de valores neutros (6.36 a 7.88). Los valores extremos altos están asociados a las características del material de recolección del agua lluvia, tal como lo reportan Mun et al. (2012) y Chiang et al. (2013) quienes utilizaron materiales como mármol y concreto. Los valores mínimos se asocian posiblemente a fenómenos de contaminación atmosférica influenciada por presencia de dióxido de carbono, dióxido de

EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DEL AGUA LLUVIA DEL E3T44

azufre y óxidos de nitrógeno como lo reportan diferentes autores (Chiang et al., 2013; Kabbashi et al., 2020). En general, la mayoría de valores de pH para agua cruda (85%) y agua tratada (82%) no presentan restricciones para consumo humano, descarga de sanitarios, riego de cultivos y áreas verdes, dado que no sobrepasan los valores máximos permisibles establecidos por instituciones como EPA (2012) y OMS (2022).

- **Turbiedad:** en los estudios se encontraron valores de turbiedad que oscilan entre 0 y 1349 UNT para agua lluvia no tratada y 0.06 y 7.6 UNT para el agua lluvia tratada. En el caso del agua cruda, el valor máximo se asoció con contaminación por sólidos en el área de captación (estacionamiento de autos) (López Zavala et al., 2016). La diferencia de los resultados entre agua lluvia sin tratamiento y post tratamiento es debido principalmente al uso de sistemas que incluían desviador de primer flujo y procesos de filtración, lo cual permite la remoción de materia en suspensión.
- **Conductividad eléctrica:** refleja la cantidad de iones disueltos en el agua como sodio (Na^+), calcio (Ca^{+2}), potasio (K^+), magnesio (Mg^{+2}), cloruro (Cl^-), sulfato (SO_4^{-2}), carbonato (CO_3^{2-}), bicarbonato (HCO_3^-), que permite la conducción de corriente eléctrica y está directamente relacionada con los sólidos disueltos totales (SDT) (OMS, 2011). Estos valores variaron entre 0.074 y 429 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para agua lluvia cruda, y 14.16 y 456.3 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para agua lluvia tratada. El 67.7% de los datos tenidos en cuenta para el análisis de este parámetro se encontraban por debajo de los 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ tanto para agua cruda como para agua tratada. En los casos donde se evidenció una alta conductividad eléctrica (>400 $\mu\text{S}/\text{cm}$) en el agua, se concluyó que podría estar influenciada por el material de la superficie de captación y de almacenamiento (hormigón) (Mun et al., 2012; Shafiquzzaman et al.,

EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DEL AGUA LLUVIA DEL E3T45

2020) y necesitan un tratamiento adecuado para no limitar su uso en actividades de descarga de instalaciones sanitarias y riego de cultivos.

- **SDT:** variaron entre 0.9 y 537 mg/l para agua no tratada y entre de 0 a 292 mg/l para agua tratada. Según la OMS no se ha establecido un valor de referencia para este parámetro en el agua de consumo humano, dado que no se ha encontrado evidencia de concentraciones que pongan en riesgo la salud (OMS, 2022). Todos los datos reportados se encuentran por debajo de 600 mg/l lo cual es aceptable ya que no altera el sabor del agua. Los SDT incluyen sales inorgánicas y en menor cantidad materia orgánica disueltas en el agua (OMS, 2011). A partir de la revisión de literatura, se encontró que la concentración más alta fue de 537 mg/l para agua cruda y estuvo influenciada por las temporadas secas previas a los eventos de precipitación (Shatnawi, 2019). La concentración fue más elevada al comienzo de temporadas húmedas, dado que se acumulan más contaminantes en las áreas de captación y estos son arrastrados con los primeros milímetros (ml) de precipitación (Shatnawi, 2019).
- **Plomo:** es un metal pesado que puede inhibir el crecimiento celular vegetal en muy altas concentraciones (EPA, 2012); además, su exposición provoca el deterioro neurológico en niños y aumento de la presión arterial sistólica en adultos (OMS, 2011). A partir de la revisión de literatura, se determinó que la concentración de Pb para agua lluvia cruda varió entre 0 y 0.362mg/l, mientras que para agua lluvia tratada la concentración estuvo entre 0.0001 y 0.18 mg/l. La traza de plomo (Pb) se debió a la presencia de vehículos y emisiones industriales cercanas al área de estudio (Chiang et al., 2013), la utilización de pinturas en el techo con trazas de Pb (Islam et al., 2019) y material galvanizado en las áreas de captación (Y. Kim et al., 2017). Se evidenció que la mayoría de los datos de agua lluvia

tratada eran menores de 0.01mg/l cumpliendo con el límite máximo permisible establecido por la OMS para agua de uso potable (OMS, 2022). Se evidencia que en todos los casos de reúso de agua lluvia en riego agrícola, las concentraciones de Pb en el agua cruda y tratada cumplieron con el límite establecido por la EPA de 5 mg/l (EPA, 2012).

- **Hierro:** el agua lluvia por lo general carece de hierro (Fe), por lo que la presencia de este metal en ella podría ser resultado de lixiviación en las áreas de captación (O'Hogain et al., 2012). Las concentraciones de Fe encontradas para agua lluvia cruda fueron de 0.01 mg/l a 5.475 mg/l y para agua lluvia tratada se encontraron concentraciones que van desde 0 hasta 0.59 mg/l. La mayoría de los valores se encuentran por debajo de 1 mg/l para agua cruda (92.3%) y agua tratada (100%), cumpliendo con los límites establecidos para agua de uso potable y agricultura (EPA, 2012; Marino, 2003; OMS, 2011) a excepción del estudio de Ortega Sandoval et al., (2019) que, debido al tipo de área de captación (pavimento), registró 5.475 mg/l de Fe para agua cruda, superando un máximo de 5 mg/l para riego establecido por la EPA (EPA, 2012).
- **Zinc:** es un metal esencial para las plantas (EPA, 2012) y el ser humano, está presente en el agua en forma de sales (OMS, 2011). Su presencia es debida en gran medida a la deposición atmosférica en las áreas de captación por influencia de la industria petroquímica y la producción de productos forestales (Chang et al., 2004). Las concentraciones de zinc reportadas en los casos de estudio para agua lluvia cruda y tratada se encuentran por debajo de los límites permisibles tanto para uso potable < 3 mg/l (OMS, 2011) y < 2 mg/l según la guía de agua potable vietnamita (Ministry of Health, 2018) y para agricultura < 2 mg/l (EPA, 2012).

4.1.2.2 Calidad microbiológica del agua lluvia. La presencia de microorganismos en el agua lluvia recolectada es un factor determinante que impide o posibilita su uso. La revisión bibliográfica evidenció que el agua lluvia es portadora de agentes microbianos que ponen en riesgo la calidad del agua lluvia y que algunos SCALL con tratamiento no remueven en su totalidad agentes microbiológicos patógenos.

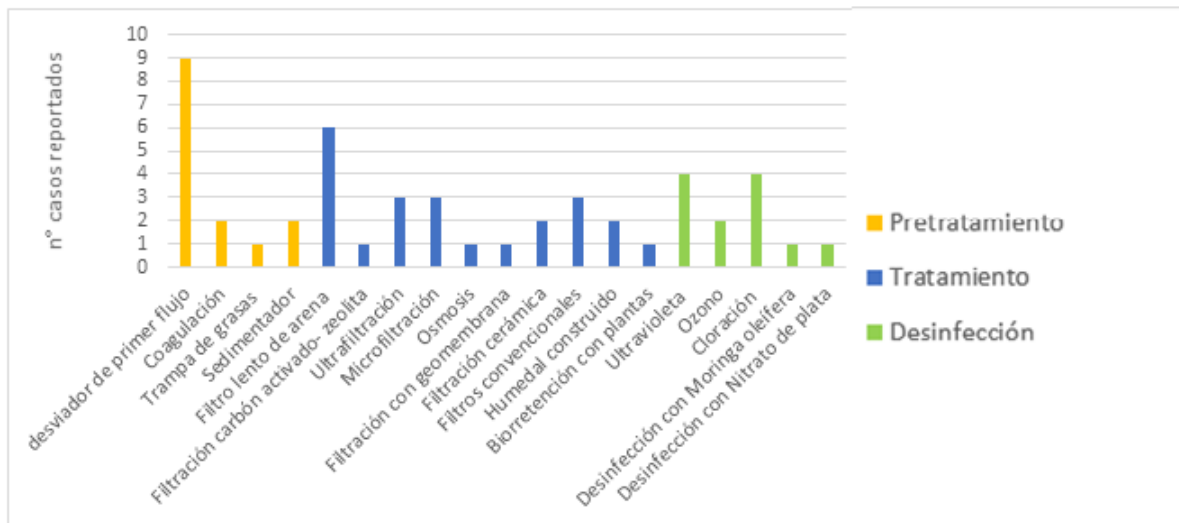
Este comportamiento se evidenció en varias instituciones como las escuelas primarias de Bangladesh, las cuales, a pesar del uso de filtros de agua en cerámica más un filtro de arena y grava, presentaron concentraciones de coliformes fecales de 815 NMP/100ml en el agua tratada (M. A. Islam et al., 2019); o el caso reportado por Dobrowsky et al., (2015) que encontró la presencia de coliformes totales, bacterias heterótrofas y *E. coli* después del proceso de microfiltración. Adicionalmente, Murakami y Moruzzi, (2013) identificaron la presencia de coliformes totales en concentraciones de 9.20×10^4 NMP/100 ml y 5.49×10^2 NMP/100ml de coliformes fecales a pesar de que emplearon filtración más coagulación con almidón de maíz.

4.1.3 Caracterización de tecnologías

De los 31 artículos encontrados se identificaron 19 tipos de tecnologías (ver Figura 7) empleadas en el tratamiento de agua lluvia recolectada en instituciones educativas para su posterior aprovechamiento. En el Apéndice E se presenta el listado de documentos científicos de los cuales se extrajo esta información. Las tecnologías más empleadas son: desviador de primer flujo (29%), filtración lenta en arena (19.3) y filtración por membranas (25.8%) y entre las menos usadas se encuentran las trampas de grasas (3.2%).

Figura 7

Tecnologías para tratamiento de agua lluvia utilizadas en instituciones educativas de 31 casos de estudio.



A continuación, se describen las principales tecnologías encontradas, estas se agruparon en tres tipos de tratamiento: preliminar, tratamiento y desinfección. Dentro de este análisis se evalúan las diferentes tecnologías con potencial para el tratamiento de agua lluvia en el edificio E3T de la UIS, para lo cual se desglosan las ventajas y desventajas teniendo en cuenta la revisión literaria y los estudios previos realizados por Chinchilla y Paredes (2019) y García y Rivera (2020). En estos estudios previos se determinaron los contaminantes que sobrepasaron las normas aplicables para agua lluvia para descarga de instalaciones sanitarias, servicio de aseo y riego de cultivos. Para un análisis detallado de las características de cada tecnología (ver Tabla 4) se tuvieron en cuenta aspectos como el requerimiento de: área, personal, energía y altos costos, además de remoción de algunos contaminantes concretos (ver Apéndice A) para cada una de las tecnologías encontradas para el tratamiento de agua lluvia en instituciones educativas.

Tabla 4

Caracterización de tecnologías para el tratamiento de agua lluvia

Tecnología	Requerimientos			Contaminantes removidos						
	Requerimiento de área extensa	Requerimiento personal	Requerimiento de energía Altos costos	Turbiedad	SDT	SST	N	DQO	DBO ₅	Coliformes
Desviador de primer flujo				X	X					
Trampa de grasas		X		X						
Sedimentador	X			X	X					X
Coagulación		X	X X	X	X					X
Filtro lento de arena	X			X		X				X
Filtración carbón activado- zeolita		X	X	X	X					X
Ultrafiltración		X	X X	X	X	X	X	X	X	X
Microfiltración		X	X X	X	X	X	X	X	X	X
Osmosis		X	X X	X	X	X	X	X	X	X
Filtración con geomembrana				X						
Filtración cerámica			X	X		X	X	X	X	X
Filtros convencionales				X		X				
Humedal construido	X		X	X		X	X		X	X
Biorretención con plantas	X			X				X		
Desinfección con luz ultravioleta			X X							X
Ozono			X X							X
Cloración		X								X
Desinfección (Moringa oleífera)		X								X
Desinfección (AgNO ₃)		X								X

4.1.3.1 Tratamiento Preliminar

Desviador de primer flujo: un desviador de primer flujo es un dispositivo que se encarga de desviar los primeros mm de agua en un evento de precipitación, lo cual contribuye a reducir la carga contaminante antes de ingresar al tanque de almacenamiento o al sistema de tratamiento; adicionalmente, contribuye con el ajuste del pH, incrementa la concentración de oxígeno disuelto

EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DEL AGUA LLUVIA DEL E3T50

(OD) y reduce las concentraciones de SDT, SST y la turbiedad (Hernández Avilés & Chaparro, 2020). Nueve (9) de 31 artículos encontrados sobre tratamiento de agua lluvia recolectada en las instituciones educativas demuestran que el empleo de desviador de primer flujo mejora significativamente la calidad del agua lluvia recolectada y lo recomiendan como parte esencial del sistema de tratamiento. Con la revisión bibliográfica se evidencia que el volumen de desvío varía, algunos autores utilizaron cantidades de descarga que oscilan entre 2.5 L por m² de área de captación (López Zavala et al., 2016) a 8 L por m² (Murakami & Moruzzi, 2013) y otros autores instalaron desviadores de descarga de primer flujo de 120 L (Dao et al., 2017; Kim et al., 2017) a 128 L de capacidad (Temesgen et al., 2015).

Se evidencia que el desviador de primer flujo es recomendado en la mayoría de los casos por ser eficiente en la remoción de SDT, SST y turbiedad y de bajo costo; además no requiere personal operativo ni de áreas extensas. Debido a ello, esta tecnología se considera apropiada para el caso de estudio de la presente investigación.

Trampa de grasas: es un pequeño tanque cerrado dotado de una entrada sumergida y de una tubería de salida que inicia cerca del fondo de la estructura. Tiene como objeto la retención de grasas, jabones e hidrocarburos, por lo general es utilizado en el tratamiento de agua residual o aguas grises. En la revisión de literatura no se evidenció el empleo significativo de esta tecnología para el tratamiento de agua lluvia. Sin embargo, es factible para la eliminación de grasas presentes en el agua lluvia provenientes de parqueaderos asociado con fugas y derrames de los motores de los automóviles (López Zavala et al., 2016).

A partir de la revisión de literatura y estudios previos realizados en el edificio E3T, se concluye que este dispositivo no es necesario, dado que la concentración de grasas y aceites en el

área de captación correspondiente a las vías y parqueaderos es baja debido al poco flujo vehicular y al reducido tiempo de estacionamiento de estos (García y Rivera, 2020).

Sedimentador: la sedimentación es un proceso físico por el cual las partículas suspendidas se mueven en forma descendente en un líquido de menor masa específica debido a la acción de gravedad, separando los sólidos más densos que el agua (Arboleda, 2000). Esta tecnología es poco utilizada en el tratamiento de agua lluvia y, en ocasiones, es reemplazada por tanques que no sólo permiten el almacenamiento del recurso sino también separa las partículas suspendidas. Algunas experiencias emplean tubos en forma de U o J a la entrada de los tanques para evitar la resuspensión de partículas lo que permite aumentar la eficiencia en la eliminación de sólidos (Dao et al., 2017; Kim et al., 2017; Tran et al., 2021a). La Universidad Pontificia Javeriana en Bogotá cuenta con un sistema de tratamiento de agua lluvia para ser aprovechada para riego y limpieza, que incluye un sedimentador primario capaz de remover coliformes totales con porcentajes de remoción de 5 a 51% y *E. coli* con una eficiencia de remoción de 9 a 90.9% (Rodríguez & Corrales, 2016).

Los sedimentadores podrían ser recomendables para el sistema de tratamiento del edificio E3T de la UIS, por ser eficientes para remoción de microorganismos, SDT, turbiedad. Sin embargo, dependiendo del caudal podrían requerirse áreas extensas para su implementación.

4.1.3.2 Tratamiento

Coagulación: la coagulación es un proceso químico que desestabiliza las partículas coloidales, por medio de la adición de los coagulantes ya sean inorgánicos o polímeros orgánicos sintéticos o de origen natural, que permiten la formación de flocs; eliminando de esta forma turbiedad, metales pesados, microorganismos y materia orgánica (Arboleda, 2000). La coagulación es utilizada para el tratamiento de agua potable y residual, también es factible para el tratamiento de agua lluvia (Abbasi & Abbasi, 2011; Murakami & Moruzzi, 2013; Shafiquzzaman et al., 2020).

EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DEL AGUA LLUVIA DEL E3T52

Dentro de los estudios realizados en contextos educativos se evidenció el empleo de coagulantes naturales (almidón de maíz) en combinación con filtración en medio granular que permitieron reducir la turbiedad hasta en un 70.8% y el color hasta en un 61% (Murakami & Moruzzi, 2013). Otro estudio demostró que el empleo de alumbre como coagulante con una dosis óptima de 50 mg/L, más floculación, elimina el 99% de Pb y Se, y logró remociones de Fe, Mn, Cu, Ba por encima del 50%, el único metal que no se pudo eliminar fue el Cr (Shafiquzzaman et al., 2020). Las desventajas que se evidencian con este proceso es la necesidad de monitoreo constante de la dosis óptima de coagulante que permita el buen desempeño del tren de tratamiento, la disponibilidad de personal para su operación y los costos del coagulante (García & Rivera, 2020).

La coagulación-floculación requiere de equipos dosificadores y operarios para el adecuado funcionamiento del tren de tratamiento, además requiere de altos costos de adquisición y por ende no es recomendable la implementación de esta tecnología en el edificio E3T.

Filtración en medios granulares: la filtración en medio granular es un tratamiento que permite eliminar sólidos suspendidos del agua haciéndola pasar por un medio granular capaz de retener sólidos en el lecho filtrante. El material más empleado es arena silíceo; también se utiliza antracita, granate y carbón activado, aunque este último con otros objetivos además de lecho filtrante. Hay dos tipos de filtración granular para la eliminación de sólidos: filtración lenta y filtración rápida (Súarez López et al., 2014). La primera se utiliza si desea eliminar turbiedad y sólidos suspendidos. La segunda es adecuada para el agua con baja turbiedad o que haya sido filtrada previamente, elimina materia orgánica disuelta, algas y microorganismos, incluidos protozoos, cuando hay un tratamiento preliminar (OMS, 2022; Súarez López et al., 2014).

EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DEL AGUA LLUVIA DEL E3T53

A partir de la revisión de literatura, se evidenció que es viable su puesta en marcha en el contexto educativo mostrando eficiencias de eliminación y tasas de infiltración de diferentes medios filtrantes. Para el primer caso, la filtración con medio granulares arrojó resultados satisfactorios reduciendo el 77.5% de turbiedad y el 50% de SST (Shatnawi, 2019); otras experiencias muestran la combinación de medios filtrantes granulares como arena, geomembranas y geomembrana-arena, obteniendo como resultado que la tasa de filtración es más rápida en la geomembrana (Viswnadh; Giridhar; Divya, 2018). Se puede inferir que la calidad de agua del efluente dependerá de la profundidad del medio filtrante, la calidad del medio de filtración, el medio filtrante, la calidad del agua a tratar y su tratamiento previo.

La filtración por medios granulares, en especial el filtro lento de arena, es utilizado para todos los usos de agua encontrados, es eficiente en la remoción de turbiedad, SST y de contaminantes microbiológicos, no requiere de personal para su operación, pero sí para su mantenimiento y sus costos de inversión son bajos, lo cual lo hace factible para el tratamiento de agua lluvia del edificio E3T.

Filtración por membrana: la separación por membrana es un tratamiento físico que permite la separación de partículas sólidas del agua. Existen diferentes tipos de membranas y estas se clasifican por su tamaño de poro: microfiltración (MF), con tamaño de poros entre $10\sim 0.1\mu\text{m}$, ultrafiltración (UF) de $0.1\sim 0.01\mu\text{m}$, nanofiltración (NF) de $0.01\sim 0.001\mu\text{m}$ y ósmosis inversa (OI) de $0.001\sim 0.0001\mu\text{m}$ (Habert et al, 2006).

Los procesos de separación por membrana han sido utilizados para el tratamiento de agua lluvia para uso potable y no potables con resultados prometedores en las instituciones educativas. La MF demostró que puede eliminar el 100% de *E. coli* (Dao et al., 2013) y el 98.6% de coliformes totales presentes en el agua. Además, elimina turbiedad, color, SST, SDT, nitrógeno (N), y algunos

EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DEL AGUA LLUVIA DEL E3T54

metales pesados como Fe, Pb, y Zn (Ortega Sandoval et al., 2019). Otras experiencias muestran el empleo de UF para eliminar sólidos coloidales y en suspensión, macromoléculas y coliformes, utilizando membranas de UF de 4 y 50 kDa (Miorando et al., 2017). La utilización de nanofiltración fue empleada en la granja experimental Welgevallen, Stellenbosch, Sudáfrica, para la eliminación de bacterias; los resultados indicaron que puede remover bacterias heterótrofas en un 99.9%, *E. coli* hasta el 100% y coliformes totales en un 99.9%. Sin embargo, los resultados también indicaron que no fueron eliminados efectivamente *Klebsiella spp.*, *Legionella spp.*, *Pseudomonas spp.* y *Yersinia spp.* con este tipo de filtración (Dobrowsky et al., 2015). La OI también ha sido utilizada en el tratamiento de agua lluvia, pero en menor medida. La Universidad de California Davis muestra su experiencia utilizando membranas de OI para proveer agua para actividades de limpieza (Hertel, 2017).

Estas tecnologías son eficientes en la eliminación de contaminantes, pero presentan desventajas como el requerimiento de personal para su mantenimiento y operación para prolongar la vida útil de estas membranas, altos costos de adquisición, el ensuciamiento (Shafiquzzaman et al., 2020) y el recambio de estas cuando su vida útil se acaba (Tran et al., 2021a). Otra desventaja corresponde al consumo de energía eléctrica, Dao et al., (2013) estimaron que la implementación SCALL con MF consume alrededor de 50 KW al mes.

La filtración por membranas también puede ser realizada sin requerimiento energético, este es el caso de la “mini filtro CUBE®” membrana de UF impulsada por gravedad; son muy utilizadas en contextos institucionales y el grupo de investigación de la UIS cuenta con membranas de este tipo para el tratamiento de agua lluvia.

Filtración por adsorción: la filtración por adsorción para el tratamiento de agua se da por la adición de materiales porosos al agua con gran área de superficie (de 500 a 1500 m²/g) como el

EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DEL AGUA LLUVIA DEL E3T55

carbón activado o la zeolita. Estos adsorbentes atraen los contaminantes mediante procesos fisicoquímicos que provocan que los contaminantes se adhieran a su área superficial para su posterior eliminación.

Dentro de la revisión bibliográfica se encontró la combinación de zeolita y carbón activo para reducir SDT, coliformes totales y sustancias orgánicas con un porcentaje de remoción de 37, 36 y 35% respectivamente (Yulistyorini et al., 2018).

La filtración en carbón activado es eficiente en la adsorción de partículas disueltas, como metales pesados. Para el tratamiento de agua lluvia en el edificio E3T no se considera apropiado debido a que las caracterizaciones realizadas por García y Rivera, (2020) y Chinchilla y Paredes, (2019) reportaban la presencia de metales pesados (Fe, Zn, Mn) en todos los aforos con valores por debajo del límite de cuantificación, solo Chinchilla y Paredes, (2019) reportaron que el Pb presentó niveles por encima de lo esperado 0.41 (mg/L), aunque se encuentra por debajo del valor máximo (5.0 mg/L) establecido por la EPA para reúso de agua cruda y tratada para agricultura y el valor recomendado por la OMS para agua potable.

Humedal construido: se define como un sistema de depuración que emplea vegetación para el tratamiento de agua; los procesos de descontaminación ocurren en un ambiente saturado donde interactúa el sustrato, los microorganismos y la vegetación (García Serrano & Corzo Hernández, 2008). Existen dos tipos de humedales construidos: humedal de flujo superficial y humedal de flujo subsuperficial. Los humedales remueven contaminantes microbiológicos como coliformes totales y *E. coli* (García Serrano & Corzo Hernández, 2008), DBO₅ (Peng et al., 2018), SST, N, fósforo y metales pesados a través de procesos biológicos y fisicoquímicos (Vidal & Hormazábal, 2018).

Este tipo de tecnología tiene potencial de brindar servicios ecosistémicos de gran importancia como depuración hídrica, polinización, regulación climática y hábitat de especies (Ghermandi et al., 2011); sin embargo su diseño y construcción presenta ciertas desventajas. Entre estas, se incluye el requerimiento de áreas extensas dependiendo el caudal a tratar, poca variedad de especies vegetales estudiadas para este tipo de tratamientos, inconveniente con bajas temperaturas y para el caso de Latinoamérica no hay una constante de depuración confiable para latitudes subtropicales y tropicales (Vidal & Hormazábal, 2018). El humedal construido es una tecnología recomendable para implementar en el tratamiento de agua lluvia en el edificio E3T dado que el caudal a tratar no es grande.

4.1.3.3 Desinfección

Cloración: La cloración es un proceso de desinfección y se puede realizar con gas cloro licuado, hipoclorito de sodio líquido, hipoclorito de calcio y generadores de cloro *in situ*. La cloración se emplea principalmente para la desinfección microbiana. Sin embargo, sirve como agente oxidante, puede oxidar plaguicidas, manganeso y especies disueltas como arsenito (OMS, 2022). Este tipo de tratamiento fue utilizado en 4 de 12 instituciones educativas que en sus SCALL emplearon desinfección garantizando agua libre de microorganismos. Estas instituciones utilizaron para su desinfección hipoclorito de sodio (Chiang et al., 2013; López Zavala et al., 2016), e hipoclorito cálcico al 65% (Gispert et al., 2018). Para que la cloración sea eficaz, la OMS recomienda que debe haber una concentración de cloro libre mínimo de 0.2, lo ideal > 0.5 mg/l después de 30 min de contacto (OMS, 2022). Esta recomendación es concordante con los datos obtenidos en la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) que reportan valores cloro libre 0.3 y 1.5 mg/l (Gispert et al., 2018). La desinfección con cloración muestra excelentes resultados para la eliminación de microorganismos al ser de bajo costo, poseer efecto residual para asegurar la

EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DEL AGUA LLUVIA DEL E3T57

desinfección por lo que se considera factible en el edificio E3T para remoción de coliformes totales.

Ozonización: el ozono es el desinfectante más potente para el tratamiento de agua, tiene la mayor eficiencia de desinfección en comparación con el cloro o la luz ultravioleta (UV), requiere menor tiempo de contacto (10 a 30 minutos), no genera residuos peligrosos, tiene muchos usos dentro del tratamiento de agua, oxida contaminantes emergentes y compuestos orgánicos, además controla malos olores en el tratamiento de aguas residuales. El mecanismo de acción del ozono consiste en la alteración de la pared celular y las cadenas de ácidos nucleicos provocando despolimerización y como resultado la lisis celular. Aunque su eficiencia es mejor que otros desinfectantes se recomienda un tratamiento posterior ya que el ozono no tiene un efecto desinfectante residual (EPA, 1999, 2012; OMS, 2011; Rodríguez et al., 2007). La revisión de literatura mostró que el tratamiento del agua lluvia con ozonización no solo se utiliza como método de desinfección (Dao et al., 2013), también es utilizado para la eliminación de microcontaminantes, mejorar el sabor y olor de agua lluvia combinando esta tecnología con filtración con carbón activado (van Der Hoek et al., 2014). La desinfección con ozono no es factible para el edificio E3T porque elevaría los costos dado que necesitaría un desinfectante con efecto residual; además, el proceso de ozonización requiere de tecnología compleja y sistemas de contacto eficientes, es muy corrosivo por lo cual requiere de materiales resistentes a la corrosión y por último el costo inversión inicial y la demanda de energía eléctrica pueden ser relativamente altos (EPA, 1999b).

Radiación UV: La desinfección con luz UV se basa en la transferencia de energía electromagnética con la ayuda de una lámpara de vapor de mercurio con longitudes de onda de 250 a 270 nm, que penetra el material genético de los microorganismos e inhibe su capacidad de

reproducción celular, no tiene efecto residual (EPA, 1999a, 2012; OMS, 2011). El tratamiento con UV fue el más utilizado (41.6%) en instituciones educativas para el tratamiento de agua lluvia. Este tipo de desinfección es eficaz para desactivar bacterias como *P. aeruginosa*, coliformes totales y *E. coli* con porcentajes de eliminación del 100% (Y. Kim et al., 2017; Tran et al., 2021a). Este tipo de tecnología es poco aconsejable en el edificio E3T para el tratamiento de agua lluvia ya que no tiene efecto residual.

Otros procesos de desinfección: para el tratamiento de agua lluvia en instituciones educativas se encontró alternativas diferentes para la desinfección de agua, dentro de estos se encuentra el empleo de nitrato de plata (AgNO_3) y *Moringa oleífera*. La utilización de compuestos a base de plata pueden funcionar como desinfectantes de acción lenta, sin embargo, no hay datos publicados veraces que evalúen su eficacia biocida, el potencial que se tiene para la generación de subproductos, los riegos de su utilización y las dosis óptimas a utilizar (OMS, 2011). Nawaz et al. (2012) utilizaron AgNO_3 para la desinfección de agua lluvia para fines potables, obteniendo como resultados la eliminación de coliformes totales y *E.coli* hasta del 95% con dosis de 0.08 – 0.1 mg/l. En ese estudio, se observó un rebrote de estos microorganismos con dosis < 0.04 mg/l. Kabbashi et al. (2020) propusieron el tratamiento de agua con desinfectantes naturales (semilla de *Moringa oleífera*) para la eliminación de coliformes fecales encontrando remoción de 77.1% con una dosis óptima 2.75 mg/l.

Dentro de la revisión bibliografía se evidencia la combinación de sistemas de tratamiento para la eliminación de microorganismos. Algunos trenes de tratamiento compactos combinan filtración, ya sea por membranas o medio granular, desinfección UV y ozonización. Las caracterizaciones demostraron que estos dispositivos pueden tratar agua lluvia recolectada para uso potable de excelente calidad (Dao et al., 2013, 2017; Y. Kim et al., 2017). La utilización de

agentes naturales como desinfectantes demostraron ser factibles en contextos institucionales, pero hay que seguir estudiándolos para el tratamiento específico de agua lluvia del edificio E3T.

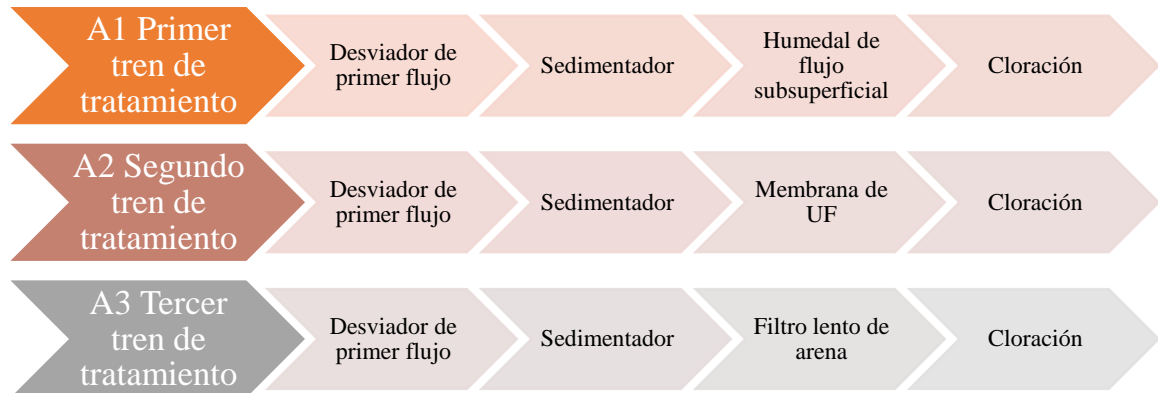
4.2 Propuesta de trenes de tratamiento para el edificio de E3T

Para el tratamiento de agua lluvia captada en el edificio E3T se proponen los siguientes trenes de tratamiento con potencial para alcanzar los estándares de calidad del agua lluvia para su posterior uso en la descarga de instalaciones sanitarias, servicio de aseo y riego de cultivos.

Los trenes de tratamiento propuestos constan de una fase de pretratamiento, seguida de una fase de tratamiento y una fase de desinfección. A continuación, se presenta una justificación de cada una de las tecnologías propuestas para los tres trenes de tratamiento. Todos los trenes propuestos cuentan con desviador del primer flujo, el cual desviará los primeros mm de precipitación ayudando a reducir SDT, SST y turbiedad; seguido de un sedimentador, para reducir los niveles de turbiedad, sólidos, coliformes totales y *E. coli* y un sistema de cloración que permita eliminar microorganismos y garantizar un efecto de desinfección residual. Cada tren propuesto varía únicamente en el tratamiento donde se proponen diferentes procesos de filtración (ver Figura 8).

Figura 8

Trenes de tratamiento propuestos para la evaluación mediante análisis multicriterio



En el primer tren se propuso incluir un humedal de flujo subsuperficial, que podría reducir la concentración de parámetros como SST, N, y contaminantes microbiológicos. Para el segundo tren de tratamiento se planteó una membrana de ultrafiltración a flujo por gravedad para eliminar bacterias, virus, material coloidal, SST y SDT. En el tercer tren se propuso filtración lenta en arena, teniendo en cuenta su bajo costo y eficacia para la eliminación de coliformes, turbiedad, SST y SDT.

4.2.1 Selección de criterios y subcriterios

La Tabla 5 presenta los criterios y subcriterios más empleados para la selección de tecnologías de tratamiento de aguas residuales, de acuerdo con la revisión de literatura realizada. Se incluyeron cinco (5) criterios principales (económico, técnico, administrativo, ambiental y social) y 44 subcriterios. La elección de criterios y subcriterios de decisión depende del propósito que se requiere lograr con la selección de los trenes de tratamiento y el contexto. Por consiguiente, lo que se busca con esta selección de tecnología es que sea apta para el tratamiento de agua lluvia,

EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DEL AGUA LLUVIA DEL E3T61

que sea para uso no potable y remueva contaminantes fisicoquímicos y microbiológicos presentes en el agua a tratar. Mediante la revisión de literatura se encontró que los criterios más empleados son el técnico, económico y ambiental, además se evidencia que el criterio técnico y el ambiental son similares dado que estos están relacionados con la idoneidad y eficiencia del proceso de tratamiento. El criterio económico es influyente en la implementación de la tecnología mostrando los costos directos incurridos en esta. Por otra parte, el criterio administrativo juega un papel muy importante en selección de la tecnología dado que muestra las habilidades, destrezas e insumos que se requieren en su operación.

Tabla 5

Criterios y subcriterios empleados en la selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales

Criterio	Subcriterio	Referencia
Económicos	Costo inversión inicial	(Pophali et al., 2011), (Ilangkumaran et al., 2013), (Adar et al., 2021), (Eseoglu et al., 2022), (Zhang et al., 2019), (Molinos-Senante et al., 2014), (Wei et al., 2020)
	Costo operación y mantenimiento	(Pophali et al., 2011), (Ilangkumaran et al., 2013), (Adar et al., 2021), (Eseoglu et al., 2022), (Zhang et al., 2019), (Molinos-Senante et al., 2014), (Wei et al., 2020)
	Área requerida	(Pophali et al., 2011), (Ilangkumaran et al., 2013), (Adar et al., 2021), (Eseoglu et al., 2022), (Zhang et al., 2019), (Molinos-Senante et al., 2014), (Arroyo & Molinos-Senante, 2018), (Wei et al., 2020)
	Costo de por residuos generados (lodos)	(Eseoglu et al., 2022)
	Ahorro de energía	(Eseoglu et al., 2022)
Técnicos	Remoción SDT	(Pophali et al., 2011), (Ilangkumaran et al., 2013)
	Recuperación del permeado	(Pophali et al., 2011)
	Tiempo de tratamiento	(Pophali et al., 2011)
	Capacidad de caudal	(Pophali et al., 2011)
	Manejo de lodos (generación de lodos)	(Pophali et al., 2011), (Ilangkumaran et al., 2013), (Adar et al., 2021), (Eseoglu et al., 2022), (Molinos-Senante et al., 2014), (Arroyo & Molinos-Senante, 2018), (Wei et al., 2020)
	Remoción de SS	(Pophali et al., 2011), (Ilangkumaran et al., 2013), (Eseoglu et al., 2022), (Molinos-Senante et al., 2014), (Arroyo & Molinos-Senante, 2018)
	Remoción de DQO	(Pophali et al., 2011), (Eseoglu et al., 2022), (Zhang et al., 2019), (Wei et al., 2020)

EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DEL AGUA LLUVIA DEL E3T62

Criterio	Subcriterio	Referencia
	Remoción de DBO	(Pophali et al., 2011), (Ilangkumaran et al., 2013), (Eseoglu et al., 2022), (Molinos-Senante et al., 2014), (Arroyo & Molinos-Senante, 2018)
	Remoción de N	(Ilangkumaran et al., 2013), (Eseoglu et al., 2022), (Molinos-Senante et al., 2014), (Arroyo & Molinos-Senante, 2018), (Wei et al., 2020)
	Remoción de P	(Ilangkumaran et al., 2013), (Eseoglu et al., 2022), (Molinos-Senante et al., 2014), (Arroyo & Molinos-Senante, 2018)
	Vida útil de la tecnología	(Ilangkumaran et al., 2013), (Eseoglu et al., 2022), (Wei et al., 2020)
	Aplicabilidad	(Adar et al., 2021), (Eseoglu et al., 2022)
	Cumplimiento de normas estándar	(Adar et al., 2021)
	Resistencia a condiciones hidráulicas	(Adar et al., 2021)
	Resistencia a los choques de carga orgánica	(Adar et al., 2021)
	Flexibilidad de operación	(Adar et al., 2021), (Eseoglu et al., 2022), (Wei et al., 2020)
	Replicabilidad	(Eseoglu et al., 2022)
	Fiabilidad (confiabilidad)	(Eseoglu et al., 2022), (Molinos-Senante et al., 2014), (Arroyo & Molinos-Senante, 2018)
	Remoción de amonio	(Zhang et al., 2019), (Wei et al., 2020)
	Remoción de Sulfuros	(Wei et al., 2020)
	Remoción de Cianuro	(Wei et al., 2020)
	Remoción de fenol volátil	(Wei et al., 2020)
	Remoción de otros contaminantes	(Wei et al., 2020)
	Remoción de grasas y aceites	(Wei et al., 2020)
	Facilidad de operación	(Pophali et al., 2011), (Adar et al., 2021), (Eseoglu et al., 2022), (Zhang et al., 2019)
Administrativo	Nivel de preparación tecnológica	(Zhang et al., 2019)
	Dificultad de reconstrucción y ampliación	(Wei et al., 2020)
	Generación de olores	(Ilangkumaran et al., 2013), (Adar et al., 2021), (Eseoglu et al., 2022), (Molinos-Senante et al., 2014), (Arroyo & Molinos-Senante, 2018), (Wei et al., 2020)
	Impacto visual (consideración estética)	(Ilangkumaran et al., 2013), (Eseoglu et al., 2022), (Molinos-Senante et al., 2014), (Arroyo & Molinos-Senante, 2018)
Ambiental	Generación de gases (gas disuelto)	(Ilangkumaran et al., 2013), (Adar et al., 2021)
	Generación de ruido	(Adar et al., 2021), (Molinos-Senante et al., 2014), (Arroyo & Molinos-Senante, 2018)
	Consumo de energía	(Eseoglu et al., 2022), (Molinos-Senante et al., 2014), (Arroyo & Molinos-Senante, 2018)
	Reúso de agua	(Eseoglu et al., 2022), (Molinos-Senante et al., 2014), (Wei et al., 2020)
	Potencial para recuperar productos	(Molinos-Senante et al., 2014)
	Generación de espuma	(Wei et al., 2020)
	Requerimiento de mano de obra	(Eseoglu et al., 2022)
Social	Aceptabilidad social	(Eseoglu et al., 2022), (Molinos-Senante et al., 2014), (Arroyo & Molinos-Senante, 2018)
	Beneficio social	(Eseoglu et al., 2022)

EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DEL AGUA LLUVIA DEL E3T63

Criterio	Subcriterio	Referencia
	Complejidad	(Molinos-Senante et al., 2014), (Arroyo & Molinos-Senante, 2018)

Para el propósito de esta investigación se definieron tres (3) criterios (económico, técnico y administrativo) y 10 subcriterios, los cuales se indican en la Tabla 6. La elección de los criterios fue basada en la revisión de literatura teniendo en cuenta los criterios más reportados y que se adaptaban mejor al contexto la UIS. Los subcriterios elegidos se adaptan a las necesidades específicas del contexto del edificio E3T de la UIS, en el cual se requiere que el sistema de tratamiento incurra en los menores gastos posibles, requiera la menor área superficial, ofrezca la mayor eficiencia en la eliminación de contaminantes y sea de fácil operatividad.

Tabla 6

Criterios y subcriterios de la herramienta de selección de tecnologías de tratamiento de agua lluvia en el edificio E3T

Criterio	Subcriterio	Indicadores	Tipo de dato
C1. Económicos	C1.1 Costo inversión inicial	US\$/m ³ . año	cuantitativo
	C1.2 Costo operación y mantenimiento	US\$/m ³ . año	cuantitativo
	C1.3 Costos ahorrados	US\$/m ³ . año	cuantitativo
C2. Técnicos	C2.1 Remoción SST	% eliminación	cuantitativo
	C2.2 Remoción de coliformes totales	% eliminación	cuantitativo
	C2.3 Área requerida	m ²	cuantitativo
	C2.4 Vida útil tecnología	años	cuantitativo
C3. Administrativo	C3.1 Facilidad de operación	Grado de facilidad (Alto-Moderado-Bajo)	cualitativo
	C3.2 Dificultad de reposición de elementos	Grado de dificultad (muy fácil-fácil-difícil)	cualitativo

Criterio económico: el criterio económico de los sistemas de sistemas de tratamiento de agua lluvia se relaciona con los costos, dado que refleja las utilidades del proceso empleado, dentro

EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DEL AGUA LLUVIA DEL E3T64

de esta categoría se encuentran los costos de inversión, costo de operación y mantenimiento y los costos ahorrados.

- Costos de inversión: hacen referencia a los costos de la construcción del tren de tratamiento, los equipos utilizados para su implementación, el costo de área y todos los costos relacionados con la inversión inicial.
- Costos de operación y mantenimiento: estos costos hacen referencia a los necesarios para el funcionamiento y puesta en marcha del tren de tratamiento, los insumos utilizados en la operación, costos de reposición de las tecnologías y los costos de mantenimiento de estas.
- Costos ahorrados: son aquellos costos evitados, como los costos evitados por el consumo de agua potable.

Criterio técnico: se relaciona con requisitos que debe reunir la tecnología para garantizar su funcionamiento, calidad y eficiencia. Dentro de esta categoría se encuentran remoción de SST, remoción de coliformes totales, área requerida y vida útil de la tecnología.

- Remoción de SST: mide la eficiencia de remoción de SST que tiene la tecnología de tratamiento seleccionada.
- Remoción de coliformes totales: mide la eficiencia de remoción de coliformes totales que tiene la tecnología de tratamiento seleccionada.
- Área requerida: este subcriterio tiene en cuenta el área que requiere la tecnología de tratamiento para su construcción.
- Vida útil: es el periodo de tiempo que se espera utilizar el sistema de tratamiento de aguas lluvia.

Criterio administrativo: hace referencia a los recursos internos (talento humano, medios tecnológicos, entre otros.) en los que se incurre la institución para que sea posible la puesta en marcha del sistema de tratamiento de agua lluvia. Dentro de esta categoría se encuentra facilidad de operación y dificultad de reposición de elementos del tren de tratamiento.

- Facilidad de operación: refleja el nivel de complejidad de operación de la tecnología, si se requiere de personal calificado o un profesional que se encargue de tiempo completo de la operación de la tecnología.
- Dificultad de reposición de elementos: hace referencia al nivel de complejidad para hacer el recambio o reposición de elemento, accesorio o pieza de la tecnología seleccionada.

4.2.2 Resultados del AHP

Como se describió en la sección 3.2, a partir de la encuesta realizada a través del Formulario de Google, se obtuvieron 22 respuestas. Sin embargo, para el análisis mediante la herramienta de AHP, solo se tuvieron en cuenta los resultados de 12 participantes. El resto de colaboradores fueron descartados porque el coeficiente de consistencia en sus respuestas fue mayor al máximo admisible (5% y 9%) para matrices de orden 3x3 y 4x4, respectivamente, indicado por Saaty (Wei et al., 2020). Después de aplicar AHP se obtuvieron los pesos de los criterios y subcriterios, los cuales se proporcionan en la Tabla 7. Los resultados de AHP arrojaron que el criterio técnico es el factor con mayor influencia ($C2= 0.4077$), seguido del criterio económico ($C1= 0.3853$) y el de menor grado de importancia es el criterio administrativo ($C3= 0.2070$). Lo anterior evidencia que no hay criterios dictadores en el proceso de selección.

EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DEL AGUA LLUVIA DEL E3T66

Tabla 7

Pesos de criterios y subcriterios obtenidos con AHP

Criterio	Peso	Subcriterio	Peso
C1. Económicos	0.3853	C1.1 Costo inversión inicial	0.2658
		C1.2 Costo operación y mantenimiento	0.4245
		C1.3 Costos ahorrados	0.3097
C2. Técnicos	0.4077	C2.1 Remoción SST	0.2216
		C2.2 Remoción de coliformes totales	0.3099
		C2.3 Área requerida	0.2068
		C2.4 Vida útil tecnología	0.2617
C3. Administrativo	0.2070	C3.1 Facilidad de operación	0.4771
		C3.2 Dificultad de reposición de elementos	0.5229

Por lo tanto, el criterio técnico se destaca en la selección de la tecnología apropiada para el tratamiento de agua lluvia y dentro de sus subcriterios, el C2.2 “Remoción de coliformes totales”, con un peso de 0.3099, es el más importante. La importancia de este subcriterio radica en que es un indicador que representa la forma de controlar la eficiencia en remover cargas contaminantes que pongan en riesgo la salud pública. El criterio económico se encuentra en el segundo lugar de importancia (peso de 0.3853). Se observa que el subcriterio económico más importantes es el C1.2 “Costo operación y mantenimiento”, con un peso de 0.4245. Este se considera más influyente que los costos del capital de inversión y que el costo ahorrado en el tratamiento del agua lluvia, dado que influye directamente en la toma de decisiones a la hora de implementar y poner en marcha la tecnología propuesta. De acuerdo con los expertos consultados, el criterio administrativo es considerado el criterio menos influyente que los anteriores en la toma de decisiones en la elección de tecnología para el tratamiento de agua lluvia para este caso de estudio.

4.2.3 Resultados de TOPSIS

Los pesos obtenidos con AHP se utilizaron en TOPSIS para comparar los criterios y subcriterios respecto de las tecnologías propuestas y determinar las mejores alternativas para el contexto del edificio E3T de la UIS. Como se indicó en la sección 3.2, para ello se tuvo en cuenta datos reales obtenidos de la literatura, resultados del prediseño y la entrevista a un experto en procesos de tratamiento de agua mediante membranas (ver Tabla 8). Una vez aplicado TOPSIS, se determinó que la alternativa A3 (filtro lento de arena) es la solución ideal positiva y la alternativa A1 (humedal de flujo subsuperficial) es la solución anti-ideal negativa con una distancia de 0.0446 y 0.0459 respectivamente.

Tabla 8

Evaluación de las alternativas de tratamiento del agua lluvia a partir de los subcriterios técnicos, económicos y administrativos.

Alternativas	Costos de inversión (US\$/m ³ . año)	Costos de operación y mantenimiento (US\$/m ³ . año)	Costos ahorrados (US\$/m ³ . año)	Remoción de SST (%)	Remoción de coliformes totales (%)	Área requerida (m ²)	Vida útil (años)	Facilidad de operación	Dificultad de reposición de elementos
A1	0.41 ¹	0.02 ¹	0.28	87 ¹	79 ⁴	4171.3	25 ^{1,7}	2	3
A2	0.36 ²	0.014 ²	0.33	100 ⁵	99.3 ⁵	4.9	10	3	2
A3	0.033 ³	0.02 ⁴	0.65	63 ⁶	99.9 ³	110.7	25 ^{3,7}	3	2

¹(Arias & Brown, 2009) ²(Kristjánisdóttir et al., 2023) ³(Sánchez et al., 2012) ⁴(Rodríguez & Corrales, 2016) ⁵(Ortega Sandoval et al., 2019)

⁶(Shatnawi, 2019) ⁷(RAS, 2017)

Los resultados de TOPSIS (ver Tabla 9) revelaron que los tratamientos A3 y A2 (membrana de ultrafiltración), con una proximidad relativa de 0.7587 y 0.6462, respectivamente, se encuentran dentro de las dos primeras posiciones de puntuación, indicando que estas dos tecnologías son las mejores alternativas para el tratamiento de agua lluvia del edificio E3T.

EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DEL AGUA LLUVIA DEL E3T68

La selección de la tecnología A3 como solución ideal positiva, se asocia a que presenta un menor costo de inversión, de aproximadamente 0.033 USD\$/m³ (Sánchez et al., 2012) y menores costos de operación y mantenimiento (0.02 USD\$/m³) (Sánchez et al., 2012). En cuanto a la remoción de coliformes totales, tiene una eficiencia del 99.9% (Sánchez et al., 2012). Además, requiere de menor área superficial que el humedal, es fácil de operar y es relativamente no dispendioso el cambio de sus componentes. Los costos de inversión, costos de operación y mantenimiento y prediseño de tecnologías para el área requerida de cada tecnología se encuentran en el Apéndice F. Los componentes detallados de los resultados obtenidos con AHP y TOPSIS se encuentran en el Apéndice G.

Tabla 9

Proximidad relativa y ranking de TOPSIS

Alternativas	Proximidad relativa	Ranking
A1	0.2537	3
A2	0.5354	2
A3	0.7515	1

4.3 Análisis del desempeño técnico de las tecnologías para tratamiento del agua lluvia

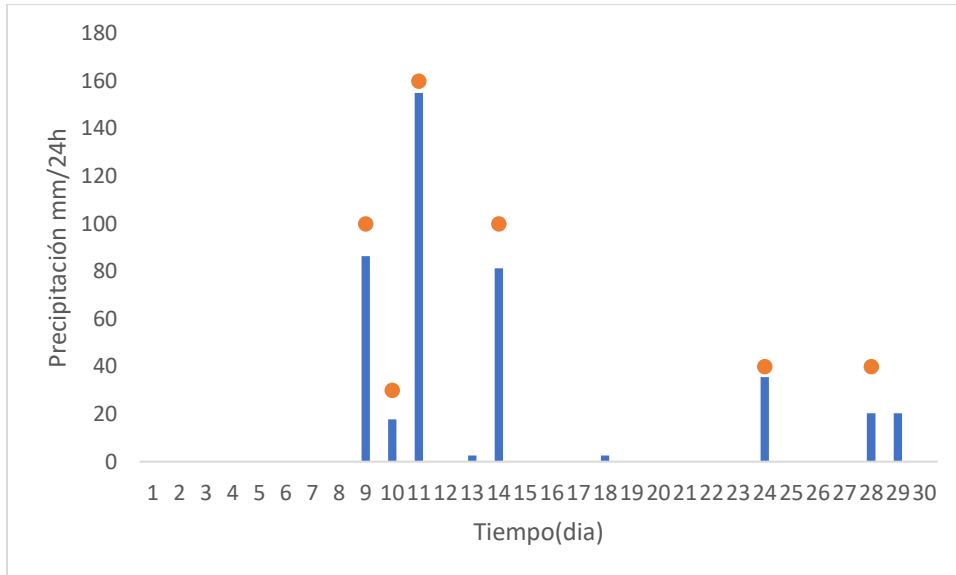
4.3.1 Calidad del agua lluvia captada en el Edificio E3T

El promedio de lluvia total diario en Bucaramanga durante el periodo de muestreo (septiembre de 2023), específicamente en el campus principal de la UIS fue de 46.85 mm con

nueve (9) días de lluvia, con periodos secos que variaron entre tres (3) y ocho (8) días (ver Figura 9).

Figura 9

Precipitación diaria registrada en estación climatológica de la UIS¹



Nota: ¹ Tomado de (Cavadia, 2024). El color naranja indica los días de recolección de las muestras de agua lluvia.

La Tabla 10 muestra los resultados de la estadística descriptiva para los datos de calidad del agua lluvia cruda. En el Apéndice H se presentan los resultados de todos los parámetros analizados durante los seis (6) eventos de precipitación captados. Los resultados de pH y conductividad eléctrica reflejaron valores típicos comparados con otras instituciones educativas (Amaral et al., 2017; López Zavala et al., 2016; Tran et al., 2021b) con rangos de 7.28-7.76 y 87.03-172.13 $\mu\text{S}/\text{cm}$, respectivamente. La turbiedad, en cambio, muestra valores atípicos con rangos entre 11.87-270 UNT y se encuentra por encima de las experiencias encontradas (Amaral et al., 2017; Kabbashi et al., 2020; R.-H. Kim et al., 2007; Tran et al., 2021b, 2021a; Yulistyorini

EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DEL AGUA LLUVIA DEL E3T70

et al., 2018). Los valores reportados se deben a que los eventos de lluvia presentaron altas intensidades con rangos de 5.08 mm/h -172.72 mm/h (Cavadia, 2024), precedidos de periodos secos, que pudieron promover el arrastre de contaminantes a través del sistema de captación. En otros estudios, se ha demostrado que cuanto más extenso sea el período seco entre eventos de lluvia, mayor es la cantidad de contaminantes depositados en las áreas de captación del agua lluvia (Abbasi & Abbasi, 2011).

Los coliformes totales estuvieron entre 38730 y 41600 NMP, valores atípicos al contrastar con aquellos reportados en la mayoría de instituciones educativas (Y. Kim et al., 2017; López Zavala et al., 2016; Rodríguez & Corrales, 2016; Tran et al., 2021b; Yulistyorini et al., 2018), pero menores al caso reportado por Murakami & Moruzzi, (2013), quienes determinaron una concentración promedio de 130000 NMP influenciada posiblemente por la combinación de agua lluvia colectada a través del tejado y del suelo lo cual contribuyó seguramente a que los microorganismos pueden sobrevivir fuera de ambientes entéricos y resistir variaciones de temperatura.

Los valores encontrados para DBO₅ y DQO se encuentran entre 12.3-139 mg O₂/L y 38.70 - 353 mg O₂/L, respectivamente. Estos valores se consideran elevados para el agua lluvia, en comparación con otros casos reportados de 19.38 mg/L para DBO₅ y 41.4 mg/L para DQO (Ortega Sandoval et al., 2019), lo cual puede deberse a la y arrastre de hojas a las áreas de captación. El nitrato presentó concentraciones de 0.075-0.327 mg NO₃ -N/L y se encuentra por debajo de los casos reportados en otras instituciones educativas (Chiang et al., 2013; López Zavala et al., 2016; Shafiquzzaman et al., 2020; Yulistyorini et al., 2018; Zanin et al., 2018).

Aunque se evidenciaron trazas de Pb en el agua lluvia cruda, que podrían atribuirse a la circulación de vehículos en el área de captación (Chiang et al., 2013), en todos los eventos de

EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DEL AGUA LLUVIA DEL E3T71

precipitación considerados en este estudio, las concentraciones reportadas estuvieron por debajo de 0.005mg/L. Por otra parte, el agua lluvia tiene alta concentración de SST en la mayoría de los eventos de precipitación, lo cual podría relacionarse con la presencia de hierba y asfalto en las áreas de captación (Ortega Sandoval et al., 2019). Algunos parámetros como turbiedad, DBO₅, DQO, nitrato y SST, reflejaron coeficientes de variación superiores a 50%, los cuales indican alta dispersión en los datos. Se infiere que esta variabilidad podría relacionarse con la ocurrencia de periodos secos prolongados previos a los muestreos del agua lluvia cruda (ver Figura 9), que contribuyeron a elevar la concentración de contaminantes en el agua lluvia debido a la acumulación de estos en las áreas de captación.

Tabla 10

Calidad del agua lluvia cruda captada en el edificio E3T de la UIS

Parámetro	Unidad	n	Promedio	D.E.	C.V. (%)	Min	Max
Turbiedad	UTN	6	84.08	92.99	110.6%	11.87	270.00
pH		6		0.17	2.3%	7.28	7.76
C.E.	μS/cm	6	130.03	34.87	26.8%	87.03	172.13
C.T.	NMP/100ml	6	40941.67	1648.79	4.0%	38730.00	43520.00
DBO₅	mgO ₂ /L	6	73.88	61.88	83.8%	7.54	130.03
DQO	mgO ₂ /L		167.47	118.81	70.9%	38.70	353.00
Nitrato	mg NO ₃ - N/L	6	0.18	0.09	52.8%	0.08	0.33
Pb	mg/L	6	<0.005 ¹				
SST	mg/L	6	136.17	123.16	90.4%	7.40	361.00

Nota: ¹Para este caso de estudio no se trabajó con el promedio dado que las concentraciones de Pb en todos los casos estuvieron por debajo del límite de cuantificación del método empleado por el laboratorio externo. n: número de datos. C.E.: conductividad eléctrica, C.T.: coliformes totales, D.E.: desviación estándar, C.V.: coeficiente de variación.

4.3.2 Evaluación de los prototipos a escala de laboratorio

A continuación, se presentan los resultados de los dos (2) experimentos para tratar el agua lluvia recolectada en el edificio E3T a escala de laboratorio. En la Figura 10, se presenta el desempeño de cada etapa de tratamiento de los trenes evaluados en este estudio, para los nueve (9) parámetros analizados y la Tabla 11 muestra el rendimiento y eficiencia en la eliminación de estos contaminantes concretos.

Tabla 11

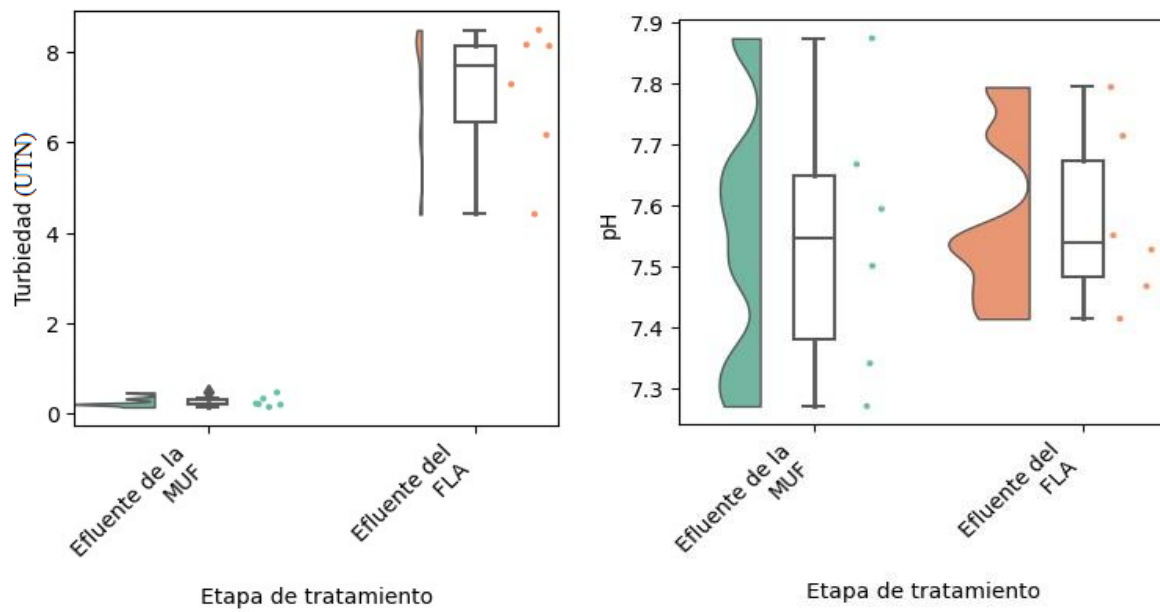
Evaluación del desempeño de la membrana de ultrafiltración (UF) y el filtro lento de arena

Parámetro	Unidad	n	Agua lluvia cruda afluente	Sedimentador efluente	Membrana UF efluente	Filtro lento de arena efluente	% Remoción Membrana UF	% Remoción filtro lento de arena
Turbiedad	UTN	6	84.08	24.95	0.26	7.10	99.7%	91.6%
pH		6	-	7.03-7.70	7.27-7.87	7.41-7.79	-	-
C.E	µS/cm	6	130.03	129.66	130.53	176.84	-	-
C.T	NMP/100ml	6	40941.67	-	942.70	11803.72	97.7%	71.2%
DBOs	mgO ₂ /L	6	73.88	-	11.18	0.22	84.9%	99.7%
DQO	mgO ₂ /L	6	167.47	-	50.68	10.42	69.7%	93.8%
Nitrato	mg NO ₃ -N/L	6	0.18	-	0.20	0.28	*	*
Pb	mg/L	6	<0.005 ¹	-	<0.005 ¹	<0.005 ¹	-	-
SST	mg/L	6	136.17	-	5.21	3.80	96.2%	97.2%

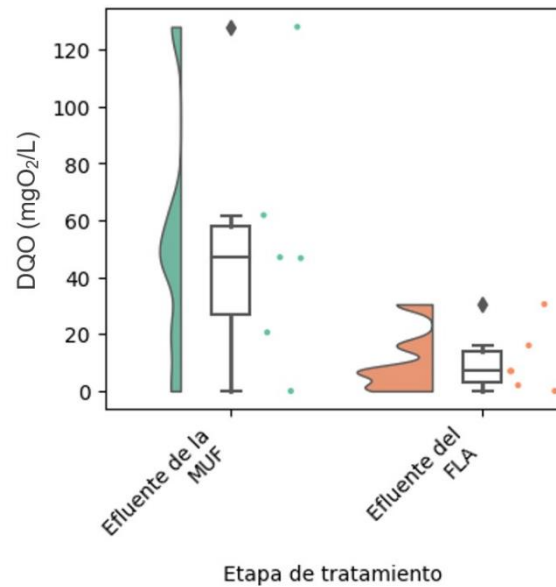
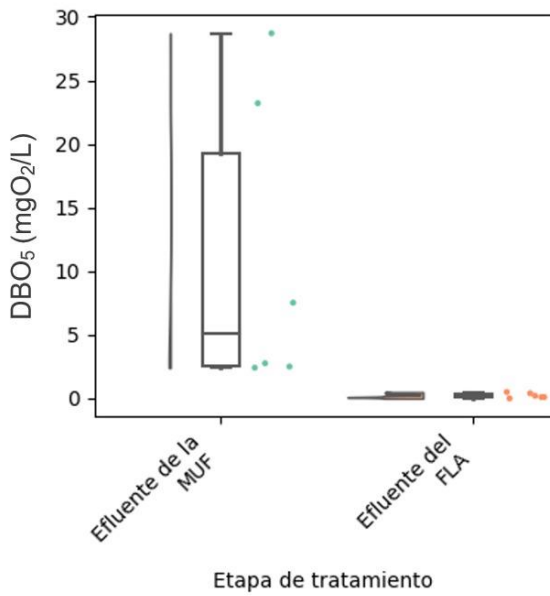
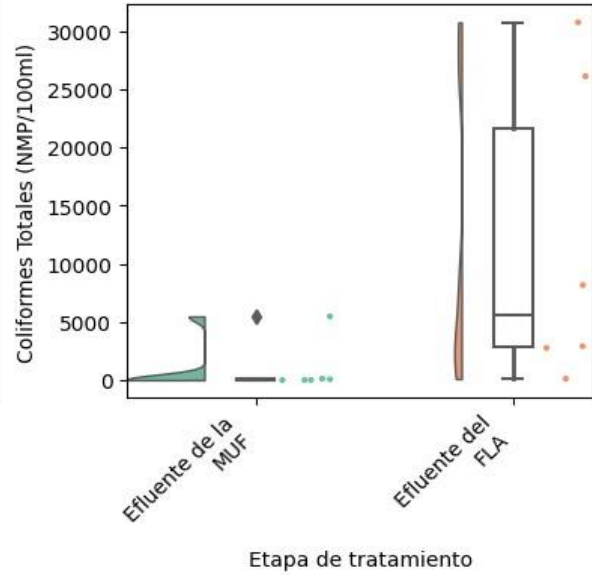
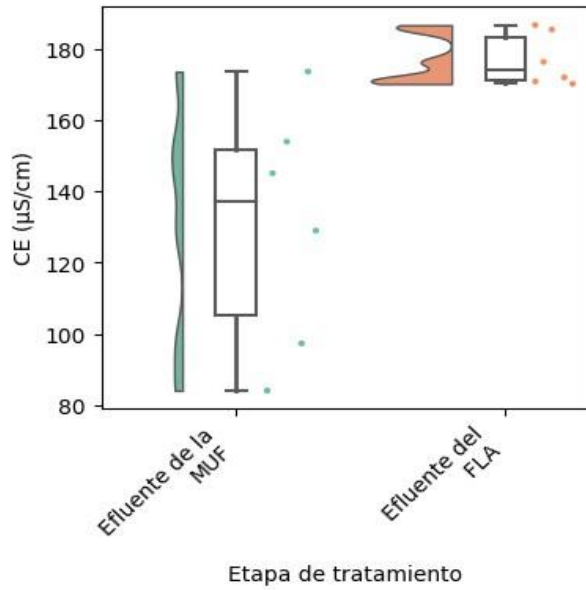
Nota: ¹ Para este caso de estudio no se trabajó con el promedio dado que las concentraciones de Pb en todos los casos estuvieron por debajo del límite de cuantificación del método empleado por el laboratorio externo. n: número de datos. C.E.: conductividad eléctrica, C.T.: coliformes totales, D.E.: desviación estándar, C.V.: coeficiente de variación. * no se obtuvieron eficiencias de remoción porque el efluente presentó valores superiores al afluente.

Figura 10

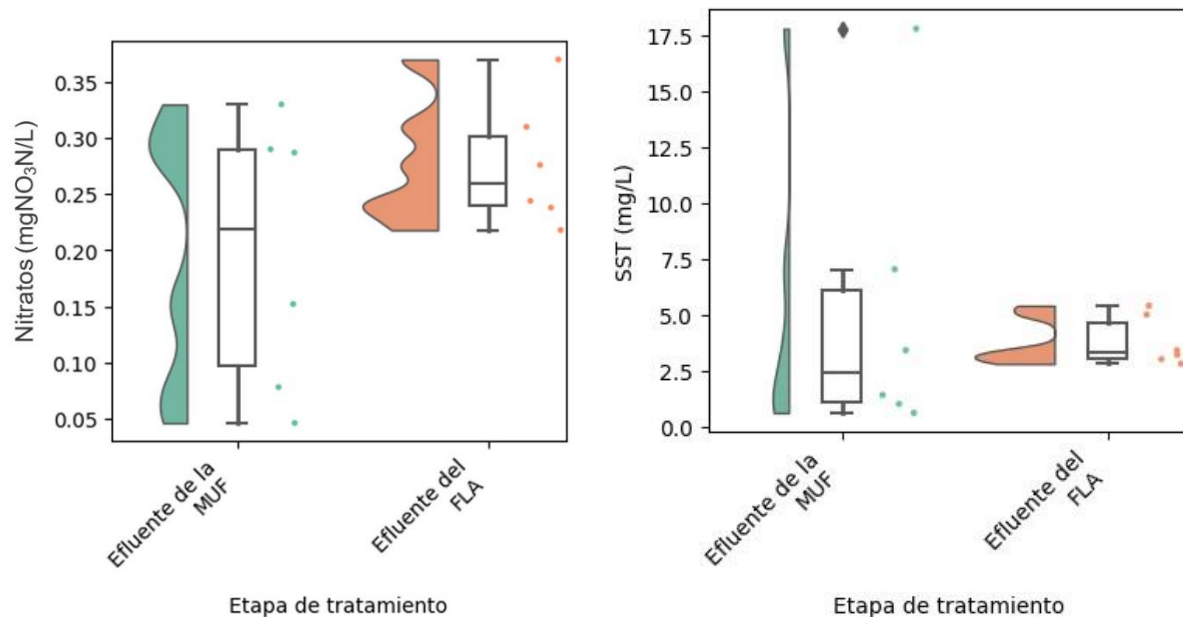
Desempeño de los prototipos a escala de laboratorio para el tratamiento del agua lluvia: turbiedad (UNT), pH, conductividad eléctrica (CE)($\mu\text{S}/\text{cm}$), DBO_5 (mgO_2/L), DQO (mgO_2/L), SST (mg/L) y Nitrato ($\text{mg NO}_3\text{-N}/\text{L}$)



EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DEL AGUA LLUVIA DEL E3T74



EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DEL AGUA LLUVIA DEL E3T75



Nota: MUF membrana de ultrafiltración. FLA filtro lento de arena.

La membrana de UF mostró un porcentaje de remoción de turbiedad y coliformes totales de 99.7% y 97.7%, respectivamente, lo cual es similar a resultados de eficiencias reportados por otros estudios para esta tecnología de tratamiento de aguas lluvias (Miorando et al., 2017; Tran et al., 2021). La turbiedad del agua lluvia tratada se redujo en promedio de 84.08 a 0.26 UNT. El pH y la conductividad eléctrica no cambiaron debido a ningún tratamiento; se midió un valor de pH de 7.03 a 7.70 antes del tratamiento y de 7.27 a 7.87 después del proceso de filtración con la membrana de UF. La DBO₅ tuvo en promedio una reducción del 84.9%. La DQO mostró una reducción significativa por encima del 50% para la membrana de UF concordante con lo reportado por Miorando et al., (2017), el cual obtuvo una reducción del 50.4% de DQO para el tratamiento de agua lluvia para uso potable.

Los resultados mostraron que el rendimiento del filtro lento de arena en general fue eficiente. Su funcionamiento y operación por más 20 días favoreció la formación de la capa biológica, lo cual contribuyó con la eliminación de más de la mitad de coliformes totales. Se

EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DEL AGUA LLUVIA DEL E3T76

reportó en el efluente promedio de turbiedad, coliformes totales, DBO₅, DQO, y SST de 7.10 UTN, 11803.72 NMP/L, 0.22 mg/L, 10.42 mg/L y 3.80 mg/L, respectivamente y las eficiencias de remoción correspondientes fueron de 91.6 %, 72.1 %, 99.7 % y 93.8 % y 97.2%. Para el filtro lento de arena se observó un aumento de la conductividad eléctrica en todas las corridas realizadas, su aumento podría atribuirse a dos factores: el primero, el tipo de material utilizado como medio de soporte (grava de peña), lo cual contribuye con la presencia de carbonatos (G Castaño, J Latorre, 1998) y el segundo, a su corto tiempo operación el cual genera procesos de lixiviación del tipo de material filtrante utilizado (Köster et al., 2023).

En el caso del nitrato, en ninguna de las tecnologías se observó una reducción, por el contrario, en algunas corridas se evidencia un incremento como se observa en la Figura 10. Se puede inferir que el aumento de este parámetro en el agua lluvia es posiblemente a la presencia de N en diferentes formas (i.e., N orgánico, N amoniacal) en el agua, los cuales en presencia de oxígeno y carbono inorgánico, pueden ser oxidados a nitratos por acción microbiana (Pacheco-Avila et al., 2002). Por lo tanto, a futuro se recomienda el estudio del N en diferentes formas para comprender su dinámica en el tratamiento del agua lluvia. Para el Pb, en ambos tratamientos el efluente presentó valores <0.005mg/L lo que indica que este metal no está presente en el agua lluvia recolectada en el edificio E3T.

A partir de la aplicación de la prueba de Shapiro-Wilk se evidenció que la mayoría de los datos de los parámetros analizados tienen distribución normal (estadísticamente significativo para un α de 0.05) (ver Tabla 12). Se observó que para los coliformes totales, DBO₅ y SST en el efluente de la membrana de UF la distribución de los datos no es normal.

Tabla 12

Resultados de prueba de normalidad Shapiro-Wilk

Parámetro	Etapas de tratamiento	Valor P	¿Los datos tienen distribución normal?
Turbiedad	Efluente de la MUF	0.2372	Sí
	Efluente del FLA	0.2057	Sí
DBO₅	Efluente de la MUF	0.03688	No
	Efluente del FLA	0.4522	Sí
DQO	Efluente de la MUF	0.5794	Sí
	Efluente del FLA	0.0713	Sí
Nitrato	Efluente de la MUF	0.2639	Sí
	Efluente del FLA	0.5175	Sí
Coliformes totales	Efluente de la MUF	3.487x10 ⁻⁵	No
	Efluente del FLA	0.08193	Sí
SST	Efluente de la MUF	0.0276	No
	Efluente del FLA	0.0926	Sí

Nota: MUF: membrana de ultrafiltración. FLA: filtro lento de arena

Posteriormente se aplicó la prueba T pareada a los parámetros que sí cumplían con la distribución normal para el efluente de las dos tecnologías (i.e., turbiedad, DQO y NO₃). Para los demás parámetros (i.e., coliformes totales, DBO₅, SST) que no cumplieron la distribución normal, se aplicó la prueba de los rangos con signo de Wilcoxon obteniendo los siguientes resultados (ver Tabla 13).

Tabla 13

Resultados de pruebas de comparación de medias entre los efluentes de la membrana de ultrafiltración (MUF) y el filtro lento de arena (FLA)

Parámetro	Prueba estadística	Valor P	¿Diferencia de medias entre los dos tratamientos?
Turbiedad	Prueba T pareada	0.0001293	Sí
DQO	Prueba T pareada	0.05078	No
DBO₅	Prueba de los rangos con signo de Wilcoxon	0.03603	Sí
Nitratos	Prueba T pareada	0.1249	No

EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DEL AGUA LLUVIA DEL E3T78

Coliformes totales	Prueba de los rangos con signo de Wilcoxon	0.03603	Sí
SST	Prueba de los rangos con signo de Wilcoxon	1	No

Los rendimientos de eliminación de contaminantes en los dos procesos de tratamiento probados se compararon mediante una prueba T pareada y la prueba de los rangos con signo de Wilcoxon y se encontró que los parámetros DQO, nitratos y SST no presentan diferencias estadísticamente significativas entre sus medias, contrario a lo hallado para turbiedad, DBO₅, y coliformes totales. Ambos tratamientos lograron más del 90% y 70% de eliminación de turbiedad y coliformes totales, respectivamente; y mostraron diferencias significativas entre los dos procesos analizados (i.e., valores de p de 0.0001293 y 0.03603). La mayor eficiencia de eliminación de turbiedad y coliformes totales se logró a través de la membrana de UF, lo que podría atribuirse al tamaño nominal del poro de la membrana. La remoción de DBO₅ fue de más del 80% para los dos procesos y mostró diferencias significativas ($p = 0.03603$), con las concentraciones más bajas registradas en el efluente del filtro lento de arena. Se puede atribuir este comportamiento a que los microorganismos activos en el lecho de arena requieren materia orgánica para su metabolismo, lo cual aumentó la actividad biológica en el lecho de arena y mejoró significativamente la remoción de este parámetro (G Castaño, J Latorre, 1998).

4.3.3 Comparación de calidad del agua lluvia tratada con estándares internacionales

Los datos obtenidos fueron comparados con normas y guías usadas en el contexto internacional como referencia para el reúso de aguas residuales en la descarga de sanitarios y el riego agrícola (ver Tabla 14). Las normativas utilizadas corresponden a directrices canadienses para el agua doméstica recuperada para uso en inodoros y urinarios emitidos por el Ministerio de Salud de Canadá (Health Canada, 2010), la Resolución Conjunta SVDS/SMS N° 09/2014 formulada por la Secretaria de Salud de Campinas (Brasil) (CAMPINAS, 2014), las directrices para la reutilización del agua emitidas por

EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DEL AGUA LLUVIA DEL E3T79

la EPA (Estados Unidos) (EPA, 2012) y la guía para la aplicación del reutilización de las aguas depuradas emanada por el Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino en España (Marino, 2003).

Tabla 14

Normativa internacional para el aprovechamiento de agua lluvia

Parámetro	Unidad	Descarga sanitarios				Riego agrícola (consumo crudo)		Riego áreas verdes		
		[A] Canadá	[B] Brasil	[C] USA - EPA	[D] España	[C] USA - EPA	[D] España	[B] Brasil	[C] USA - EPA	[D] España
Turbiedad	NTU	5	5	2	2	2	10	5	—	10
pH		—	—	6.0-9.0	—	—	100	—	6.0-9.0	—
C.E	µS/cm	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Coliformes Totales	NMP/100ml	200	200	200	0	0	0	200	200	200
DBO₅	mgO ₂ /L	20	30	30	—	10	—	30	30	—
DQO	mgO ₂ /L	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Nitrato	mg NO ₃ -N/L	—	—	—	2-12.0	—	—	—	—	—
Pb	mg/L	—	—	—	—	—	—	—	—	—
SST	mg/L	20	30	30	10	—	20	30	30	20

[A] Canadian Guidelines for Domestic Reclaimed Water for Use in Toilet and Urinal Flushing(Health Canada, 2010). [B] Resolución Conjunta SVDS/SMS N° 09/2014.(CAMPINAS, 2014) [C] Guidelines for Water Reuse(EPA, 2012) [D] Guía para la Aplicación del R.D. 1620/2007 por el que se establece el Régimen Jurídico de la Reutilización de las Aguas Depuradas(Marino, 2003). C.E.: conductividad eléctrica.

El pH es uno de los parámetros menos exigidos para el reúso agua residual en descarga de sanitarios, riego agrícola y de áreas verdes. Se puede observar que los resultados obtenidos tanto para el efluente del filtro lento de arena, como para la membrana de UF se encuentran dentro de los niveles establecidos por la EPA para descarga de sanitarios, riego agrícola y de áreas verdes. Además, no se reportan límites para el pH en el resto de las normativas consultadas. Los valores de turbiedad determinados en el efluente de la membrana de UF, en ningún caso sobrepasaron las 2 UNT, correspondiente al límite máximo establecido por la EPA y el Ministerio de Medio

EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DEL AGUA LLUVIA DEL E3T80

Ambiente y Medio Rural y Marino en España (Marino, 2003) para el reúso de agua lluvia en riego de cultivos, descarga de sanitarios y de 10 UNT para riego de áreas verdes emitido por Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino en España (Marino, 2003). Por otra parte, se evidencia que la turbiedad reportada en el efluente del filtro lento de arena no cumple para algunas normativas y presenta restricciones para los usos establecidos dado que sobrepasan los valores máximos permisibles establecidos por la EPA (2012) y Marino (2003). Para los parámetros de CE, DQO, Pb y nitratos no hay límites establecidos para la normatividad consultada. El aporte de DBO₅ en el agua cruda es alto en comparación con otros estudios (Ortega Sandoval et al., 2019), pero queda claro que las tecnologías probadas reducen significativamente la carga contaminante cumpliendo satisfactoriamente con la calidad del agua lluvia requerida por las normativas de referencia. Por el contrario, los coliformes totales en los dos efluentes no cumplen con los límites propuestos para reúso de agua en algunas normatividades, por lo cual es indispensable un proceso de desinfección posterior que garantice agua libre de patógenos, así como un efecto residual que garantice un uso seguro.

En general, los parámetros que incumplieron las normativas de referencia fueron turbiedad para el filtro lento y coliformes totales para las dos tecnologías probadas. Por lo anterior, es indispensable controlar estos dos parámetros en especial la turbiedad dado que afecta directamente la eficiencia de eliminación de partículas en las unidades de filtración en medio granular colmatando el sistema y afecta indirectamente la eliminación de agentes patógenos en la desinfección lo cual puede poner en riesgo la salud del ser humano (OMS, 2022).

4.3.4 Propuesta del tren de tratamiento para agua lluvia captada en el edificio E3T

Analizando las dos tecnologías de tratamiento, la membrana de UF tiene desempeño sobresaliente reduciendo la turbiedad y coliformes totales. El filtro lento de arena demostró una

EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DEL AGUA LLUVIA DEL E3T81

alta eficiencia en la eliminación de materia orgánica biodegradable, pero requiere un tratamiento previo como la adición de coagulación y floculación que permita la reducción de la turbiedad el cual también podría contribuir a la reducción de los coliformes. Para remoción de SST, ambas tecnologías proporcionan una reducción significativa. Para completar el tren de tratamiento, se requiere un proceso de desinfección que garantice la reducción del coliformes, pues ninguna de las tecnologías probadas ofrece una reducción del 100%. Con los resultados obtenidos queda en evidencia que cada tecnología tiene la capacidad de ofrecer agua de buena calidad para el uso de sanitarios, servicios de aseo y riego de cultivos y cada una presenta ventajas y desventajas en remoción de parámetros concretos. Sin embargo, para la propuesta de la mejor tecnología para el edificio E3T de la UIS, se tuvo en cuenta adicionalmente las características ya establecidas en el análisis multicriterio donde A3 ofrecía la mejor opción tecnológica. No obstante, con la puesta en marcha de los prototipos a escala de laboratorio se pudo comprobar que A2 (membrana de UF) ofrece mejores resultados de eliminación de contaminantes concretos y no requiere de un tratamiento adicional para reducción de turbiedad como si lo requiere el filtro lento de arena. La alternativa A2, además cumple con los subcriterios elegidos para su selección como requerir menor área superficial y menor costo de inversión y operación, reducción significativa de coliformes y SST, además su operación es relativamente sencilla, por lo cual se considera la opción adecuada para su implementación en el caso de estudio considerado en este trabajo de aplicación.

5. Conclusiones

Para el tratamiento de agua lluvia captada en el edificio E3T se propusieron tres (3) trenes de tratamiento con potencial para alcanzar los estándares de calidad del agua lluvia para su posterior uso en la descarga de instalaciones sanitarias, servicio de aseo y riego de cultivos. Los trenes de tratamiento propuestos constan de tres fases: pretratamiento, tratamiento y desinfección. Las tecnologías seleccionadas cuentan con desviador del primer flujo, seguido de un sedimentador, y un sistema de cloración. Cada tren propuesto cuenta con un sistema de tratamiento distinto, en

EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DEL AGUA LLUVIA DEL E3T83

donde para el primer tren de tratamiento (A1) se propone un humedal de flujo subsuperficial, para el segundo (A2) una membrana de ultrafiltración y para el tercer tren (A3) un filtro lento de arena.

Con el fin de facilitar la toma de decisiones para la implementación del sistema de aprovechamiento de agua lluvia en el edificio E3T, se aplicó análisis multicriterio, utilizando las metodologías AHP y TOPSIS. Con la aplicación de AHP se definieron 3 criterios de decisión (económicos, administrativos y técnicos) y 10 subcriterios. Los resultados de AHP arrojaron que el criterio técnico es el factor con mayor influencia $C2= 0.4077$ seguido del criterio económico con un peso $C1= 0.3853$ y el de menor grado de importancia es el criterio administrativo $C3= 0.2070$.

Los pesos obtenidos con AHP se utilizaron en TOPSIS. TOPSIS determinó que la alternativa A3 (filtro lento de arena) es la solución ideal positiva y la alternativa A1 (humedal de flujo subsuperficial) es la solución anti-ideal negativa con una distancia de 0.0446 y 0.0459 respectivamente. Los resultados mostraron que los tratamientos A3 y A2 (membrana de ultrafiltración), con una proximidad relativa de 0.7515 y 0.5354, respectivamente, son las mejores alternativas para el tratamiento de agua lluvia del edificio E3T.

Se evaluó el desempeño de los prototipos a escala de laboratorio para el tratamiento de agua lluvia. Para ello, se seleccionaron y evaluaron cuidadosamente los parámetros físicos, químicos y microbiológicos más empleados para analizar la calidad del agua lluvia, incluyendo pH, turbiedad, conductividad eléctrica, plomo, sólidos suspendidos totales, nitratos y coliformes totales. Estos parámetros fueron escogidos basándose en los resultados de investigaciones previas realizadas en el edificio E3T. Además, se tuvo en consideración la inclusión de parámetros como DBO_5 y DQO, los cuales fueron identificados como indicadores clave para los usos del agua tratada en el edificio, especialmente debido a la presencia de un techo verde que podría contribuir

EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DEL AGUA LLUVIA DEL E3T84

con compuestos orgánicos, tal como se evidenció en la revisión de literatura en la fase I del proyecto. Los trenes de tratamiento A2 y A3 mejoraron significativamente la calidad del agua lluvia. A2 redujo la turbiedad en un 97.7% y A3 en un 91.6%. En cuanto a los coliformes totales se evidenció mayor eficiencia de remoción en A2 con 97.7% respecto de A3 con 71.2%; para los dos casos es necesario la introducción de un proceso de desinfección que garantice la eliminación de microorganismos patógenos que no pongan en riesgo la salud del ser humano. Para la remoción de DQO y DBO₅ se evidenció que A3 tiene una ventaja superior que A2 con un 93.8% y 99.7%, pero en ambos casos se cumple con las normativas vigentes. Las tecnologías proporcionan una reducción significativa de SST por encima del 90%. Para el nitrato los datos reportados no son concluyentes por lo cual se recomienda a futuro estudios más detallados que permitan comprender la dinámica de las diferentes formas de N en el agua lluvia. Por último, para el Pb se evidencia que su presencia en el agua lluvia recolectada en el edificio E3T es imperceptible y no requiere su estudio a futuro, podría no ser prioritario si se mantienen las condiciones de captación en el sistema del edificio E3T.

Los resultados obtenidos muestran que la membrana de ultrafiltración es eficiente en la eliminación de contaminantes específicos, no necesita tratamiento adicional para reducir la turbiedad, requiere un área superficial reducida y tiene un costo de inversión de aproximadamente 0.036 USD/m², ligeramente superior al del filtro lento de arena, que es de alrededor de 0.033 USD/m². Además, presenta un menor costo de operación, aproximadamente 0.014 USD/m³, en comparación con las otras tecnologías propuestas. Por lo tanto, es la tecnología que mejor se adapta a las necesidades del edificio E3T y tiene el potencial de ofrecer agua lluvia tratada de buena calidad para el uso de sanitarios, servicios de aseo y riego de cultivos.

6. Recomendaciones

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en anteriores investigaciones y en este caso de estudio, se evidencia que es factible la implementación a futuro de la tecnología seleccionada a escala real. Además, con su implementación puede motivar a todos los edificios del campus universitario a duplicar y poner en marcha este tipo de tecnologías brindando alternativas para la adaptación a escenarios de escasez hídrica ofreciendo agua para diferentes usos.

Con el fin de poder mejorar los resultados obtenidos en el presente estudio, se recomienda a futuro estudios más detallados que permitan comprender la dinámica de las diferentes formas de

N presentes en el agua lluvia y de esta forma encontrar una solución para su tratamiento. Por último, para el Pb se evidencia que su presencia en el agua lluvia recolectada en el edificio E3T es imperceptible y no requiere su estudio a futuro, podría no ser prioritario si se mantienen las condiciones de captación en el sistema del edificio E3T.

Referencias Bibliográficas

- Abbasi, T., & Abbasi, S. A. (2011). Sources of pollution in rooftop rainwater harvesting systems and their control. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 41(23), 2097–2167. <https://doi.org/10.1080/10643389.2010.497438>
- Acevedo-García., J. (2016). Captación y Aprovechamiento de Agua de Lluvia en América Latina. In *Seminario Internacional sobre Sistemas de Captación de Aguas Lluvia*. http://www.cl.undp.org/content/dam/chile/docs/medambiente/undp_cl_medioambiente_Captacion-agua-lluvia-AL.pdf
- Amaral, X. S. A., Dantas, C. V. D. C., Neto, C. A. L. F., Araújo, A. L. C., & Neto, C. O. D. A.

EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DEL AGUA LLUVIA DEL E3T87

- (2017). Aproveitamento de Água de Chuva em unidades Educacionais do Rio Grande do Norte, Brazil. *Fronteiras*, 6(3), 45–63. <https://doi.org/10.21664/2238-8869.2017v6i3.p45-63>
- Angrill, S., Petit-Boix, A., Morales-Pinzón, T., Josa, A., Rieradevall, J., & Gabarrell, X. (2017). Urban rainwater runoff quantity and quality – A potential endogenous resource in cities? *Journal of Environmental Management*, 189, 14–21. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.12.027>
- APHA-AWWA-WEF. (2017). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. *American Public Health Association*.
- AQUA ESPAÑA. (2016). *Guía técnica de aprovechamiento de aguas pluviales en edificios*. 74. <http://bvs.minsa.gob.pe/local/MINSA/5000.pdf%0Ahttp://publicacionesoficiales.boe.es>
- Arboleda, J. (2000). Teoría y práctica de la purificación del agua. In *Colombia: Ed. Mc Graw Hill*. <http://fing.uncu.edu.ar/catedras/sanitaria/archivos/libros-arboleda-valencia/Teoria y Practica de la Purificacion del H2O - Tomo 1 - Arboleda Valencia.pdf>
- Arias, M. E., & Brown, M. T. (2009). Feasibility of using constructed treatment wetlands for municipal wastewater treatment in the Bogotá Savannah, Colombia. *Ecological Engineering*, 35(7), 1070–1078. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.03.017>
- Ballén Suárez, J. A., Galarza García, M. Á., & Ortiz Mosquera, R. O. (2006). Historia de los sistemas de aprovechamiento de agua lluvia. *International Symposium on Hydraulic Structures - XXII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*.
- Burgos, J. (2023). *Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga, caso de estudio: Barrio La Victoria* (Issue 7). (Trabajo de maestría). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.

EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DEL AGUA LLUVIA DEL E3T88

- CAMPINAS. (2014). Resolução conjunta SVDS/SMS nº 09/2014. *Prefeitura Municipai de Campinas, 2014*, 1–7.
- Campisano, A., Butler, D., Ward, S., Burns, M. J., Friedler, E., DeBusk, K., Fisher-Jeffes, L. N., Ghisi, E., Rahman, A., Furumai, H., & Han, M. (2017). Urban rainwater harvesting systems: Research, implementation and future perspectives. *Water Research, 115*, 195–209. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.02.056>
- Cavadia, P. (2024). *Evaluación experimental del gradiente térmico vertical de una viga I compuesta de concreto reforzado bajo las condiciones climáticas de Bucaramanga*. (Trabajo de maestría). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- Chang, M., McBroom, M. W., & Scott Beasley, R. (2004). Roofing as a source of nonpoint water pollution. *Journal of Environmental Management, 73*(4), 307–315. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2004.06.014>
- Chiang, V. C., Kao, M. H., & Liu, J. C. (2013). Assessment of rainwater harvesting systems at a university in Taipei. *Water Science and Technology, 67*(3), 564–571. <https://doi.org/10.2166/wst.2012.592>
- Chinchilla, J. C., & Paredes, S. A. (2019). Evaluación de las Características Fisicoquímicas y Microbiológicas del Agua en el Sistema de Aprovechamiento de Aguas Lluvia del Edificio de la E3T en el Campus Central de la Universidad Industrial de Santander. In *UIS*. (Trabajo de pregrado). UIS.
- Dao, A. D., Nguyen, D. C., & Han, M. Y. (2017). Design and operation of a rainwater for drinking (RFD) project in a rural area: Case study at cukhe elementary school, Vietnam. *Journal of Water Sanitation and Hygiene for Development, 7*(4), 651–658. <https://doi.org/10.2166/washdev.2017.055>

EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DEL AGUA LLUVIA DEL E3T89

- Dao, A. D., Nguyen, V. A., & Han, M. (2013). Benefit of the drinking water supply system in office building by rainwater harvesting: A demo project in Hanoi, Vietnam. *Environmental Engineering Research*, 18(2), 103–108. <https://doi.org/10.4491/eer.2013.18.2.103>
- Dobrowsky, P. H., Lombard, M., Cloete, W. J., Saayman, M., Cloete, T. E., Carstens, M., Khan, S., & Khan, W. (2015). Efficiency of microfiltration systems for the removal of bacterial and viral contaminants from surface and rainwater. *Water, Air, and Soil Pollution*, 226(3). <https://doi.org/10.1007/s11270-015-2317-6>
- Duan, C., Attwater, R., & Min, L. U. O. (2008). Introduction to rainwater management in Australia and suggestions for China ' s water problems *. *Journal of Chongqing University (English Edition)*, 7(1), 1–8.
- EPA. (1999a). Folleto informativo de tecnología de aguas residuales Desinfección con luz ultravioleta. *Epa*, 64, 9.
- EPA. (1999b). Folleto informativo de tecnología de aguas residuales Desinfección con ozono. *Epa*, 64, 9. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-06/documents/cs-99-063.pdf>
- EPA. (2012). EPA Guidelines for Water Reuse U.S. Environmental Protection Agency. *Guidelines for Water Reuse*, September, 643.
- Estupiñán Perdonó, J. L., & Zapata García, H. O. (2010). Requerimientos de Infraestructura para el Aprovechamiento Sostenible del Agua Lluvia en el Campus de la Pontificia Universidad Javeriana, Sede Bogotá. In *Pontificia Universidad Javeriana*.
- FAO. (2013). Afrontar la escasez de agua. Un marco de acción para la agricultura y la seguridad alimentaria. In *Informe Sobre Temas Hídricos no. 38*. <http://www.fao.org/3/a-i3015s.pdf>
- Forero, S., & Valdivieso, V. (2019). Introducción a la construcción sostenible. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699.

EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DEL AGUA LLUVIA DEL E3T90

- G Castaño, J Latorre, J. T. V. (1998). *Filtración en múltiples etapas: tecnología innovativa para el tratamiento de agua*.
- Galarza-Molina, S. L., Torres, A., Moura, P., & Lara-Borrero, J. (2015). CRIDE: A case study in multi-criteria analysis for decision-making support in rainwater harvesting. *International Journal of Information Technology and Decision Making*, 14(1), 43–67.
<https://doi.org/10.1142/S0219622014500862>
- García, A., & Rivera, A. A. (2020). *Propuesta de tecnologías para el tratamiento del agua en el sistema de aprovechamiento de agua lluvia del edificio de la escuela de Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones en el campus central de Universidad Industrial de Santander*. (Trabajo de pregrado). UIS.
- García Serrano, J., & Corzo Hernández, A. (2008). Depuración con Humedales Construidos. *Universidad Politécnica de Cataluña*, 1–96.
http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/2474/JGarcia_and_ACorzo.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Garg, V., Bansal, A. K., & Dubey, M. K. (2022). Design of Rain Water Harvesting Structure for Engineering Block. *Ecological Engineering and Environmental Technology*, 23(1), 261–266.
<https://doi.org/10.12912/27197050/143383>
- Garzón, N., & Gualdrón, N. (2019). *Propuesta del dimensionamiento del tanque de almacenamiento del sistema de aprovechamiento de aguas lluvias del edificio de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad Industrial de Santander, campus central*. (Trabajo de pregrado). UIS.
- Ghermandi, A., Van den Bergh, J. C. J. M., Brander, L. M., de Groot, H. L. F., & Nunes, P. (2011). The Values of Natural and Constructed Wetlands: A Meta-Analysis. *SSRN Electronic*

EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DEL AGUA LLUVIA DEL E3T91

Journal, Ivm. <https://doi.org/10.2139/ssrn.1474751>

Giraldo Agudelo, F. (2016). *Diseño y construcción de un sistema recolector de aguas lluvias para el módulo ecosostenible de la fundación Kyrios (Centro de Restauración)*. 1–42. <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/handle/11059/6604>

Health Canada. (2010). *for Domestic Reclaimed Water for Use in Toilet and*.

Hernández Avilés, D. M., & Chaparro, T. (2020). Tratamiento de agua lluvia con fines de consumo humano. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 30(2), 97–107. <https://doi.org/10.18359/rcin.4409>

Hertel, R. (2017). Wine production benefits from recycled rainwater. *Filtration and Separation*, 54(3), 18–20. [https://doi.org/10.1016/S0015-1882\(17\)30128-3](https://doi.org/10.1016/S0015-1882(17)30128-3)

IDEAM. (2017). *Tr =*.

IDEAM. (2018). Evaluación Nacional del Agua 2018. In *Cartilla ENA 2018*.

Imarhiagbe, E. E., & Osarenotor, O. (2020). Health risk and quality assessment of non-roof-harvested rainwater from an oil-producing community in Nigeria. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(3). <https://doi.org/10.1007/s10661-020-8102-z>

Islam, M. A., Akber, M. A., Rahman, M. A., Islam, M. A., & Kabir, M. P. (2019). Evaluation of harvested rainwater quality at primary schools of southwest coastal Bangladesh. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(2). <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7217-6>

Kabbashi, N. A., Jami, M. S., Abdurahman, N. H., & Puad, N. I. M. (2020). Rainwater harvesting quality assessment and evaluation: IIUM case study. *IIUM Engineering Journal*, 21(1), 12–22. <https://doi.org/10.31436/iiumej.v21i1.1139>

Kalbar, P. P., Karmakar, S., & Asolekar, S. R. (2016). Life cycle-based decision support tool for

EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DEL AGUA LLUVIA DEL E3T92

selection of wastewater treatment alternatives. *Journal of Cleaner Production*, 117, 64–72.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.01.036>

Kim, R.-H., Lee, S., Jeong, J., Lee, J.-H., & Kim, Y.-K. (2007). Reuse of greywater and rainwater using fiber filter media and metal membrane. *Desalination*, 202(1–3), 326–332.

<https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.12.071>

Kim, Y., Dao, A. D., Kim, M., Nguyen, V. A., & Han, M. (2017). Design and management of rainwater harvesting systems to control water quality for potable purposes in Cu Khe, Vietnam. *Water Science and Technology: Water Supply*, 17(2), 452–460.

<https://doi.org/10.2166/ws.2016.154>

Köse-Mutlu, B. (2021). Natural organic matter and sulphate elimination from rainwater with nanofiltration technology and process optimisation using response surface methodology.

Water Science and Technology, 83(3), 580–594. <https://doi.org/10.2166/wst.2020.591>

Köster, S., Hadler, G., Opitz, L., & Thoms, A. (2023). Using Stormwater in a Sponge City as a New Wing of Urban Water Supply—A Case Study. *Water (Switzerland)*, 15(10).

<https://doi.org/10.3390/w15101893>

Kristjánisdóttir, M. F., Zhao, K., Hube, S., Ge, L., Lisak, G., Brynjólfsson, S., & Wu, B. (2023). Reclamation of Nutrient Solution from Membrane-Based Microalgal Harvesting Processes for Cultivation of Vegetables in Hydroponic Systems. *ACS ES and T Water*.

<https://doi.org/10.1021/acsestwater.3c00129>

Lee, J. Y., Kim, H., & Han, M. (2016). Importance of maintenance in rainwater harvesting systems: A case study. *Water Science and Technology: Water Supply*, 16(1), 97–103.

<https://doi.org/10.2166/ws.2015.115>

León, C. E., & Muñoz, A. A. (2022). *Propuestas de mejoras de diseño hidráulico de dos trenes de*

EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DEL AGUA LLUVIA DEL E3T93

tratamiento a escala de laboratorio, para el sistema de aprovechamiento de aguas lluvias del edificio E3T de la Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga Colombia. (Trabajo de pregrado). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.

López Zavala, M. Á., Vega, R. C., & Miranda, R. A. L. (2016). Potential of rainwater harvesting and greywater reuse for water consumption reduction and wastewater minimization. *Water (Switzerland)*, 8(6), 1–18. <https://doi.org/10.3390/W8060264>

Marino, M. de M. A. y M. R. y. (2003). Guía para la aplicación del R.D. 1620/2007 por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas. In *Geneva* (Vol. 1, Issue 1).

Melidis, P., Akrotos, C. S., Tsihrintzis, V. A., & Trikilidou, E. (2007). Characterization of rain and roof drainage water quality in Xanthi, Greece. *Environmental Monitoring and Assessment*, 127(1–3), 15–27. <https://doi.org/10.1007/s10661-006-9254-1>

MinAmbiente. (2010). *Política Nacional Recurso Hídrico*.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2022). *Lineamientos para potencializar el USO DEL AGUA LLUVIA*. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2022/07/LINEAMIENTOS-USO-AGUAS-LLUVIAS.pdf>

Ministry of Health, H. N. (2018). *QCVN 01-1/2018-BYT (National technical regulation on domestic water quality)*.

Miorando, T., Brião, V. B., & Girardelli, L. (2017). Potabilização de água da chuva por ultrafiltração. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 22(3), 481–490. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522017146765>

Moreira Neto, R. F., Calijuri, M. L., Carvalho, I. D. C., & Santiago, A. D. F. (2012). Rainwater treatment in airports using slow sand filtration followed by chlorination: Efficiency and costs.

EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DEL AGUA LLUVIA DEL E3T94

Resources, Conservation and Recycling, 65, 124–129.

<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.06.001>

Morrow, A. C., Dunstan, R. H., & Coombes, P. J. (2010). Elemental composition at different points of the rainwater harvesting system. *Science of the Total Environment*, 408(20), 4542–4548.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.07.002>

Müller, A., Österlund, H., Nordqvist, K., Marsalek, J., & Viklander, M. (2023). Releases of micropollutants from building surface materials into rainwater and snowmelt induced runoff.

Chemosphere, 330(January). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138730>

Mun, J., Kim, R., & Han, M. (2012). The effects of catchment materials and treatment train on rainwater quality in a rainwater harvesting system. *Materials Science Forum*, 724, 451–454.

<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.724.451>

Murakami, M. F., & Moruzzi, R. B. (2013). Avaliação do desempenho de uma unidade em escala real para tratamento de água pluvial empregando a filtração direta por meio de filtro de pressão e amido natural de milho como coagulante primário. *Ciencia y Engenharia/ Science and Engineering Journal*, 22(2), 37–45.

<https://doi.org/10.14393/19834071.2013.24025>

MVCT. (2017). Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico: TÍTULO D. Sistemas de recolección y evacuación de aguas residuales domésticas y aguas lluvias. In

Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio Colombia.

http://www.minvivienda.gov.co/Documents/ViceministerioAgua/TITULO_D.pdf

https://minvivienda.gov.co/sites/default/files/documentos/titulo_d.pdf

Nawaz, M., Han, M. Y., Kim, T. il, Manzoor, U., & Amin, M. T. (2012). Silver disinfection of *Pseudomonas aeruginosa* and *E. coli* in rooftop harvested rainwater for potable purposes.

Science of the Total Environment, 431, 20–25.

EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DEL AGUA LLUVIA DEL E3T95

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.05.022>

O'Hogain, S., Mccarton, L., Mcintyre, N., Pender, J., & Reid, A. (2012). Physicochemical and microbiological quality of harvested rainwater from an agricultural installation in Ireland. *Water and Environment Journal*, 26(1), 1–6. <https://doi.org/10.1111/j.1747-6593.2011.00254.x>

OMS. (2011). Guías para la calidad del agua de consumo humano: cuarta edición que incorpora la primera adenda. *Organización Mundial de La Salud*, 4, 608. <https://bitly.co/7FYT>

OMS. (2022). *Guidelines for drinking-water quality* (Vol. 33, Issue 33).

ONU. (2015). Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. *Asamblea General*, 15900, 40. http://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/70/L.1&Lang=S

ONU. (2020). Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2020. *Onu*, 64. <https://unstats.un.org/sdgs/files/report/2018/TheSustainableDevelopmentGoalsReport2018-ES.pdf>

OPS/CEPIS. (2003). *Especificaciones Técnicas Captación De Agua De Lluvia Para Consumo Humano*.

OPS/CEPIS. (2004). *Guía de Diseño para Captación del Agua de Lluvia*.

Ortega Sandoval, A. D., Barbosa Brião, V., Cartana Fernandes, V. M., Hemkemeier, A., & Friedrich, M. T. (2019). Stormwater management by microfiltration and ultrafiltration treatment. *Journal of Water Process Engineering*, 30(May). <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2017.07.018>

Osorio Gómez, J. C., García Alcaraz, J. L., & Manotas Duque, D. F. (2018). AHP Topsis para la selección de proveedores considerando el riesgo asociado a la calidad. *Espacios*, 39(16).

<https://www.revistaespacios.com/a18v39n16/a18v39n16p08.pdf>

Pacheco-Avila, J., Pat-Canul, R., & Cabrera-Sansores, A. (2002). Análisis del ciclo del nitrógeno en el medio ambiente con relación al agua subterránea y su efecto en los seres vivos. *Ingeniería*, 6(3), 73–81.

Peng, S., Cui, H., & Ji, M. (2018). Sustainable Rainwater Utilization and Water Circulation Model for Green Campus Design at Tianjin University. *Journal of Sustainable Water in the Built Environment*, 4(1), 04017015. <https://doi.org/10.1061/jswbay.0000841>

Pizarro, R., Abarza, A., Morales, C., Calderón, R., Tapia, J., Urbina, F., Vallejos, C., Cortés, M. I., Fernández, Á., Sangüesa, C., Pino, J., Vázquez, S., Cervantes, E., Hernández, D., Hurtado, R., García, P., & Córdova, M. (2015). *Manual de diseño y construcción de sistemas de captación de aguas lluvias en zonas rurales de Chile*.

Polyakova, O. V., Artaev, V. B., & Lebedev, A. T. (2018). Priority and emerging pollutants in the Moscow rain. *Science of the Total Environment*, 645, 1126–1134. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.215>

RAS. (2017). Resolución 0330 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 1096 de 2000, 0424 de 2001, 0668 de 2003, 1459 de 2005, 1447 de 2005 y 2320 de 2009”. Ministerio. In *Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. Republica de Colombia*. (p. 182). <http://www.minvivienda.gov.co/ResolucionesAgua/0330 - 2017.pdf>

Rodríguez, L. C., & Corrales, A. (2016). Remoción de patógenos con humedales construidos para aprovechamiento de aguas lluvias en la Pontificia Universidad Javeriana. *Memorias de La III Conferencia Panamericana de Sistemas de Humedales Para El Tratamiento y Mejoramiento de La Calidad Del Agua*, 159–160.

- Saaty, R. W. (1987). The analytic hierarchy process-what it is and how it is used. *Mathematical Modelling*, 9(3–5), 161–176. [https://doi.org/10.1016/0270-0255\(87\)90473-8](https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8)
- Saeedi, I., & Goodarzi, M. (2020). Rainwater harvesting system: a sustainable method for landscape development in semiarid regions, the case of Malayer University campus in Iran. *Environment, Development and Sustainability*, 22(2), 1579–1598. <https://doi.org/10.1007/s10668-018-0218-8>
- Sánchez, L. D., Marin, L. M., Visscher, J. T., & Rietveld, L. C. (2012). Low-cost multi-stage filtration enhanced by coagulation-flocculation in upflow gravel filtration. *Drinking Water Engineering and Science*, 5(1), 73–85. <https://doi.org/10.5194/dwes-5-73-2012>
- Sawik, T. (2011). Selection of supply portfolio under disruption risks. *Omega*, 39(2), 194–208. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2010.06.007>
- Shafiquzzaman, M., Haider, H., Ghazaw, Y. M., Alharbi, F., Alsaleem, S. S., & Almoshaogeh, M. (2020). Evaluation of a low-cost ceramic filter for sustainable reuse of urban stormwater in arid environments. *Water (Switzerland)*, 12(2), 1–17. <https://doi.org/10.3390/w12020460>
- Shatnawi, R. S. (2019). Rooftop runoff water quality in university buildings, case study at Jordan Applied Science Private University. *Journal of Engineering Science and Technology*, 14(2), 987–997.
- Słyś, D. (2009). Potential of rainwater utilization in residential housing in Poland. *Water and Environment Journal*, 23(4), 318–325. <https://doi.org/10.1111/j.1747-6593.2008.00159.x>
- Suárez, A., Mesa, P., Bravo, V., & Prieto, A. (2015). Evaluación de un sistema de filtros de cascarilla de arroz y luffa cylindrica para el tratamiento de aguas lluvias. *Revista Mutis*, 5(1), 21–27. <https://doi.org/10.21789/22561498.1015>
- Suárez López, J., Burgos, A., & Rodríguez, P. (2014). Filtración En Medio Granular. Serie:

EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DEL AGUA LLUVIA DEL E3T98

Tratamientos terciarios. *Inditex*, 1–41.

Toskano, G. (2005). El proceso de análisis jerarquico (APH) como herramienta para la toma de decisiones en la seleccion de proveedores. *Medicina*, 447(May), 1–33.
http://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/handle/cybertesis/4147/Diaz_rc.pdf;jsessionid=C D5A7FF3022F1A5526948369A600356D?sequence=1

Tran, S. H., Dang, H. T. T., Dao, D. A., Nguyen, V. A., Nguyen, L. T., Nguyen, V. A., & Han, M. (2021a). On-site rainwater harvesting and treatment for drinking water supply: assessment of cost and technical issues. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(10), 11928–11941. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-07977-0>

Tran, S. H., Dang, H. T. T., Dao, D. A., Nguyen, V. A., Nguyen, L. T., Nguyen, V. A., & Han, M. (2021b). On-site rainwater harvesting and treatment for drinking water supply: assessment of cost and technical issues. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(10), 11928–11941. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-07977-0>

UIS. (2019). *PLAN DE DESARROLLO INSTITUCIONAL 2019-2030*. 0(0), 148–162.

UNHCR. (2021). *Global Trends in Supercapacitors*. 329–365. https://doi.org/10.1007/978-3-030-68364-1_10

Vidal, G., & Hormazábal, S. (2018). humedales construidos diseño y operacion. *Universidad de Concepción, primera ed.*

Viswnadh ; Giridhar; Divya. (2018). *A Novel Approach to Rainwater Filtration with Geomembranes*. 1(i), 489.

Wei, C., Wei, J., Kong, Q., Fan, D., Qiu, G., Feng, C., Li, F., Preis, S., & Wei, C. (2020). Selection of optimum biological treatment for coking wastewater using analytic hierarchy process. *Science of the Total Environment*, 742, 140400.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140400>

Yulistyorini, A., Idfi, G., & Fahmi, E. D. (2018). Enhanced rooftop rainwater harvesting quality through filtration using zeolite and activated carbon. *MATEC Web of Conferences*, 204, 0–7.

<https://doi.org/10.1051/mateconf/201820403016>

Zanin, G., Bortolini, L., & Borin, M. (2018). Assessing stormwater nutrient and heavy metal plant uptake in an experimental bioretention pond. *Land*, 7(4), 1–16.

<https://doi.org/10.3390/land7040150>