

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.

Alexander García Roa  
Adrián Alberto Mateo Rivera Ramos

Trabajo de Grado para Optar el título de ingeniero civil

Director  
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 Fisicomecánicas  
Escuela de ingeniería civil  
Bucaramanga

2020

### **Dedicatoria**

*Quiero dedicar este trabajo primeramente a Dios por haber permitido llegar hasta aquí hoy, por darnos fuerza y salud para llevar a cabo nuestras metas y objetivos. Quiero darle las gracias por su amor infinito, además agradecer a familiares, a nuestros padres y hermanos por ser nuestros amigos y ayuda incondicional, por ser el ejemplo a seguir de la cual aprendí tantas cosas y agradezco hoy en día, al igual que todos los docentes que en sus clases anduvimos y especial a nuestra directora, co-director y compañero de trabajo.*

*Alexander Garcia Roa*

### **Dedicatoria**

*Quiero agradecer a mi familia, por ser ese soporte emocional y moral, sin ellos no hubiera sido posible llegar a este punto de mi vida.*

*A mis amigos, compañeros y docentes de la universidad, por ayudarme a seguir creciendo como persona y futuro profesional.*

*A todas esas personas que me han brindado su gran apoyo haciéndome sentir como si no fuera un foráneo más, haciendo de Bucaramanga un segundo hogar para mí.*

*¡Gracias totales!*

*Adrián Alberto Mateo Rivera Ramos*

### **Agradecimientos**

De antemano damos sinceros agradecimientos a la Universidad Industrial de Santander por permitirnos realizar y culminar esta investigación con éxito, a nuestra directora la profesora Daniela Rey y nuestro codirector el profesor Ricardo Oviedo por su excelente seguimiento en este proyecto y apoyo en los diversos problemas por el que pasamos para su realización y las enseñanzas impartidas durante el pregrado.

Al señor Epimenio Noriega Noriega y los trabajadores de planta física por su guía en el sistema del edificio y en la construcción de las tecnologías necesarias para el muestreo.

A los encargados y laboratoristas de CEIAM y GEIAM por su eficiente trabajo en los análisis y por el seguimiento en los protocolos de captación.

Al profesor Germán Osman por el apoyo al desarrollo de esta clase de proyectos en el edificio.

A los profesores Mario García y Andrés Almeyda por transmitimos conocimientos que permitieron una mejor comprensión en el ámbito del proyecto.

## Tabla de Contenido

Introducción .....	12
1. Objetivos.....	13
1.1. Objetivo General.....	13
1.2. Objetivos Específicos.....	13
2. Marco Referencial.....	14
2.1. Descripción de los componentes del sistema de aprovechamiento de agua lluvia. ....	14
2.2. Calidad de agua lluvia.....	15
2.3. Normativas para calidad de agua lluvia .....	16
3. Metodología .....	17
3.1. Revisión de literatura .....	17
3.1.1 Ecuaciones de búsqueda .....	17
3.1.2 Filtrado de documentos y criterios de selección .....	17
3.1.2.1 Caracterización de agua lluvia .....	18
3.1.2.2 Tecnologías de tratamiento de agua lluvia.....	18
3.1.3 Revisión y análisis de los datos .....	19
3.2. Muestreos y análisis de calidad del agua .....	20
3.2.1 Área de estudio .....	20
3.2.1.1 Captación edificio E3T .....	21
4. Resultados .....	28
4.1. Caracterización de agua lluvia .....	28
4.1.1 Filtrado y selección de casos de estudio .....	28

4.1.2 Caracterización de agua lluvia .....	28
4.1.2.1 Captación de agua lluvia .....	28
4.1.2.2 Caracterización de muestras .....	29
4.1.2.3 Análisis de parámetros .....	30
4.2. Tecnologías de tratamiento de aguas lluvia .....	36
4.2.1 Filtrado y selección .....	36
4.2.2 Estado de la información .....	36
4.2.3 Normativas .....	37
4.2.4 Caracterización de tecnologías .....	37
4.2.4.1 Tratamiento preliminar .....	37
4.2.4.2 Tratamiento .....	38
4.2.4.3 Desinfección .....	42
4.2.5 Propuesta de tratamiento .....	43
5. Conclusiones .....	49
Referencias bibliográficas .....	50
Apéndices .....	59

**Lista de Tablas**

Tabla 1. Valores típicos de parámetros en agua lluvia.....	16
Tabla 2. Criterios de selección. ....	27
Tabla 3. Eventos de precipitación muestreados. ....	28
Tabla 4. Resultados caracterización agua lluvia. ....	29
Tabla 5. Normativas usadas en casos de estudio.....	37
Tabla 6. Calificación cualitativa de tecnologías. ....	45

**Lista de Figuras**

Figura 1. Sistema de aprovechamiento de agua lluvia. ....	14
Figura 2. Precipitación Bucaramanga. ....	20
Figura 3. Cubierta verde zona secundaria. ....	21
Figura 4. Cubierta verde zona principal. ....	22
Figura 5. Vías de acceso. ....	23
Figura 6. Caja de inspección. ....	24
Figura 7. Esquema trenes de tratamiento propuesto. ....	26
Figura 8. Humedal Construido de Flujo Horizontal. ....	40
Figura 9. Primer tren de tratamiento. ....	46
Figura 10. Segundo tren de tratamiento. ....	46
Figura 11. Configuración trenes de tratamiento a escala de tratamiento. ....	47
Figura 12. Primer tren de tratamiento a escala de laboratorio. ....	48
Figura 13. Segundo tren de tratamiento a escala de laboratorio. ....	48

**Lista de Apéndices**

Apéndice A. Normas/guías internacionales para reúso de agua lluvia .....	59
Apéndice B. Mapa revisión bibliográfica. ....	60
Apéndice C. Mapa campus Universidad Industrial de Santander .....	61
Apéndice D. Plano red de transporte de agua lluvia captada. ....	62
Apéndice E. Esquema proceso revisión de literatura.....	63
Apéndice F. Costos y beneficios por kilómetro de buses eléctricos Diésel y eléctrico .....	64
Apéndice G. Casos de estudio de agua lluvia. ....	65
Apéndice H. Formato muestreo de agua lluvia. ....	66
Apéndice I. Tabla comparativa normativa aprovechamiento de agua lluvia. ....	67
Apéndice J. Revisión de literatura tecnologías en edificaciones institucionales. ....	68
Apéndice K. Artículos seleccionados por filtración (tecnologías de tratamiento).....	69
Apéndice L. Comparación porcentaje de remoción. ....	71
Apéndice M. Diseño trenes de tratamiento a escala de laboratorio. ....	72

## Resumen

**Título:** 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.

**Autor:** Alexander García Roa, Adrián Alberto Mateo Rivera Ramos

**Palabras Clave:** Agua lluvia, calidad de agua, aprovechamiento, tratamiento, edificación institucional.

**Descripción:** El agua lluvia representa una importante fuente de abastecimiento hídrico; su calidad y fácil y económica captación la hace ideal para su aprovechamiento. Sin embargo, puede contaminarse fácilmente por diversos factores, tales como el tipo de captación y la presencia de sustancias fisicoquímicas y de microorganismo del entorno, por lo tanto, requiere de tratamiento para su aprovechamiento en diversos propósitos. En este estudio se proponen tecnologías de tratamiento para el aprovechamiento del agua lluvia captada en el edificio de la escuela de Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones (E3T) en el campus central de La Universidad Industrial de Santander (UIS); para ello, se parte de la caracterización del agua lluvia que capta el sistema, lo cual muestra que los parámetros: turbiedad, color, coliformes totales y *E. coli* arrojan valores que superan los lineamientos internacionales para su aprovechamiento en descarga de inodoros y riego agrícola. Para definir el método de remoción de contaminantes apropiado para este contexto, se realizó una revisión de literatura que permitió identificar las tecnologías usadas para el tratamiento en edificaciones institucionales, tales como la filtración lenta en arena, tratamiento por sedimentadores, desviadores, membranas, humedales construidos, cloración, coagulación, desinfección UV y filtración por carbón activado, las cuales fueron analizadas según el ámbito técnico y económico. Como resultado fueron propuestos dos trenes de tratamiento, un primer tren de tratamiento compuesto por un desviador de primer flujo seguido tanque sedimentador seguido de un filtro lento en arena y un sistema de cloración; y un segundo tren compuesto de un desviador de primer flujo seguido de un tanque sedimentador seguido de una membrana de ultrafiltración y un sistema de cloración.

---

\* Proyecto de Grado

\*\*Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Directora: Daniela Cristina Rey Romero Ing.

### Abstract

**Title:** Proposal of technologies for water treatment in the rainwater harvesting system of the building of the School of Electrical, Electronics and Telecommunications on the central campus of the Industrial University of Santander.

**Author:** Alexander García Roa, Adrián Alberto Mateo Rivera Ramos

**Key Words:** rainwater, water quality, use, treatment, institutional building.

**Description:** Rainwater represents an important source of water supply; its quality and easy and economic uptake makes it ideal for use. However, it can be easily polluted depending on various factors, such as the type of catchment surface and the presence of physicochemical substances and microorganisms in the environment, therefore, it requires treatment for its use according to purpose. In this study, treatment technologies are proposed for the use of the rainwater collected in the building of Electrical, Electronic and Telecommunications (E3T) on the central campus of the Industrial University of Santander (UIS); For this, it starts from the characterization of the rainwater that the system captures, which shows that the parameters: turbidity, color, total coliforms and E. coli have values that exceed international guidelines for its use in flushing toilets and agricultural irrigation . To define the appropriate pollutant removal method for this context, a literature review was conducted to identify the technologies used for treatment in institutional buildings, such as settlers, first flow diverter, slow sand filtration, membrane treatment, constructed wetlands, chlorination, coagulation, UV disinfection and activated carbon filtration, which were analyzed according to the technical and economic criterial. As a result, two treatment trains were proposed, a first treatment train made up of a settling tank followed by a slow sand filter and a chlorination system; and a second train consisting of a settling tank followed by an ultrafiltration membrane and a chlorination system.

---

\*Degree Thesis

\*\* Faculty of Engineering Physics-Mechanics. School of Civil Engineering. Directed by Daniela Cristina Rey Romero  
Ing. Ambiental – MSc Planificación y desarrollo de recursos hidráulico

## Introducción

El campus central de la Universidad Industrial de Santander, cuenta con el edificio de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones (E3T), el cual se caracteriza por tener aplicaciones sostenibles, tales como: sistema de generación fotovoltaico, sistema de aislamiento térmico a partir de cubiertas verdes, sistema de uso racional de agua, iluminación, y climatización natural y artificial. Inicialmente se consideraron técnicas de disminución de consumo de agua tales como uso de dispositivos de bajo consumo (fluxómetros de doble descarga, aireadores para lavamanos y duchas), de nulo consumo (orinales), y captación y reutilización de aguas lluvias y aguas grises claras para atender servicios que no demanden agua potable (sanitarios y riego). Aunque el sistema de aprovechamiento de agua lluvia cuenta con infraestructura de captación y transporte, en la actualidad no ha sido implementado.

Según resultados de estudios previos de caracterización fisicoquímica y microbiológica, el agua lluvia recolectada en el sistema de dicho edificio no se acoge a los estándares de calidad para reúso en actividades como descarga de sanitarios y orinal, y riego agrícola, superando los límites para diferentes parámetros, tales como: pH, turbiedad, plomo, coliformes totales y E.coli. (OMS, 2004). Para mitigar dicha problemática se busca implementar sistemas de tratamiento del agua captada. Por lo tanto, en el presente trabajo se proponen las tecnologías potenciales para el tratamiento del agua lluvia en el sistema de aprovechamiento del edificio E3T de la Universidad Industrial de Santander, partiendo de la caracterización del agua captada y de una revisión de la literatura que permitió identificar tecnologías potenciales usadas en otras instituciones; y a través de esta información obtener los métodos más adecuados para el aprovechamiento de agua lluvia en el edificio.

## **1. Objetivos**

### **1.1. Objetivo General**

Proponer opciones tecnológicas para el tratamiento del agua en el sistema de aprovechamiento de agua lluvia del edificio E3T de la Universidad Industrial de Santander.

### **1.2. Objetivos Específicos**

Analizar la caracterización fisicoquímica y microbiológica del agua lluvia captada en el edificio E3T.

Identificar las tecnologías de tratamiento de aguas lluvias con mayor uso en edificios institucionales a partir de una revisión de literatura.

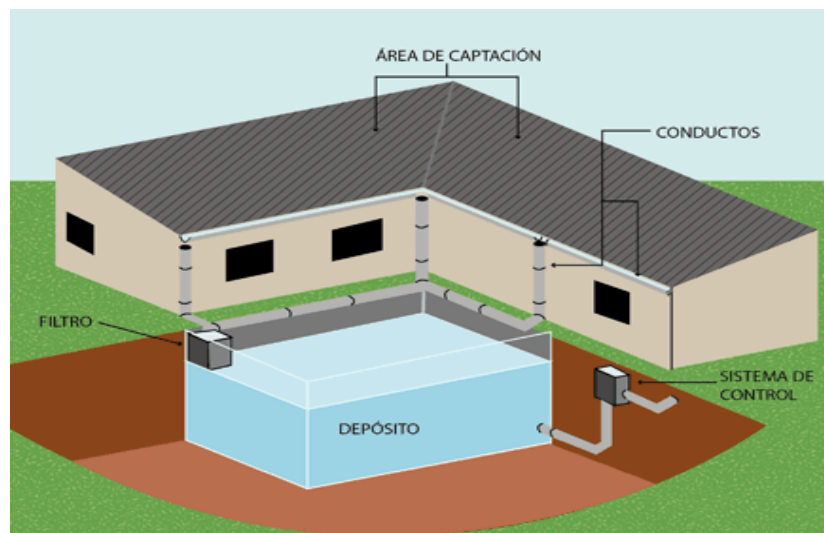
## 2. Marco Referencial

### 2.1. Descripción de los componentes del sistema de aprovechamiento de agua lluvia.

La captación de agua lluvia (RWH por sus siglas en inglés) es el mecanismo por el cual se recolecta y se almacena agua pluvial en tanques o en embalses (Montes, 2007). Estos sistemas consisten en diferentes componentes como: captación, conducción, tratamiento, almacenamiento y distribución como se observa en la Figura 1 (Giraldo Agudelo, 2016).

Figura 1.

*Sistema de aprovechamiento de agua lluvia.*



*Nota:* Tomado de (Pelegrí, Font, Palol, Gómez, & Coma, 2012).

La captación es la superficie dispuesta para la recolección del agua. Por lo general en la mayoría de los diseños, el área de captación se encuentra ubicada en los techos con unas pendientes no menores al 5% para permitir que el agua se escurra hacia los sistemas de captación (Castañeda, 2010). La conducción se realiza mediante tuberías que son básicamente un ducto de sección

circular para el transporte de agua (Benavides Garzón, Castro Molano, & Vizcaíno Cagüño, 2006). También se incluye en este sistema los accesorios, los cuales son elementos fundamentales en el sistema de tuberías, como uniones y codos.

Una vez recolectada el agua, ésta no necesariamente cumple con los estándares de calidad para los fines a los cuales se destina, debido a arrastre de material particulado y disuelto, presencia de materia orgánica natural y de microorganismos (Rojas & Rojas, 2002).

Por tales razones, el agua generalmente debe ser tratada mediante algún mecanismo o tratamiento, que podría consistir en un conjunto de procesos para eliminar uno o más componentes ya sean fisicoquímicos y/o microbiológicos que limitan su uso. Algunas tecnologías de tratamiento frecuentemente utilizadas en estos sistemas son: membranas, filtros de gravedad, decantador, carbón activado entre otros, de acuerdo al objetivo del tratamiento (Arboleda, 2000) .

## **2.2. Calidad de agua lluvia**

La calidad del agua se refiere a las características químicas, físicas y biológicas del agua. Es una medida de la condición del agua en relación con los requisitos de una o más especies bióticas o a cualquier necesidad humana o propósito. Estas características se miden a través del análisis de parámetros, dependiendo de la procedencia del agua en estudio. Los valores típicos de los parámetros más encontrados en la literatura se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1.

Valores típicos de parámetros en agua lluvia. Adaptado de (Gómez &amp; Silva, 2019).

<b>Parámetro</b>	<b>Valores típicos</b>
<b>Fisicoquímicos</b>	
pH	4.5 - 6.5
Turbiedad	4.82 UNT
Color	18.47 Pt-Co
Nitratos	2.61 mgN/L
Sulfatos	10.16 mg S/L
Cloruros	3.55 mg/L Cl-
Solidos Suspendidos	25.59 mg/L
<b>Microbiológicos</b>	
Coliformes Totales	13533.88 CFU/100 mL
<i>E. coli</i>	505.32 CFU/100 mL
<b>Metales pesados</b>	
Hierro	0.04 mg/L
Plomo	0.01 mg/L
Zinc	0.34 mg/L

### 2.3. Normativas para calidad de agua lluvia

La calidad del agua lluvia representa en diversos parámetros una afectación en la salud del ser humano, para su debido aprovechamiento en los sistemas de agua de la población es necesario adoptar lineamientos que regulen su composición. En diversos países del mundo se han implementado estos lineamientos a través de normativas y guías; en el Apéndice A se muestra las

normas y guías usadas como referencia en esta investigación para el aprovechamiento del agua lluvia en la descarga de sanitarios y el riego agrícola.

### 3. Metodología

#### 3.1. Revisión de literatura

**3.1.1 Ecuaciones de búsqueda** Para el desarrollo de la revisión bibliográfica se utilizaron palabras clave en bases de datos especializadas (Scopus y Sciencedirect), utilizando los términos “Rainwater harvesting” AND Quality para la caracterización de agua lluvia y “Rainwater” AND Reuse, “Rainwater” AND Treatment para las tecnologías de tratamiento; dentro de la última búsqueda fueron excluidos los términos “water treatment” AND “sewage water”. Para esta revisión solo se tuvieron en cuenta artículos científicos y el uso de términos (palabras clave) en inglés.

**3.1.2 Filtrado de documentos y criterios de selección** Una vez obtenidos los artículos fueron organizados en un documento de Excel, este contenía información tal como: autores, título, año de publicación, resumen y publicación. Al realizar las búsquedas propuestas se planteó un filtrado de los artículos obtenidos teniendo en cuenta los siguientes criterios en cada caso:

- Por título: Se escogieron los artículos que hicieran referencia a las palabras clave usadas.

### ***3.1.2.1 Caracterización de agua lluvia***

- Por resumen: Una vez seleccionados los artículos por su título se pasó a la lectura de su correspondiente resumen, fueron elegidos los documentos que contengan una caracterización mínima del agua lluvia con parámetros microbiológicos, fisicoquímicos o metales.
- Por contenido: Se seleccionaron los estudios que reportan datos cuantitativos de los parámetros usados para el análisis. Dentro de esta selección se tuvieron en cuenta una serie de subcriterios basados en las condiciones del sitio de estudio:
  - Tipo de captación: Techos verdes o vías de acceso.
  - Tipo de edificación: Edificaciones no residenciales.

### ***3.1.2.2 Tecnologías de tratamiento de agua lluvia***

- Por resumen: Una vez seleccionados los artículos por su título se pasó a la lectura de su correspondiente resumen, fueron elegidos los documentos que propongan o evalúen el uso tecnologías para el tratamiento de agua lluvia y tengan como área de estudio una edificación no residencial.
- Por contenido: Se seleccionaron los estudios que reportan datos relacionados al tratamiento de los parámetros críticos obtenidos en la caracterización de la primera fase. Otros subcriterios usados (si el estudio en cuestión contenía) fueron:
  - Tipo de uso: Riego agrícola o descarga de inodoros.
  - Costo y mantenimiento.

La segunda revisión constó del uso del buscador especializado “Google Scholar”, utilizando los términos “rainwater” AND “treatment” AND “public buildings” OR “campus” excluyendo los términos “residential” AND “house” AND “review” AND “greywater.

Al seleccionar los documentos de las revisiones previas se efectuó una revisión de referencias usadas siguiendo el método de filtración propuesto anteriormente. Las condiciones de selección de documentos pueden ser visualizadas en el Apéndice B.

Cabe resaltar que los resultados de esta búsqueda de tecnologías permitieron complementar la caracterización de ALL, ya que se identificaron los límites normativos para diferentes usos.

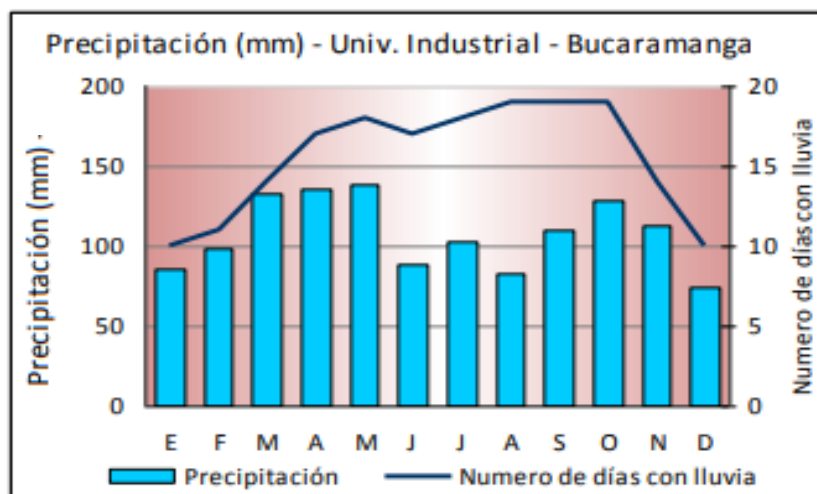
**3.1.3 Revisión y análisis de los datos** Al tener todos los documentos seleccionados organizados en la base de datos, se procedió a extraer la información de cada uno de ellos: fecha, ciudad y país en el que se llevó a cabo el estudio; para la caracterización de agua lluvia se tuvo en cuenta la zona o lugar de captación, y valores promedio de las parámetros fisicoquímicos y microbiológicas, así como otros estadísticos (mínimos, máximos, desviación estándar y mediana); dentro del análisis de tecnologías se extrajo el tipo de tratamientos utilizados, el aprovechamiento y parámetros mitigados.

### 3.2. Muestreos y análisis de calidad del agua

**3.2.1 Área de estudio** El sitio de estudio corresponde al edificio de la E3T, ubicado en el campus central de Universidad Industrial de Santander (UIS) en la zona noroccidental (ver Apéndice C), consta de un área construida de 674.20 m<sup>2</sup> por piso.

El promedio de lluvia total anual en Bucaramanga, específicamente en la zona de la UIS es de 1303 mm. Durante el año, las lluvias se distribuyen en dos temporadas secas y dos temporadas lluviosas. Los meses secos abarcan diciembre, enero y febrero, y en menor medida, junio, julio y agosto. Las temporadas lluviosas acogen los meses de marzo a mayo y de septiembre a noviembre. Durante los meses más secos llueve alrededor de 10 días/mes al inicio del año; en los meses de mayores precipitaciones, así como en la temporada seca de mitad de año, puede llover de 17 a 19 días/mes (ver Figura 2) (IDEAM, 2015).

Figura 2.  
*Precipitación Bucaramanga.*



Nota: Tomado de (IDEAM, 2015).

### 3.2.1.1 Captación edificio E3T

Para realizar los muestreos del agua lluvia, se consideró que las superficies de captación del edificio se agrupan en dos tipos: cubiertas verdes y vías de acceso, las cuales se describen a continuación:

- **Cubiertas verdes:** localizadas al norte y sur de la estructura, estas cuentan con una extensión de  $137\text{ m}^2$  y  $429\text{ m}^2$  respectivamente, la primera ubicada en el quinto piso (ver Figura 3) siendo la más pequeña de los sistemas de captación, la segunda terraza se encuentra en lo más alto del edificio en el sexto piso (ver Figura 4).

Figura 3.

*Cubierta verde zona secundaria.*



*Nota:* Tomado de (Garzón & Peña Nathalia, 2019).

Figura 4.

*Cubierta verde zona principal.*



*Nota:* Tomado de (Garzón & Peña Nathalia, 2019).

La totalidad de las áreas anteriormente mencionadas no representan la cubierta de captación, debido a que estas zonas cuentan con diversas maquinarias tales como paneles solares, aires acondicionados, entre otros, además de la presencia de cultivos de raíz corta.

La terraza principal cuenta en su gran mayoría con plantaciones de tomate cherry y berenjena, y en menor medida pinos enanos, maní, durazno, hierbabuena, limonaria, cebolla larga, girasol, *alternanthera sessilis* y *sedum lemon ball*. El cultivo de la terraza del quinto piso consta de tomate cherry y *sedum lemon ball* (Chinchilla & Paredes, 2019).

- **Vías de acceso:** Está compuesta por las zonas aledañas al edificio, las cuales funcionan como estacionamiento, zonas de tránsito peatonal y paso de baja cantidad de vehículos (ver Figura 5).

Figura 5.

*Vías de acceso.*

*Nota:* Tomado de (Garzón & Peña Nathalia, 2019).

El edificio en estudio cuenta con una serie de cajas recolectoras debajo y alrededor de su estructura principal, las cuales funcionan como puntos de control del flujo del agua captada por las superficies anteriormente descritas. El análisis previo del sistema de distribución del agua recolectada (Chinchilla & Paredes, 2019) constata que el punto óptimo para el muestreo es una caja de inspección ubicada al noroccidente del edificio, este punto es clave ya que representa el lugar en el cual el agua cruda culmina su recorrido total antes de ingresar al tanque de almacenamiento como se observa en el Apéndice D.

La caja de inspección cuenta con dos tuberías de entrada (Norte y Sur), una tubería baja de desagüe, una tubería de conducción hacia el tanque de almacenamiento, una tubería de liberación de presión y una pequeña perteneciente al desagüe de un lavamanos sin uso, esta configuración se ve descrita en la Figura 6.

Figura 6.

*Caja de inspección.**Nota:* Tomado de (Chinchilla & Paredes, 2019).

Se estableció un protocolo para el muestreo siguiendo las recomendaciones del laboratorio del Centro de Estudios e Investigaciones Ambientales (CEIAM) de la Universidad Industrial de Santander, el cual se siguió durante cuatro eventos de precipitación que se presentaron en los meses de diciembre de 2019, enero y principios de febrero de 2020. Con el fin de obtener una muestra compuesta durante un período de tiempo representativo del evento de precipitación, inicialmente se midieron los caudales en cada una de las entradas de agua; a cada una de las entradas fueron tomadas 3 muestras en lapsos de 10 minutos sin tomar en cuenta el flujo inicial de agua correspondiente a una duración de 10 minutos. Al obtener las 6 muestras (3 por entrada) se determinó el volumen de alícuota para los diferentes intervalos de tiempo, de acuerdo con la ecuación:

$$V_i = \frac{(Q_i \times V)}{(Q_p \times N)}$$

*V<sub>i</sub>*= Volumen de cada alícuota o porción de muestra.

*V*= Volumen total a componer.

*Q<sub>i</sub>*= Caudal instantáneo de cada muestra.

*Q<sub>p</sub>*= Caudal promedio durante el muestreo.

*N*= Número de muestras tomadas.

Una vez obtenido el volumen total de la muestra compuesta, este fue dividido en 5 envases: 3 envases plásticos (0.5 L, 1 L y 2L) y dos envases de vidrio de 0.5 L de volumen. Las muestras recolectadas fueron enviadas a los laboratorios CEIAM y del Grupo de Investigaciones en Minerales, Biohidrometalurgia y Ambiente (GIMBA) de la UIS para su posterior caracterización, a través de los parámetros que se indican en el Apéndice F. Es importante mencionar que dichos parámetros se seleccionaron con base en los usos potenciales del agua en el edificio de la E3T (descarga de inodoros y riego agrícola). Los resultados de calidad se contrastaron con las referencias mencionadas en el Apéndice A y, a su vez, se analizaron posibles factores que determinan los niveles obtenidos de estos parámetros en el agua recolectada, basados en la información obtenida durante la fase de caracterización y la literatura.

### **3. Caracterización de tecnologías**

A partir de los documentos seleccionados se extrajeron los tratamientos efectuados en cada edificación para la mitigación de los contaminantes. Posteriormente, se seleccionaron aquellos que son aptos para mejorar la calidad de los parámetros que sobrepasaron los valores admisibles en el apartado 3.2. Se realizó una búsqueda de literatura sobre estos, con el propósito de exponer sus ventajas y desventajas al momento de implementarlos en un sistema de recolección en edificaciones institucionales.

### 3.1 Propuesta de trenes de tecnologías

A partir de la información planteada en el inciso anterior (2.3), fueron propuestos distintos trenes de tratamiento siguiendo el concepto de tres etapas obligatorias (ver Figura 7).

Figura 7.

*Esquema trenes de tratamiento propuesto.*



Para definir las tecnologías para cada etapa del tren de tratamiento (exceptuando el tratamiento preliminar), se realizó una calificación cualitativa que evaluó para cada una según aspectos como la remoción de contaminantes, costos de implementación y costos de operación y mantenimiento, asignándoseles un valor de 1 a 5 (Tabla 2). Para los parámetros de evaluación se designó su respectiva calificación numérica bajo criterio propio, basándose en a la caracterización realizada en el inciso anterior (2.3), datos extraídos de la literatura del inciso (2.1.2) y la aplicabilidad para el edificio en estudio. De las tecnologías propuestas para cada etapa del tren de tratamiento se tomó las obtuvieron el mayor puntaje en la sumatoria de los parámetros de evaluación.

Tabla 2.  
Criterios de selección.

Aspecto	Descripción	Valores posibles	Asignación
Remoción de contaminantes	Comprende el porcentaje de remoción de contaminantes basados en los parámetros críticos (3.2)	1	Tecnologías que tengan un mayor porcentaje de remoción de los parámetros críticos (3.2) tendrán un mayor puntaje.
		2	
		3	
		4	
		5	
Costos de implementación	Inversión para la implementación de la tecnología.	1	Tecnologías que necesiten de un menor costo de implementación tendrán valores más altos de calificación.
		2	
		3	
		4	
		5	
Costos de operación y mantenimiento	Comprende el desarrollo de tareas de monitoreo, reparación y mantenimiento; su frecuencia y el tipo de personal que las ejecuta.	1	Tecnologías que requieran con mayor constancia realizar estas actividades, así como personal altamente capacitado, tendrán un puntaje menor de calificación.
		2	
		3	
		4	
		5	

## 4. Resultados

### 4.1. Caracterización de agua lluvia

**4.1.1 Filtrado y selección de casos de estudio** De las búsquedas con las dos combinaciones se obtuvo un resultado neto de 823 artículos; al aplicar el filtro por título se escogieron 252; luego de la lectura de los resúmenes de los artículos fueron escogidos 49 y finalmente, fueron seleccionados 9 documentos (ver Apéndice E) conforme a su contenido.

### 4.1.2 Caracterización de agua lluvia

**4.1.2.1 Captación de agua lluvia** La Tabla 3 muestra los eventos de lluvias captados para su respectivo muestreo. Cada aforo tuvo una duración de 30 minutos, con un lapso de tomas de muestra de 10 minutos. Los resultados de los aforos obtenidos pueden ser visualizados en el Apéndice G.

*Tabla 3.*  
*Eventos de precipitación muestreados.*

<b>Evento</b>	<b>Hora</b>	<b>Día</b>	<b>Mes</b>	<b>Años</b>
1	01:05	01	Diciembre	2019
2	18:17	08	Diciembre	2019
3	03:15	24	Enero	2020
4	00:46	30	Enero	2020

**4.1.2.2 Caracterización de muestras** A partir del muestreo del agua lluvia en los 4 eventos descritos anteriormente, de los cuales fueron obtenidos a partir del análisis laboratorio (ver Tabla 4). Cada muestra se identificó con un número de acuerdo con su obtención acompañados de la letra “C”.

*Tabla 4.*  
*Resultados caracterización agua lluvia.*

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>1C</b>	<b>2C</b>	<b>3C</b>	<b>4C</b>
Alcalinidad	mg/L $\text{CaCO}_3$	80	54	52	186
Turbiedad	UNT	26	12	12	105
Color Aparente	UPC	122	62	60	475
Sólidos Totales	mg/L	342	110	94	256
Cloruros	mg/L $\text{Cl}^-$	<5	<5	<5	<5
Nitratos	mg $\text{NO}^-3$ -N/L	3.82	0.23	0.35	0.6
Nitritos	mg $\text{NO}^-2$ -N/L	0.18	0.01	0.03	0.01
Dureza Total	mg $\text{CaCO}_3$ /L	192	49	50	49
Sulfatos	mg $\text{SO}_4$ /L	19	<10	<10	<10
Coliformes Totales	NMP/100 ml	170	350	47	920
<i>E. coli</i>	NMP/100 ml	2	4.5	14	40
Plomo	mg/L	<0.1	<0.1	<0.1	0.03
Hierro	mg/L	0.35	0.13	<0.08	3.64
Zinc	mg/L	0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Manganeso	mg/L	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2

**4.1.2.3 Análisis de parámetros** A continuación, se muestra el análisis a partir de los resultados obtenidos en laboratorio; fueron comparados los valores promedios de cada parámetro respecto a las normativas y casos de estudio revisados (ver Apéndice H).

Cabe resaltar que fueron tomados en cuenta datos de muestreos anteriores en el mismo punto (Chinchilla & Paredes, 2019), aunque no pueden ser sumados al análisis estadístico del actual muestreo, ya que los protocolos difieren en los intervalos de tiempo usados; siendo el caso de los predecesores un intervalo único de tiempo.

- **Alcalinidad:** Estos valores variaron entre 52 y 186 mg/L  $\text{CaCO}_3$  con un promedio de 93 mg/L  $\text{CaCO}_3$ ; valor alto respecto al estudio previo realizado en el edificio con 57.88 mg/L  $\text{CaCO}_3$  (Chinchilla & Paredes, 2019). Bajos niveles de alcalinidad pueden producir corrosión a las tuberías de distribución (*Guidelines for Drinking-water Quality FOURTH EDITION INCORPORATING THE FIRST ADDENDUM*, 2010); sin embargo, en el caso de estudio los niveles no fomentan la corrosión.
- **Turbiedad:** Durante los 3 primeros eventos, se obtuvieron valores entre 12 y 26 UNT, los cuales muestran un comportamiento típico respecto a los casos bibliográficos consultados (Wang, Tian, & Zhao, 2017)-(Zhu, Zhang, Hart, Liu, & Chen, 2004) donde se obtuvieron valores entre 12.6 y 18.3 para aguas lluvias captadas en edificaciones públicas de China y Malasia, y valores bajos respecto al anteriormente caracterizado (35 UNT)(Chinchilla & Paredes, 2019). El último evento que se analizó en esta investigación, representa un comportamiento atípico con respecto a los valores anteriores, obteniéndose 105 UNT. Este evento al ser de gran intensidad trae consigo mayor cantidad de material arrastrado a través del sistema de captación y transporte, por lo tanto, este es un valor crítico que afecta a la media de los eventos mostrando un valor atípico para los estudios, elevando el valor de la turbiedad por

encima de las normativas propuestas. En el caso de descarga de inodoros, las normativas más estrictas establecen un límite de 2 UNT. Por su parte, para riego agrícola, el límite es de 5 UNT (Consejo de la Unión Europea, 1998; Health Canada, 2010; Modalidades, 2015). Tenido en cuenta los casos de estudio, los valores más altos son provenientes de sólidos arrastrados por las carreteras de concreto (M. M. Islam, Chou, Kabir, & Liaw, 2010; Rashidi Mehrabadi, Saghafian, & Ghalkhani, 2017; Zhu et al., 2004), o asfálticas en el caso del proyecto en estudio.

- **Color Aparente:** El valor obtenido estuvo entre 60 y 122 UPC para los primeros 3 eventos, los cuales muestran un comportamiento típico respecto a los casos bibliográficos consultados (M. M. Islam et al., 2010) donde se obtuvieron valores de 166 UPC para aguas lluvias captadas en edificaciones públicas de Malasia. El estudio previo presentó valores de mayor magnitud entre 148 y 225 UPC (Chinchilla & Paredes, 2019). Según la bibliografía estudiada, los valores para estos parámetros solo son tomados en cuenta en zonas de captación como lo son las carreteras en concreto, lo cual da a entender que los diferentes tipos de poluciones por la que están expuestas estas zonas debido a la presencia de automotores afectan al color aparente del agua captada, debido a la gran cantidad de transporte de coloides en el ambiente. Aunque la zona de estudio presenta una cantidad baja de aforo vehicular los valores obtenidos superan al caso en comparación. El alto valor de color aparente puede deberse a una baja frecuencia de mantenimiento realizado al punto de muestreo (caja de inspección) puntualmente en las tuberías de salida hacia la caja, las cuales presentan crecimiento de raíces que podrían afectar el agua que circula. Otro factor importante que podría estar influyendo en este parámetro son los problemas de drenaje y de arrastre de sedimentos, lo cual puede aportar a la acumulación de coloides en el agua captada.

- **Sólidos Totales:** Estos valores variaron entre 94 y 342 mg/L con un promedio de 201 mg/L. Los sólidos totales estudiados muestran alta concentración respecto a los vistos en los casos bibliográficos, estos valores varían entre 50 y 98 mg/L (Cook, Sharma, & Gurung, 2014; Gomez-Ullate, Novo, Bayon, Hernandez, & Castro-Fresno, 2011). Este parámetro es asociado a la turbidez y al color (Carriña & Ramírez, 2017), la alta concentración de estos podría deberse a la concentración elevada de sólidos totales en el agua captada, ya sea por el arrastre de material en las vías o dentro del sistema de transporte.
- **Cloruros:** Los valores se encontraron por debajo del límite detectable por el método de laboratorio ( $<5 \text{ mg Cl}^-/\text{L}$ ) Este valor se encuentra por debajo de los casos de estudios consultados (Zhang et al., 2014) donde se obtuvo un valor de  $20 \text{ mg/L Cl}^-$ , y respecto a la caracterización previa de  $9.36 \text{ mg/L Cl}^-$ . Este parámetro no es tomado en cuenta por normativas sobre descarga de inodoros, respecto al riego agrícola los valores se encuentran por debajo del valor límite más conservador ( $150 \text{ mg Cl}^-/\text{L}$ ) (*Guidelines for Drinking-water Quality FOURTH EDITION INCORPORATING THE FIRST ADDENDUM*, 2010).
- **Nitritos y nitratos:** El valor promedio se obtuvo una concentración de nitratos de  $1.25 \text{ mgNO}^3\text{-N/L}$ , con valor mínimo de  $0.23 \text{ mgNO}^3\text{-N/L}$  y un máximo de  $3.82 \text{ mgNO}^3\text{-N/L}$ . El valor promedio coincide dentro del rango observado en los casos de estudio (C B Mendez et al., 2011; Wang et al., 2017; Zhu et al., 2004) que varían entre  $0.11$  y  $1.5 \text{ mgNO}^3\text{-N/L}$ , y cercanos a los anteriormente obtenidos ( $0.5$  y  $4.5 \text{ mgNO}^3\text{-N/L}$ ) (Chinchilla & Paredes, 2019). Los valores obtenidos son aceptables para su aprovechamiento en descarga de inodoros (Consejo de la Unión Europea, 1998; Modalidades, 2015) y riego (Inwqs, 2014; Peruano & Ejecutivo, 2015; US Environmental Protection Agency, 2012), con un límite mínimo de  $10$  y  $5 \text{ mgNO}^3\text{-N/L}$  respectivamente. Respecto a los nitritos se obtuvo una concentración de  $0.06 \text{ mgNO}^2\text{-N/L}$ .

N/L, con valor mínimo de 0.1 mgNO<sup>2</sup>-N/L y un máximo de 0.18 mgNO<sup>2</sup>-N/L. El valor promedio está en el rango de los observados en los casos de estudio (C B Mendez et al., 2011) con valores <1 mgNO<sup>2</sup>-N/L, y la media obtenida previamente (0.084) (Chinchilla & Paredes, 2019). Los valores obtenidos son aceptables para su aprovechamiento en descarga de inodoros (Consejo de la Unión Europea, 1998; Modalidades, 2015) con un límite mínimo de 0.5 mgNO<sup>2</sup>-N/L.

- **Dureza total:** La dureza total presentó un mínimo 49 mg CaCO<sub>3</sub>/L y un máximo 192 mg CaCO<sub>3</sub>/L, con un promedio 85 mg CaCO<sub>3</sub>/L. Para la edificación institucional en China (Zhu et al., 2004) obtuvo valores entre 259.38 y 706.14 mg CaCO<sub>3</sub>/L, cifras por encima de las obtenidas en este estudio, aunque, la media obtenida anteriormente en el edificio era de 88 mg CaCO<sub>3</sub>/L, valor cercano al obtenido en el estudio actual. Estos valores bajos de dureza (aguas blandas) tienen baja capacidad de amortiguación, lo que permitiría ser más corrosivo para las tuberías de distribución (*Guidelines for Drinking-water Quality FOURTH EDITION INCORPORATING THE FIRST ADDENDUM*, 2010).
- **Sulfatos:** Este rango de valores se encuentran entre 10 y 19 mg SO<sub>4</sub>/L. Estos valores están por debajo de los observados en el caso de estudio seleccionado en la revisión de literatura (Zhang et al., 2014) donde presenta un valor promedio de 50 mg SO<sub>4</sub>/L, y la media cercana a 12.69 mg SO<sub>4</sub>/L obtenida por el estudio previo (Chinchilla & Paredes, 2019). Para la normativa (Peruano & Ejecutivo, 2015) los sulfatos deben de tener un valor menor a 1000 mg SO<sub>4</sub>/L, por lo tanto, presenta valores bajos que no afecta su aprovechamiento en el riego agrícola. La concentración de sulfatos en el agua captada se puede deber a las emisiones de tráfico o a actividades de construcción (polvo de yeso) cercanas (Mundial de la Salud, 2010).

- **Parámetros Microbiológicos** Por el tipo de zonas de captación del proyecto hay una gran cantidad de agentes externos que pueden afectar la calidad del agua en el ámbito microbiológico. Su existencia es producto de materiales fecales, principalmente de pájaros, roedores y lagartos, que se depositan en la zona de captación (OMS, 2004).
- **Coliformes Totales:** El valor obtenido estuvo entre 47 y 920 NMP/100 ml, los cuales muestran un comportamiento típico respecto a los casos bibliográficos consultados donde se obtuvieron valores entre 50 y 667 NMP /100 ml (M. M. Islam et al., 2010; C B Mendez et al., 2011) para aguas lluvias captadas en edificaciones públicas de Estados Unidos y Malasia. Sin embargo, los valores analizados se encuentran en un rango menor respecto a la caracterización previa (604 – 4890 NMP/100 ml) (Chinchilla & Paredes, 2019). Este valor es inaceptable para el caso de las normativas más conservadoras (Consejo de la Unión Europea, 1998; Modalidades, 2015; Peruano & Ejecutivo, 2015) para su aprovechamiento en la descarga de inodoros y (Ministerio de Ambiente y Energía & Ministerio de Salud de Costa Rica, 2007) en riego agrícola (100 NMP/100 ml).
- ***E. coli:*** El valor obtenido estuvo entre 2 y 40 NMP/100 ml, los cuales muestran un comportamiento típico respecto a los casos bibliográficos consultados (M. M. Islam et al., 2010; C B Mendez et al., 2011), donde se obtuvieron valores de 2 NMP/100 ml y 2.05 NMP/100 ml para aguas lluvias captadas en edificaciones públicas de Estados Unidos y Malasia. Aunque los valores permanecen debajo de las normativas (con amplia diferencia) a excepción de las guías de reúso australiana (National Water Quality Management, 2009) que presenta un límite de 10 NMP/100 ml, aunque con una diferencia aceptable respecto a las unidades usadas.

- **Metales pesados:** Los parámetros analizados asociados a los metales (Pb, Fe, Zn y Mn) muestran una baja cantidad de estos materiales en el agua lluvia recolectada. La presencia de Zn, Mn y Pb en todos los aforos realizados se encuentra por debajo del límite de cuantificación propuesto por el laboratorio según el método usado por este. El Pb al ser comparado con las normativas, se observó una restricción del valor del metal a un valor menor del límite de cuantificación por parte de una de estas normas (Peruano & Ejecutivo, 2015), por lo tanto, fue necesario optar por un procedimiento diferente por parte del laboratorio, al cambiar dicho método de análisis para los dos últimos eventos, se logra apreciar el cumplimiento de la concentración de este metal dentro de las normativas usadas para este proyecto. En conclusión, la presencia de metales en el agua lluvia captada por el edificio se encuentra por debajo de la normativa establecida, respecto a los casos de estudios presentan cierta similitud con el actual (M. A. Islam, Sakakibara, Karim, Sekine, & Mahmud, 2011; Carolina B. Mendez et al., 2011; Rashidi Mehrabadi et al., 2017; Vijayaraghavan, 2016; Zhang et al., 2014); En la caracterización previa, metales como el Pb presentaron niveles por encima de lo esperado (0.41 mg/L) (Chinchilla & Paredes, 2019), aunque aceptable para las normativas.

## 4.2. Tecnologías de tratamiento de aguas lluvia

**4.2.1 Filtrado y selección** De las cuatro búsquedas realizadas se obtuvo un resultado neto de 1828 artículos. Del proceso de filtrado por título se escogieron 197; luego de leer los resúmenes de los artículos previamente escogidos se filtraron 82 y finalmente, fueron seleccionados 6 documentos conforme a su contenido. En el Apéndice J se puede apreciar el proceso descrito.

La segunda revisión denotó con los términos (“rainwater” AND “treatment” AND “public buildings” OR “campus” excluyendo los términos “residential” AND “house” AND “review” AND “greywater”) 3170 resultados de los cuales fueron 7 seleccionados.

**4.2.2 Estado de la información** Los procesos de búsqueda y filtrado desarrollados previamente permitieron realizar un análisis acerca del estado que presenta el área de investigación, en cuanto al tema de tecnologías para el tratamiento de agua lluvia para uso no potable en edificaciones públicas.

Respecto a la distribución de los años de publicación de los artículos se identificó que la mayoría de estos son del 2019. Casi la totalidad fueron publicados en la última década (ver Apéndice J).

Según la clasificación de los documentos estuvieron implicados 10 países diferentes; Brasil encabeza como país en la producción de documentos de esta índole con 5 documentos, seguido por Colombia con 3 (Ver Apéndice J).

De los 13 documentos seleccionados, fueron revisadas sus respectivas bibliografías, 4 de los artículos referenciados fueron añadidos a los documentos seleccionados, así fueron 17 artículos totales los elegidos para su respectiva caracterización (ver Apéndice J).

**4.2.3 Normativas** Dentro de la revisión de literatura se identificaron las normativas usadas para la comparación de la calidad de agua para su posterior aprovechamiento (Ver Tabla 4). En total se encontraron 6 normativas, 4 lineamientos para el aprovechamiento en descarga de sanitarios y 2 en riego agrícola.

*Tabla 5.*  
*Normativas usadas en casos de estudio.*

<b>Normativa</b>	<b>País</b>
<b>Descarga de Sanitarios</b>	
Directive 2914/2011	Brasil
COMONA	Brasil
ABNT	Brasil
Permenkes RI No. 416	Indonesia
<b>Riego agrícola</b>	
RD 1620/2007	España
Decreto 1594 de 1984	Colombia

**4.2.4 Caracterización de tecnologías** De los 17 archivos se identificaron 9 diferentes tecnologías usadas en el tratamiento de agua lluvia en edificaciones institucionales para su aprovechamiento en descarga de sanitarios y riego agrícola.

#### **4.2.4.1 Tratamiento preliminar**

- **Desviador primer flujo:** El primer flujo de agua lluvia captada es una de las principales causas de la degradación de la calidad del agua recolectada (Despins, Farahbakhsh, & Leidl, 2009; Yue & Tang, 2011), ya que los primeros milímetros de lluvia contienen una alta concentración de

contaminantes de la atmósfera y de partículas que se han depositado sobre la superficie de las zonas de captación. Estos dispositivos se fundamentan en que la concentración de contaminantes disminuye exponencialmente durante los primeros milímetros de precipitación, observando esta tendencia para una variedad de contaminantes que incluyen sólidos suspendidos, HAP, compuestos orgánicos y metales (Despins et al., 2009). Esta clase de tecnologías operan de manera automática y son fáciles de instalar, además, estos dispositivos reducen la necesidad de mantenimiento de los procesos de tratamiento. Los sistemas de intercepción de primeras lluvias pueden ser también equipados con filtros de fibras para remover partículas y nutrientes tales como fosfatos y nitrógeno (Henao & Castaño, 2016).

- **Sedimentador:** Se basa en la separación, por la acción de la gravedad, de partículas discretas suspendidas cuyo peso específico es mayor que el del agua (Arboleda, 2000). Este proceso elimina tanto pequeñas partículas suspendidas no deseadas (arena, limo y arcilla) como algunos contaminantes biológicos del agua bajo la influencia de la gravedad (*Mantenimiento De Desarenadores Y*, 2005). Cuanto más tiempo permanece el agua inmóvil dentro del tanque de sedimentación, más partículas finas comienzan a asentarse. Debido a que muchos patógenos, como bacterias, virus, protozoos y helmintos, están adheridos a las partículas en suspensión, la reducción de la turbidez también mejora la calidad microbiológica, aunque en menor medida (Amagloh & Benang, 2009).

#### **4.2.4.2 Tratamiento**

- **Filtro lento de arena:** La técnica de filtración lenta en arena es tradicionalmente un método de tratamiento de bajo costo y de fácil construcción. En esta clase de filtros, el tratamiento se logra mediante un ecosistema controlado de microorganismos y filtraciones a través de la

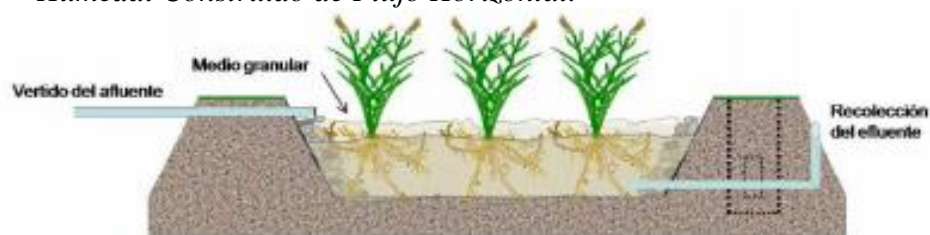
arena. La calidad del efluente está influenciada principalmente por el flujo de agua, la profundidad de la columna de arena y la calidad de la arena utilizada como medio de filtración, especialmente su tamaño y uniformidad (L. Huisman; W.E Wood, 1974). Estos filtros se pueden emplear para el tratamiento eficaz de la turbidez (partículas suspendidas como limo y arcilla), color y microorganismos (Mundial de la Salud, 2010). Los filtros lentos de arena solo son adecuados para aguas de turbidez baja o sometidas a filtración previa, ya que pueden taparse rápidamente los lechos de arena fina (Mundial de la Salud, n.d.); son recomendados para tratar aguas con valores de turbiedad menores a 10 UNT (Moreira Neto, Calijuri, Carvalho, & Santiago, 2012).

- **Coagulación/floculación:** Esta clase de tratamiento está basado en el uso de químicos (p. ej. coagulantes de aluminio y hierro), los cuales son efectivos para desestabilizar y remover partículas coloidales (Hargreaves et al., 2018). Para su efectividad, este proceso es aplicado en conjunto con métodos de floculación, sedimentación y filtración. Una desventaja del uso de químicos para este tratamiento es la necesidad de un constante monitoreo de la dosis de coagulante para asegurar el buen funcionamiento del sistema, por lo tanto, la contratación de operarios es fundamental, reduciendo la autonomía del proceso y elevando sus costes de funcionamiento.
- **Humedales construidos:** Los humedales son zonas inundadas por aguas superficiales, capaces de soportar vegetación que se adapta a las condiciones saturadas del suelo. Estas áreas se inundan por ciertos períodos de tiempo y permiten purificar el agua (Kolecka, Obarska-Pempkowiak, & Gajewska, 2018). Son diseñados para que la remoción de contaminantes del agua sea maximizada, a través de procesos como: sedimentación, filtración, oxidación, reducción, adsorción y precipitación, manteniendo un caudal adecuado para que haya un buen

crecimiento de la vegetación y un buen desarrollo de los procesos ya mencionados (Dušek, Pícek, & Čížková, 2008). La remoción de esta clase de tecnologías se centra en los parámetros microbiológicos del agua, algunas investigaciones muestran porcentajes de eliminación en coliformes totales de 90% y *E. coli* de 87% (Galarza-Molina et al., 2015). En casos como el sistema de la Pontificia Universidad Bolivariana en la ciudad de Bogotá, cuenta con un humedal construido de flujo subsuperficial horizontal (PUJ) (Andrés, Borrero, & De, 2014). En este humedal el agua a tratar se distribuye por toda la superficie y después baja a través del material granular para poder ser tratada; se constituyen por estructuras de entrada, impermeabilización, medio granular, vegetación y estructuras de salida y también pueden tener tuberías de aireación que sirven para airear el lecho y favorecer los procesos aeróbicos que se desarrollan en el humedal (Kadlec & Wallace, 2009) (ver Figura 8). Sin embargo, presentan ciertas limitaciones, tales como las grandes extensiones de terreno requeridas para su construcción, en comparación con otro tipo de tratamientos. Adicionalmente, según las condiciones ambientales, su efectividad puede ser constante o no, los componentes biológicos no pueden estar en contacto con agentes tóxicos y necesitan la constante permanencia de agua para poder sobrevivir (Lara Borrero, 1999).

Figura 8.

*Humedal Construido de Flujo Horizontal.*



*Nota:* Tomado de (Kadlec & Wallace, 2009).

- **Filtración por membrana:** La filtración por membranas es una técnica usada para separar contaminantes, haciéndolas pasar por un material poroso. El empleo de la filtración por membrana se divide ya sea según su tamaño de poro: microfiltración (MF), ultrafiltración (UF), nanofiltración (NF) y ósmosis inversa (Du et al., 2019). Los primeros dos procesos se recomiendan principalmente para la separación sólido/líquido y la eliminación de partículas. La ultrafiltración retiene partículas minerales y orgánicas, así como partículas biológicas (algas, bacterias y virus), además de eliminar las moléculas orgánicas disueltas (Orozco, Nava, Guarneros, & Caballero, 2019). La técnica UF es el proceso más eficiente, logrando una mejor tasa de flujo en operación constante y en procesos de retro lavado, así como mayores tasas de remoción (Ortega Sandoval, Barbosa Brião, Cartana Fernandes, Hemkemeier, & Friedrich, 2019). El Grupo de Investigación En Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental (GPH) cuenta con una membrana de UF, cuenta con un consumo de energía menor al promedio. Sin embargo, esta clase de tecnología no elimina los contaminantes, solo los concentra; presenta altos costes comerciales de adquisición, y necesita de limpieza física y química periódica para su óptima operación, la falta de mantenimiento incrementaría los costos de operación y reduce la vida de media de la membrana (Wu, Soon, & Chong, 2019).
- **Filtro de carbón activado:** Los filtros de carbón activado para agua son útiles en la eliminación de productos químicos como el cloro y el sulfuro de hidrógeno; además de contaminantes orgánicos como plaguicidas, herbicidas, insecticidas, compuestos cancerígenos, entre otros, que dan un mal olor y sabor al agua potable (Manuel & Nievas, 2017). El carbón activado es empleado en diversas aplicaciones de purificación de líquidos pues es uno de los materiales con más superficie específica. El carbón activado tiene un área de 500 m<sup>2</sup> por cada

gramo, una mayor superficie significa una mayor capacidad de absorción, filtrando partículas que podrían cambiar el olor y sabor del agua (Ludlow, 2006). El agua efluente del filtro resulta de alta calidad ya que no utiliza ningún químico, retiene partículas orgánicas y algunas inorgánicas, por otro lado, se debe tener en cuenta que este filtro debe tener un mantenimiento periódico consistente en un lavado con frecuencia para su correcto funcionamiento, lo que puede llevar a una pérdida del material; esta clase de tecnología no es apta para la remoción de contaminantes microbiológicos (Yulistyorini, Idri, & Fahmi, 2018).

#### ***4.2.4.3 Desinfección***

- **Cloración:** Este proceso complementa el proceso de filtración. Además de destruir microorganismos, también reduce la cantidad de hierro, manganeso y sulfatos en el agua (Mundial de la Salud, 2010). La cloración tiene los beneficios de ser relativamente rápida, simple y económica permitiendo que una cantidad residual de cloro permanezca en el agua para proporcionar cierta protección contra la recontaminación (Mundial de la Salud, 2010). Entre las desventajas de este proceso de tratamiento, se puede decir que requiere la compra de cloro de forma continua, lo cual incrementa de manera gradual los costos de operación. Además, la cloración de agua con una gran cantidad de materia orgánica, conlleva al riesgo de formación de subproductos tóxicos de desinfección.
- **Desinfección UV:** La purificación del agua mediante rayos ultravioleta (UV) es un método rápido y efectivo para desinfectar el agua de consumo humano. Este método de purificación destruye más del 99.9% de patógenos que se encuentran en el agua, requiere muy poco tiempo de contacto para su poder germicida (Wisbeck, Sandri, Soares, & Medeiros, 2011). Ningún otro medio de desinfección es tan efectivo como los sistemas que usan irradiación de luz UV,

además es de fácil mantenimiento e instalación. Esta no cambia las propiedades del agua ni afecta a quien la consume (Mundial de la Salud, 2010). Por otro lado, la profundidad de penetración de esta radiación en el agua es limitada, dificultando su actuación el color y la turbiedad del agua por lo que, para aumentar el rendimiento en la eliminación de microorganismos, se deben irradiar solo láminas delgadas de agua. Su aplicación solo se reduce a aguas claras y no contaminadas, también con el transcurso del tiempo, las lámparas suelen ensuciarse, lo que reducirá la capacidad de penetración de los rayos; la vida útil de las lámparas es muy limitada (“AVALIAÇÃO DA DESINFECÇÃO DE ÁGUA POR REATOR UTILIZANDO RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA. | Lobo | Revista de Ciências Ambientais,” n.d.).

**4.2.5 Propuesta de tratamiento** Para el tratamiento del agua lluvia captada por el edificio se plantearon dos trenes de tratamiento diferentes, teniendo en cuenta que no todas las tecnologías previamente caracterizadas son idóneas para el tratamiento del agua lluvia analizada o para su implementación a esta escala.

Las propuestas de trenes de tratamientos se dividen en tres etapas, en primera instancia una etapa de tratamiento preliminar adecuada para la reducción de carga contaminante; una segunda etapa de tratamiento y finaliza con una etapa de desinfección En la tabla 6 se presentan los resultados de la calificación cualitativa de las tecnologías en estudio.

Para un mejor análisis del aspecto de remoción de contaminantes fue dividido en dos sub aspectos: remoción de contaminantes fisicoquímicos (turbiedad y color) y remoción de contaminantes microbiológicos (coliformes totales y *E. coli*). Estos aspectos fueron valorados respecto a datos de remociones extraídos de los casos de estudio encontrados en el inciso 2.1.2. (ver Apéndice L).

Las tecnologías consideradas no aplicables presentan una baja calificación para el contexto de estudio, las cuales se presentan a continuación: i) la coagulación como mayor problemática necesita de equipos y operarios especializados que afecta la autonomía del proceso ii) la filtración en carbón activado tiene como propósito en el tratamiento la adsorción de partículas disueltas, entre ellas metales pesados, esta clase de partículas no fueron detectadas en medidas considerables (ver Apéndice E), aunque sea de bajo precio de adquisición el mantenimiento y el cambio constante del material usado como lecho vuelve su costo de operación elevado; iii) los humedales construidos cuentan con una excelente calidad de remoción de contaminantes (ver Apéndice L), pero estas requieren de grandes áreas para su óptima adecuación, terreno con el que no cuenta el edificio y al ser un ecosistema artificial este debe permanecer en cierto equilibrio para su buen funcionamiento, lo que eleva los aspectos económicos analizados. iv) tecnologías de desinfección mediante radiación UV no son factibles para operaciones a esta escala, necesitan de láminas delgadas de agua para una remoción microbiológica confiable.

Tabla 6.  
Calificación cualitativa de tecnologías.

	Tecnología	Remoción de contaminantes		Costos de inversión	Costos de operación y mantenimiento	Calificación
		Fisicoquímicos	Microbiológicos			
TRATAMIENTO	Filtro lento de arena	3	4	5	4	16
	Humedal construido	3	4	1	1	9
	Filtración por membrana	4	4	4	3	15
	Coagulación/floculación	4	1	3	1	9
	Filtro carbón activado	3	2	4	2	11
DESINFECCIÓN	Cloración	1	5	4	3	13
	Desinfección UV	1	5	3	2	11

Teniendo en cuenta los valores obtenidos en la Tabla 6 la propuesta de tecnologías para el tratamiento del agua lluvia está compuesta por: el primer tren está compuesto por un desviador del primer flujo, el cual evita que los primeros mm de lluvia con la mayor carga contaminante lleguen al sistema, seguido de un tanque sedimentador, capaz de reducir los niveles de turbiedad, además de evitar que grandes partículas entren a la siguiente etapa. Como tratamiento se propone un filtro lento en arena, este se encarga de reducir parámetros como el color, la remoción en menor medida de la turbiedad y un gran porcentaje de contaminantes microbiológicos (ver Apéndice L); y un sistema de cloración. Aunque el tratamiento podría remover microorganismos de forma considerable, el proceso de cloración permitirá garantizar la eliminación de patógenos del agua y aportar un efecto de desinfección residual en caso de una posible contaminación en la tubería de distribución (ver Figura 9).

Figura 9.

*Primer tren de tratamiento.*

El segundo tren de tratamiento está compuesto por un desviador de primer flujo seguido de un tanque sedimentador como tratamiento preliminar; como tratamiento se propuso una membrana de ultrafiltración, que opere por gravedad con bajas cargas hidráulicas esta (Characteristics & Characteristics, 2005) clase de membrana consta de excelentes tasas de eliminación de contaminantes fisicoquímicos y microbiológicos (ver Apéndice L), además de un bajo consumo de energía. En la etapa final se propone un sistema de cloración como método de desinfección, por las razones que se expusieron anteriormente para el primer tren (ver Figura 10).

Figura 10.

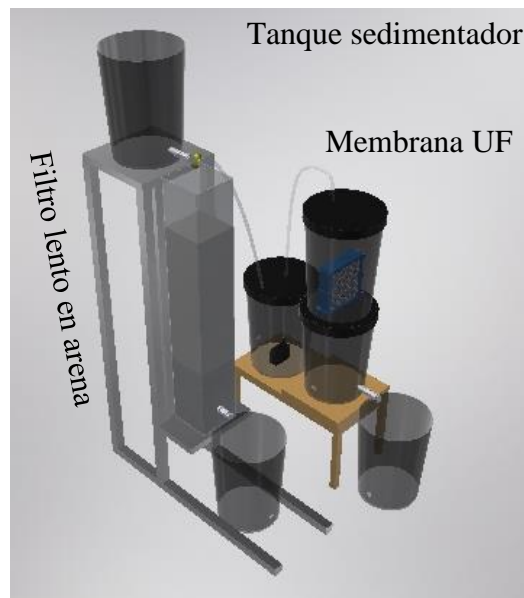
*Segundo tren de tratamiento.*

Es importante mencionar que un estudio anterior (Chinchilla & Paredes, 2019) propone un tren de tratamiento compuesto por una etapa de pretratamiento realizada por filtración con cartuchos, una etapa de tratamiento primario con filtros de carbón activado y una etapa de desinfección con cloración. Sin embargo, este sistema consta de etapas innecesarias para el tratamiento del agua caracterizada; sin la necesidad de la adsorción de metales o productos químicos del agua captada, por lo que no se justificaría el uso del filtro de carbón activado (Ludlow, 2006).

Para la evaluación del desempeño de los dos trenes propuestos en futuros estudios, se diseñaron modelos prototipos a escala de laboratorio (ver Figura 11).

Figura 11.

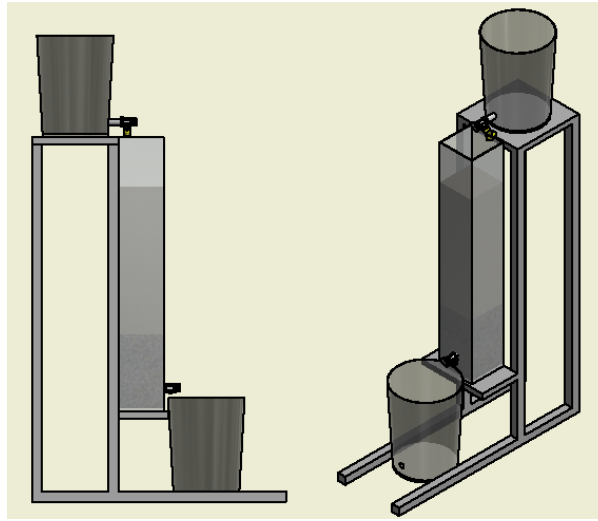
*Configuración trenes de tratamiento a escala de tratamiento.*



Este sistema está compuesto por un tanque sedimentador que divide el agua lluvia, en primera instancia se encuentra un filtro lento de arena con un lecho de grava como soporte, estos lechos se encuentran confinados por una columna hueca de vidrio de 4 mm de espesor; el agua tratada es recolectada por un tanque en la parte inferior del sistema (ver Figura 12).

Figura 12.

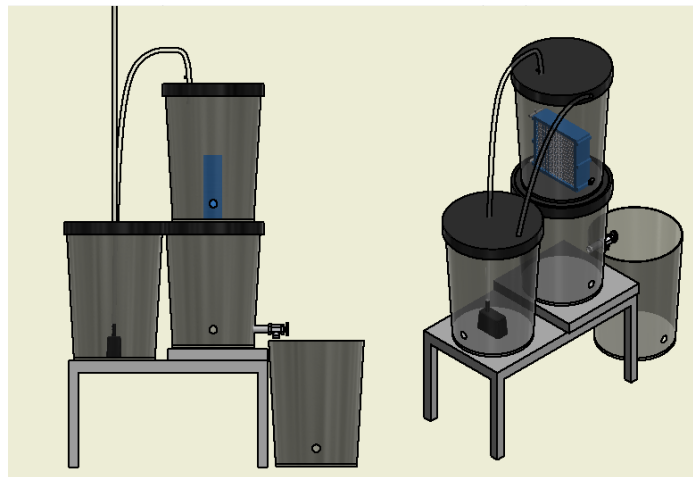
*Primer tren de tratamiento a escala de laboratorio.*



En paralelo se encuentra el tratamiento a través de la membrana UF, está compuesta por un primer tanque encargado de recibir el agua sedimentada, luego es bombeada a un tanque intermedio donde la membrana reduce la carga contaminante del agua, y así ser almacenada por un tanque final (ver Figura 13).

Figura 13.

*Segundo tren de tratamiento a escala de laboratorio.*



## 5. Conclusiones

Un 74% de los parámetros caracterizados en el agua lluvia captada en el edificio E3T de la UIS cumplen con los lineamientos de aprovechamiento del agua en actividades como riego y descarga de sanitarios, durante las campañas de monitoreo efectuadas en este estudio. Los parámetros restantes compuestos por turbiedad, color, coliformes totales y *E. coli* incumplen los límites establecidos en las normativas consultadas, por lo cual indican la necesidad de un tratamiento. La turbiedad y el color se encontraron altamente con valores promedio de 39.75 UNT y 179.75 UPC, estos se encuentran por encima de todos los lineamientos estudiados, siendo estos los más críticos.

El descuido del sistema de transporte y de captación (vías de acceso), así como los problemas de drenaje contribuyen a que la turbiedad y el color superen los niveles máximos de las normativas. Estas ocurrencias también favorecen la presencia de coliformes totales y *E. coli*, aunque en menor medida superan los límites para su aprovechamiento en descarga de sanitarios y riego agrícola.

Se identificaron 9 tipos de tecnologías diferentes, usadas en edificaciones institucionales para el aprovechamiento de agua lluvia (sedimentador, desviador de primer flujo, filtración lenta de arena, tratamiento por membrana, humedales construidos, cloración, coagulación, desinfección UV y filtración por carbón activado); las tecnologías más usadas para esta clase de edificaciones son los tratamientos por membrana y los filtros lentos en arena.

Se propusieron dos trenes de tratamiento para el aprovechamiento de agua lluvia en la descarga de sanitarios y riego agrícola para el edificio E3T; el primer tren de tratamiento consta de un desviador de primer flujo seguido de un tanque sedimentador seguido de un filtro lento en arena y un sistema de cloración; un segundo tren compuesto de un desviador de primer flujo seguido de un tanque sedimentador seguido de una membrana de ultrafiltración y un sistema de cloración.

Con el fin de facilitar la toma de decisiones para la implementación del sistema de aprovechamiento de agua lluvia en el edificio, se recomienda que, en estudios posteriores, se analice el desempeño de las tecnologías seleccionadas mediante los prototipos a escala de laboratorio que se diseñaron en esta investigación.

### **Referencias bibliográficas**

- Amagloh, F. K., & Benang, A. (2009). Effectiveness of Moringa oleifera seed as coagulant for water purification. *African Journal of Agricultural Research*, 4(2), 119–123.
- Andrés, J., Borrero, L., & De, D. (2014). *Remoción de Patógenos con Humedales Construidos Para Aprovechamiento de Aguas Lluvias en la Pontificia Universidad Javeriana*. Alejandra Corrales Duque Facultad de Ingeniería Departamento de Ingeniería Civil. 1–66.
- Arboleda, J. (2000). Teoría y práctica de la purificación del agua. In *Colombia: Ed. Mc Graw Hill*. Retrieved from <http://fing.uncu.edu.ar/catedras/sanitaria/archivos/libros-arboleda-valencia/Teoria y Practica de la Purificacion del H2O - Tomo 1 - Arboleda Valencia.pdf>
- AVALIAÇÃO DA DESINFECÇÃO DE ÁGUA POR REATOR UTILIZANDO RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA. | Lobo | Revista de Ciências Ambientais. (n.d.). Retrieved July 12, 2020, from <https://revistas.unilasalle.edu.br/index.php/Rbca/article/view/112/128>
- Benavides Garzón, D. L., Castro Molano, M. Y., & Vizcaíno Cagüño, H. M. (2006). *Optimización Del Acueducto Por Gravedad Del Municipio De Timaná (Huila)*. 266.
- Carmiña, D., & Ramírez, R. (2017). *Método de Estimación de Sólidos Suspendidos Totales como Indicador de la Calidad del Agua Mediante Imágenes Satelitales*.
- Castañeda, N. (2010). Rainwater system proposal as an alternative to save drinking water in the educational institution María Auxiliadora from Caldas, Antioquia. *Gestión y Ambiente*, (2), 25–40.
- Characteristics, F., & Characteristics, M. (2005). *CUBE Mini Module ( FM 045 ) General description of CUBE® Mini Filter*. (Fm 045), 0–2.
- Chinchilla, J. C., & Paredes, S. A. (2019). *Evaluación de las características físicoquímicas y microbiológicas del agua en el sistema de aprovechamiento de aguas lluvias del edificio de la E3T en el campus central de la Universidad Industrial de Santander* (Universidad

- Industrial de Santander). <https://doi.org/10.1037//0033-2909.126.1.78>
- Consejo de la Unión Europea. (1998). Directiva 98/83/CE del Consejo. *Official Journal of the European Communities*, L 330, 32–54. Retrieved from <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=celex:31998L0083>
- Cook, S., Sharma, A. K., & Gurung, T. R. (2014). Evaluation of alternative water sources for commercial buildings: A case study in Brisbane, Australia. *Resources, Conservation and Recycling*, 89, 86–93. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.05.003>
- Despins, C., Farahbakhsh, K., & Leidl, C. (2009). Assessment of rainwater quality from rainwater harvesting systems in Ontario, Canada. *Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA*, 58(2), 117–134. <https://doi.org/10.2166/aqua.2009.013>
- Du, X., Xu, J., Mo, Z., Luo, Y., Su, J., Nie, J., ... Liang, H. (2019). The performance of gravity-driven membrane (GDM) filtration for roofing rainwater reuse: Implications of roofing rainwater energy and rainwater purification. *Science of the Total Environment*, 697. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134187>
- Dušek, J., Pícek, T., & Čížková, H. (2008). Redox potential dynamics in a horizontal subsurface flow constructed wetland for wastewater treatment: Diel, seasonal and spatial fluctuations. *Ecological Engineering*, 34(3), 223–232. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.08.008>
- Galarza-Molina, S., Torres, A., Lara-Borrero, J., Méndez-Fajardo, S., Solarte, L., & González, L. (2015). Hacia un sistema humedal-construido/tanque-regulador para el aprovechamiento de aguas lluvias en una cuenca experimental de Colombia. *Ingeniería y Universidad*, 19(2), 415–421. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.iyu19-2.tcws>
- Garzón, N., & Peña Nathalia, G. R. (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. 000(L), 1–19.*

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. Retrieved from <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/handle/11059/6604>

Gomez-Ullate, E., Novo, A. V., Bayon, J. R., Hernandez, J. R., & Castro-Fresno, D. (2011). Design and construction of an experimental pervious paved parking area to harvest reusable rainwater. *WATER SCIENCE AND TECHNOLOGY*, 64(9), 1942–1950. <https://doi.org/10.2166/wst.2011.175>

Gómez, M., & Silva, M. (2019). Propuesta de tecnologías para el tratamiento de aguas lluvias, como opción para su aprovechamiento en viviendas unifamiliares. Caso de estudio: Bucaramanga (Colombia). *Universidad Industrial de Santander*.

*Guidelines for Drinking-water Quality FOURTH EDITION INCORPORATING THE FIRST ADDENDUM*. (n.d.).

Hargreaves, A. J., Vale, P., Whelan, J., Alibardi, L., Constantino, C., Dotro, G., ... Campo, P. (2018). Coagulation–flocculation process with metal salts, synthetic polymers and biopolymers for the removal of trace metals (Cu, Pb, Ni, Zn) from municipal wastewater. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 20(2), 393–402. <https://doi.org/10.1007/s10098-017-1481-3>

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

Henao, J., & Castaño, Y. (2016). *Gestión ambiental universitaria a partir del aprovechamiento de agua pluvial*. (August), 69. Retrieved from <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/6481/3337H493.pdf?sequence=>

1&isAllowed=y

IDEAM. (2015). *CARÁCTERÍSTICAS CLIMATOLÓGICAS DE CIUDADES PRINCIPALES Y MUNICIPIOS TURÍSTICOS*.

Inwqs. (2014). *National Water Quality Standards For Malaysia Parameter Source : EQR2006 National Water Quality Standards For Malaysia*. 1–5. Retrieved from [http://www.wepa-db.net/policies/law/malaysia/eq\\_surface.htm](http://www.wepa-db.net/policies/law/malaysia/eq_surface.htm)

Islam, M. A., Sakakibara, H., Karim, M. R., Sekine, M., & Mahmud, Z. H. (2011). Bacteriological assessment of drinking water supply options in coastal areas of Bangladesh. *Journal of Water and Health*, 9(2), 415–428. <https://doi.org/10.2166/wh.2011.114>

Islam, M. M., Chou, F. N.-F., Kabir, M. R., & Liaw, C.-H. (2010). Rainwater: A Potential Alternative Source for Scarce Safe Drinking and Arsenic Contaminated Water in Bangladesh. *Water Resources Management*, 24(14), 3987–4008. <https://doi.org/10.1007/s11269-010-9643-7>

Kadlec, R. H., & Wallace, S. D. (2009). *TREATMENT WETLANDS* (Second). Retrieved from <http://www.copyright.com/>

Kolecka, K., Obarska-Pempkowiak, H., & Gajewska, M. (2018). Treatment Wetlands as the Implementation of the Circular Economy. *ROCZNIK OCHRONA SRODOWISKA*, 20(2), 1350–1371.

L. Huisman; W.E Wood. (1974). *SLOW SAND FILTRATION*. Retrieved from <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/38974/9241540370.pdf;jsessionid=847158F2E470D1B552BAB928279B580E?sequence=1>

Lara Borrero, J. A. (1999). *DEPURACION DE AGUAS RESIDUALES URBANAS MEDIANTE HUMEDALES ARTIFICIALES*. (September), 122.

<https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3790.2565>

Ludlow, D. K. (2006). Activated Carbon Adsorption By Roop Chand Bansal and Meenakshi Goyal (Panjab University, Chandigarh, India). CRC Press (an imprint of Taylor and Francis Group). *Journal of the American Chemical Society*, 128(32), 10630–10630. <https://doi.org/10.1021/ja059874h>

*Mantenimiento De Desarenadores Y.* (2005).

Manuel, A., & Nievas, R. (2017). Purificación de agua mediante carbón activo proveniente de la cáscara de arroz. *Utmach*, 1(1), 767–777.

Mendez, C B, Klenzendorf, J. B., Afshar, B. R., Simmons, M. T., Barrett, M. E., Kinney, K. A., & Kirisits, M. J. (2011). The effect of roofing material on the quality of harvested rainwater. *Water Research*, 45(5), 2049–2059. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.12.015>

Mendez, Carolina B., Klenzendorf, J. B., Afshar, B. R., Simmons, M. T., Barrett, M. E., Kinney, K. A., & Kirisits, M. J. (2011). The effect of roofing material on the quality of harvested rainwater. *Water Research*, 45(5), 2049–2059. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.12.015>

Ministerio de Ambiente y Energia, & Ministerio de Salud de Costa Rica. (2007). Reglamento de Vertido y Aguas Residuales N° 33601-MINAE-S. *La Gaceta*, 55(8), 56.

Modalidades, E. (2015). *Resolução conjunta svds/sms n° 09/2014*. 2014, 1–7.

Montes, M. P. (2007). La Gestión del Agua Lluvia y la Reducción de Riesgos Urbanos. *La Gestión Del Riesgo Urbano En América Latina*, 12. Retrieved from <http://www.eird.org/plataforma-tematica-riesgo-urbano/recopilacion-de-articulos/margarita-pacheco.pdf>

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

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

Mundial de la Salud, O. (n.d.). *Guías para la calidad del agua potable*.

National Water Quality Management, S. (2009). *Australian Guidelines for Water Recycling: Managing Health and Environmental Risks (Phase 2)- Stormwater Harvesting and Reuse*. (July), 1–140.

OMS. (2004). Guía De Diseño Para Captación Del Agua De Lluvia. *Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Del Ambiente CEPIS/OPS*, 15. Retrieved from <http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsacd/cd47/lluvia.pdf>

Orozco, L., Nava, P., Guarneros, C., & Caballero, F. (2019). Filtración de agua por membranas. *Revista Avance y Perspectiva*, (4). Retrieved from <https://avanceyperspectiva.cinvestav.mx/filtracion-de-agua-por-membranas/>

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(July). <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2017.07.018>

Pelegrí, M., Font, M., Palol, J., Gómez, J., & Coma, M. (2012). Rainwater harvesting technologies and building application cases . *Tecnologia del Agua*, 32(341), 58–63. Retrieved from <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84867227315&partnerID=40&md5=c8b133768d1c687effeb8d44251365e0>

Peruano, E., & Ejecutivo, P. (2015). *569076 Normas Legales*. 569076–569082.

Rashidi Mehrabadi, M. H., Saghafian, B., & Ghalkhani, H. (2017). Quantitative and qualitative assessment of rainwater harvesting as an alternative water source in semi-industrial areas. *Desalination and Water Treatment*, 65, 125–135. <https://doi.org/10.5004/dwt.2017.20233>

- Rojas, R., & Rojas, R. (2002). *Guía para la vigilancia y control de la calidad del agua para consumo humano*.
- US Environmental Protection Agency. (2012). Guidelines for Water Reuse. *Development*, 26(September), 252. <https://doi.org/EPA16251R-921004>
- Vijayaraghavan, K. (2016). Green roofs: A critical review on the role of components, benefits, limitations and trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 740–752. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.119>
- Wang, X., Tian, Y., & Zhao, X. (2017). The influence of dual-substrate-layer extensive green roofs on rainwater runoff quantity and quality. *Science of the Total Environment*, 592, 465–476. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.124>
- Wisbeck, E., Sandri, E. K., Soares, A. L. M., & Medeiros, S. H. W. (2011). Desinfecção de água de chuva por radiação ultravioleta. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 16(4), 337–342. <https://doi.org/10.1590/s1413-41522011000400004>
- Wu, B., Soon, G. Q. Y., & Chong, T. H. (2019). Recycling rainwater by submerged gravity-driven membrane (GDM) reactors: Effect of hydraulic retention time and periodic backwash. *Science of the Total Environment*, 654, 10–18. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.068>
- Yue, D. P. T., & Tang, S. L. (2011). Sustainable strategies on water supply management in Hong Kong. *Water and Environment Journal*, 25(2), 192–199. <https://doi.org/10.1111/j.1747-6593.2009.00209.x>
- 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/matecconf/201820403016>

- Zhang, Q., Wang, X., Hou, P., Wan, W., Li, R., Ren, Y., & Ouyang, Z. (2014). Quality and seasonal variation of rainwater harvested from concrete, asphalt, ceramic tile and green roofs in Chongqing, China. *Journal of Environmental Management*, 132, 178–187. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.11.009>
- Zhu, K., Zhang, L., Hart, W., Liu, M., & Chen, H. (2004). Quality issues in harvested rainwater in arid and semi-arid Loess Plateau of northern China. *Journal of Arid Environments*, 57(4), 487–505. [https://doi.org/10.1016/S0140-1963\(03\)00118-6](https://doi.org/10.1016/S0140-1963(03)00118-6)

## Apéndices

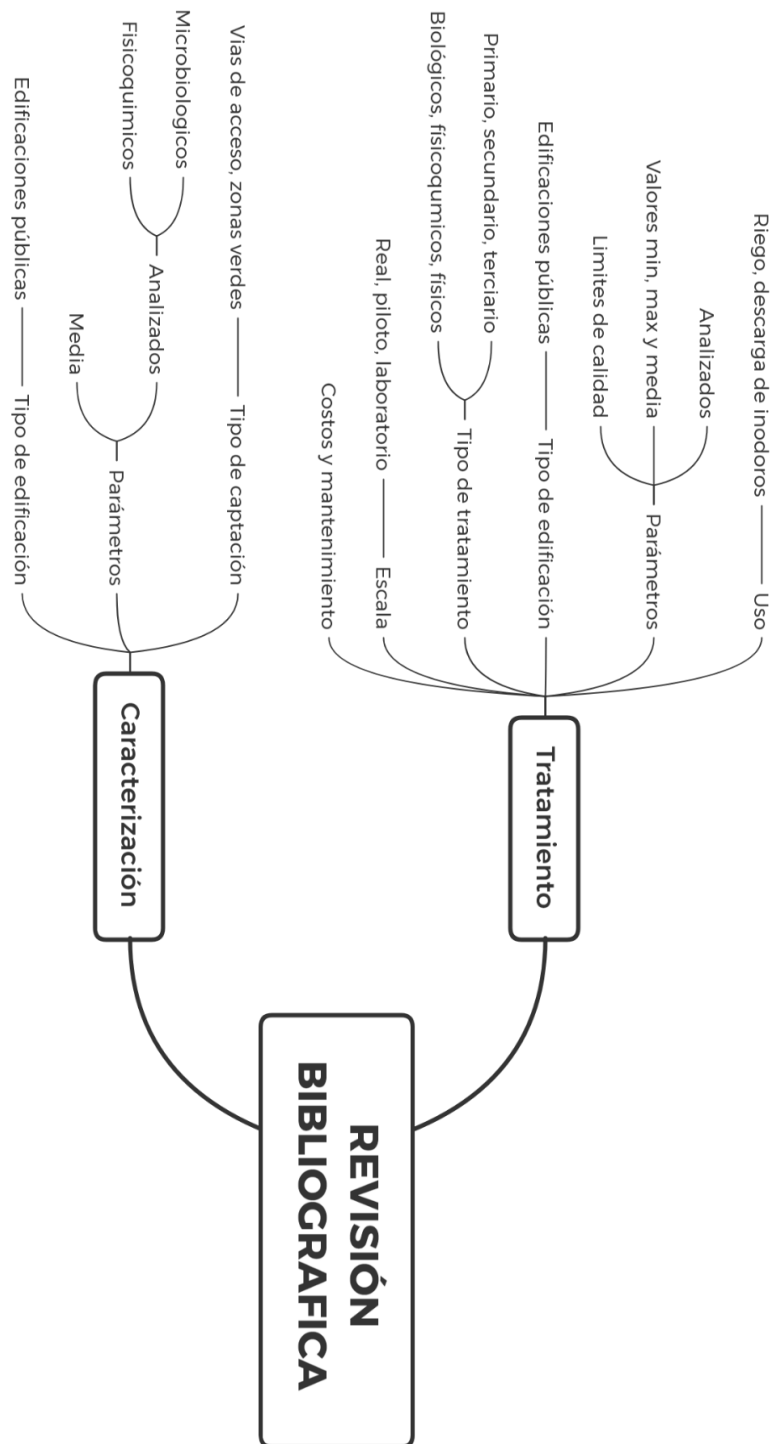
### Apéndice A. Normas/guías internacionales para reúso de agua lluvia

**Figura A1.** Normas/guías internacionales para reúso de agua lluvia.

<b>Norma/Guía</b>	<b>País</b>
<b>Descarga de inodoros</b>	
Heath Canada	Canadá
MAC (98/93/EU directive)	Unión Europea
DWA-M 277	Alemania
ANA (2005)	Brasil
Decreto N° 33601 MINAE-S	Costa Rica
US EPA (2012)	Estados Unidos
<b>Riego agrícola</b>	
N° 015-2015 Perú	Perú
OMS (2006)	Internacional
Decreto N° 33601 MINAE-S	Costa Rica
Australian Stormwater (2009)	Australia
Malaysian water quality standard	Malasia
US EPA (2012)	Estados Unidos
ANA (2005)	Brasil

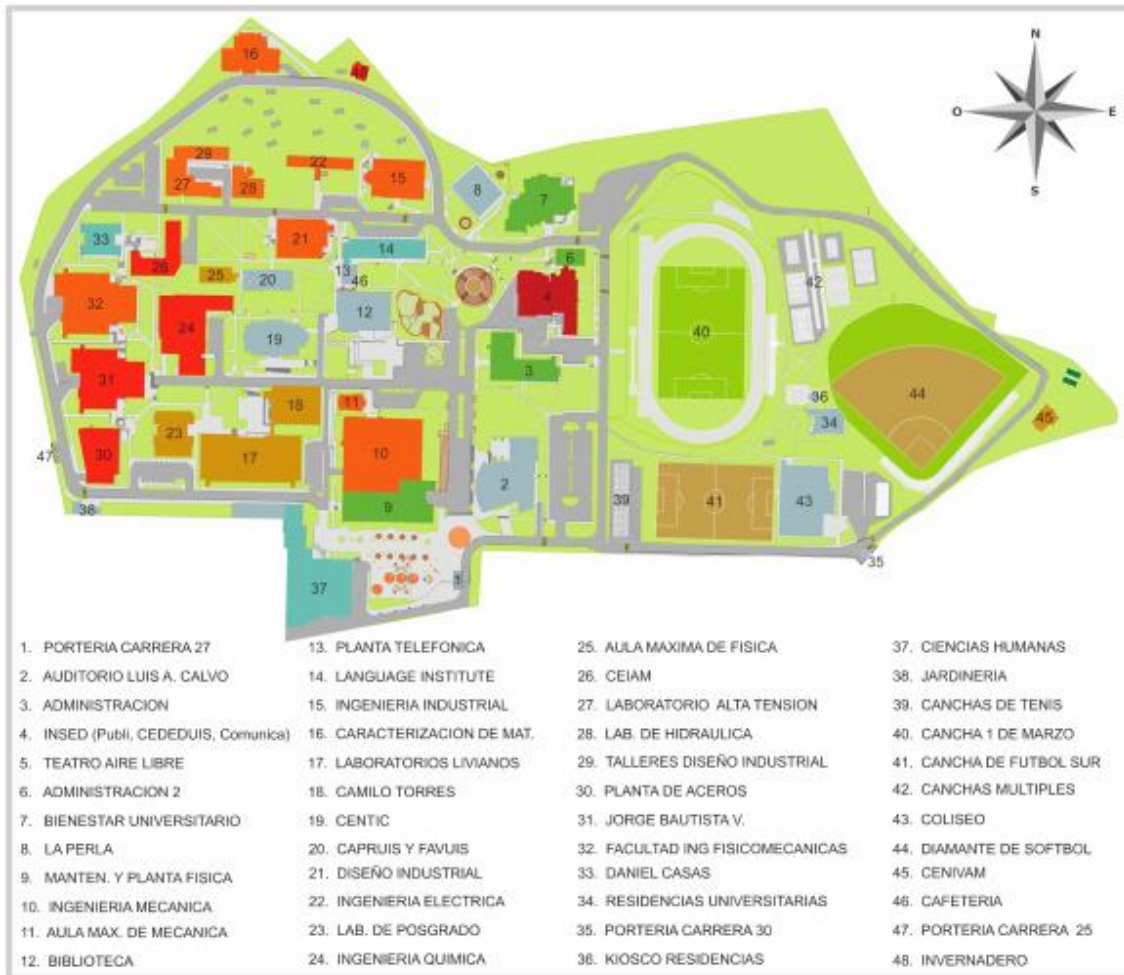
**Apéndice B. Mapa revisión bibliográfica.**

**Figura B1.** Mapa revisión bibliográfica.



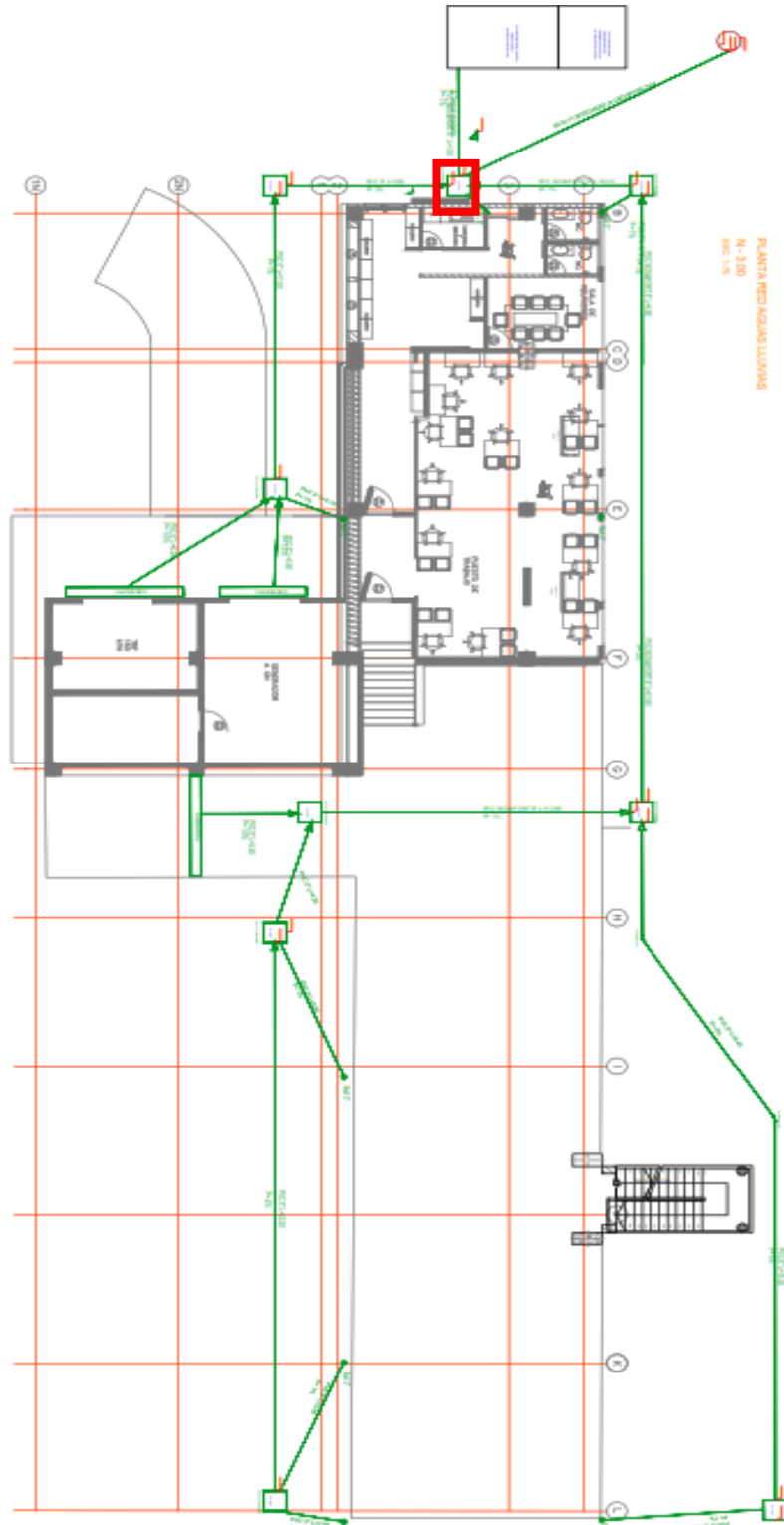
**Apéndice C. Mapa campus Universidad Industrial de Santander**

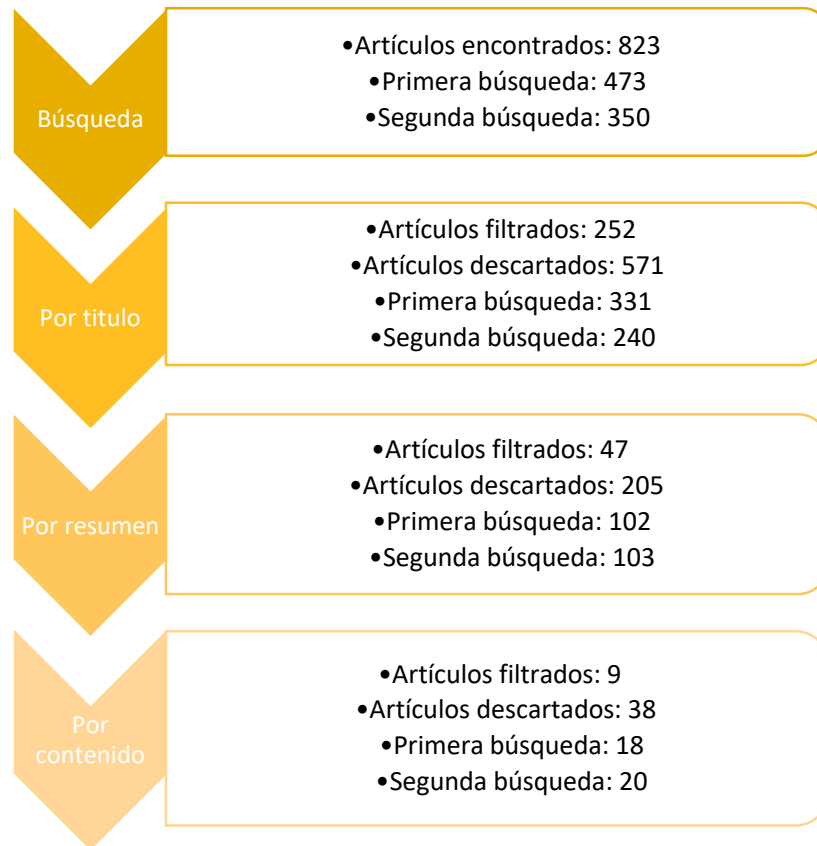
**Figura C1.** Mapa campus Universidad Industrial de Santander.



**Apéndice D. Plano red de transporte de agua lluvia captada.**

**Figura D1.** Plano red de transporte de agua lluvia captada.



**Apéndice E. Esquema proceso revisión de literatura****Figura E1.** Esquema proceso revisión de literatura.

**Apéndice F. Costos y beneficios por kilómetro de buses eléctricos Diésel y eléctrico**

**Figura B1.** Costos y beneficios por kilómetro de buses eléctricos en comparación con los buses Diésel actuales.

<b>Parámetro</b>	<b>Método</b>
Alcalinidad *	Volumétrico Standard Methods 2320 B
Turbiedad *	Nefelométrico, Standard Methods 2130 B
Color Aparente *	Colorimétrico-Standard Methods 2120 C
Sólidos Totales *	Gravimétrico-Secado a 103°C-105°C- S.M. 2540 B
Cloruros *	Argentométrico, Standard Methods 4500- Cl- B
Nitratos *	Salicilato - J. RODIER, 2011
Nitritos *	Colorimétrico, Standard Methods 4500 NO2 -B
Dureza Total *	Volumétrico - EDTA - S.M. 2340 C
Sulfatos *	Turbidimétrico -S.M. 4500 - SO4 -2 E
Coliformes Totales *	Standard Methods 9223 B
<i>E. coli</i> *	Standard Methods 9223 B
Plomo **	Estándar Métodos SM 3111 B – Horno grafito
Hierro **	Estándar Métodos SM 3111 B
Zinc **	Estándar Métodos SM 3111 B
Manganeso **	Estándar Métodos SM 3111 B

*Laboratorios encargados:*

*CEIAM \**

*GIMBA \*\**



**Apéndice H. Formato muestreo de agua lluvia.****Figura H1.** Formato muestreo de agua lluvia.

<b>Día:</b>	1/12/2019	<b>Formato aforo de agua lluvia</b>					
<b>Hora:</b>	1:05 a.m.	<b>Q Norte (mL/s)</b>	<b>Q Sur (mL/s)</b>	<b>Q total (mL/s)</b>	<b>Alícuota (mL)</b>	<b>V Norte (mL)</b>	<b>V Sur (mL)</b>
1:05	24.75	50	74.75	2199	728.16	1471.02	
1:15	15.80	31.36	47.16	1387	464.84	922.62	
1:25	15.60	32.44	48.04	1413	458.96	954.40	
			56.65	5000	1651.96	3348.04	

<b>Día:</b>	8/12/2019	<b>Formato aforo de agua lluvia</b>					
<b>Hora:</b>	6:17 p.m.	<b>Q Norte (mL/s)</b>	<b>Q Sur (mL/s)</b>	<b>Q total (mL/s)</b>	<b>Alícuota (mL)</b>	<b>V Norte (mL)</b>	<b>V Sur (mL)</b>
6:17	06.70	0	6.7	809	809.18	0.00	
6:27	10.10	0	10.1	1220	1219.81	0.00	
6:37	11.20	13.4	24.6	2971	1352.66	1618.36	
			13.8	5000	3381.64	1618.36	

<b>Día:</b>	24/01/2020	<b>Formato aforo de agua lluvia</b>					
<b>Hora:</b>	3:15 a.m.	<b>Q Norte (mL/s)</b>	<b>Q Sur (mL/s)</b>	<b>Q total (mL/s)</b>	<b>Alícuota (mL)</b>	<b>V Norte (mL)</b>	<b>V Sur (mL)</b>
3:15	14.03	27.6	41.63	1903	641.46	1261.89	
3:20	13.24	21.61	34.85	1593	605.34	988.02	
3:25	13.04	19.84	32.88	1503	596.20	907.10	
			36.45	5000	1843.00	3157.00	

<b>Día:</b>	30/01/2020	<b>Formato aforo de agua lluvia</b>					
<b>Hora:</b>	0:46 a.m.	<b>Q Norte (mL/s)</b>	<b>Q Sur (mL/s)</b>	<b>Q total (mL/s)</b>	<b>Alícuota (mL)</b>	<b>V Norte (mL)</b>	<b>V Sur (mL)</b>
0:46	137.60	116.95	254.55	1596	862.77	733.29	
0:56	153.33	129.03	282.36	1770	961.40	809.04	
1:06	159.24	101.28	260.52	1633	998.46	635.04	
			265.81	5000	2822.63	2177.37	

**Apéndice I. Tabla comparativa normativa aprovechamiento de agua lluvia.**

**Figura II.** Tabla comparativa normativa aprovechamiento de agua lluvia.

**Color: Rojo** = Sobre pasa el valor de la norma; **verde** = aceptable para su aprovechamiento.

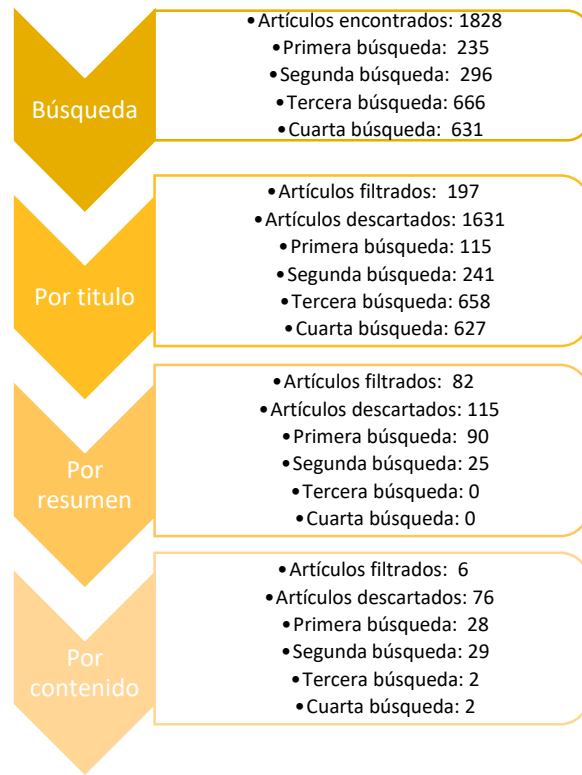
**Referencias:**

Parámetro	Unidad	Min	Max	Promedio	Desv. Estándar	Descarga de sanitarios								Riego agrícola				
						[A]	[B]	[C]	[D]	[E]	[F]	[G]	[H]	[F]	[I]	[D]	[J]	[E]
Alcalinidad	mg/L CaCO <sub>3</sub>	52.00	186.00	93.00	63.30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Turbiedad	UNT	12.00	105.00	38.75	44.66	2.00	-	2.00	2.00	5.00	-	-	-	-	25.00	5.00	-	-
Color Aparente	UPC	60.00	475.00	179.75	198.92	-	-	-	-	-	-	-	100.00	-	-	30.00	-	-
Solidos Totales	mg/L	94.00	342.00	200.50	119.21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cloruros	mg/L Cl <sup>-</sup>	0.00	0.00	<5	-	-	-	-	-	-	-	150.00	500.00	-	-	350.00	-	-
Nitratos	mgNO <sup>3</sup> -N/L	0.23	3.82	1.25	1.72	-	50.00	-	10.00	-	-	-	100.00	-	-	-	2.70	5.00
Nitritos	mgNO <sup>2</sup> -N/L	0.01	0.18	0.06	0.08	-	0.50	-	1.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Dureza Total	mg CaCO <sub>3</sub> /L	49.00	192.00	85.00	71.33	-	-	-	-	-	-	-	-	-	350.00	-	-	-
Sulfatos	mg SO <sub>4</sub> /L	19.00	19.00	19.00	-	-	-	-	-	-	-	-	1000.00	-	-	-	-	-
Coliformes Totales	NMP/100 ml	47.00	920.00	371.75	386.10	200.00	100.00	500.00	100.00	1000.00	1000.00	-	1000.00	1000.00	-	200.00	50000.00	-
<i>E. coli</i>	NMP/100 ml	2.00	40.00	15.13	17.37	200.00	100.00	-	-	-	-	-	100.00	-	10.00	-	-	200.00
Plomo	mg/L	0.03	0.03	0.03	-	-	-	-	-	-	-	5.00	0.05	-	-	-	-	-
Hierro	mg/L	0.13	3.64	1.37	1.97	-	200.00	-	-	-	-	-	5.00	-	10.00	-	-	5.00
Zinc	mg/L	0.10	0.10	0.10	-	-	20.00	-	-	-	-	-	2.00	-	-	-	2.00	-
Manganeso	mg/L	0.00	0.00	<0.2	-	-	-	-	-	-	-	-	0.20	-	-	-	0.20	0.20

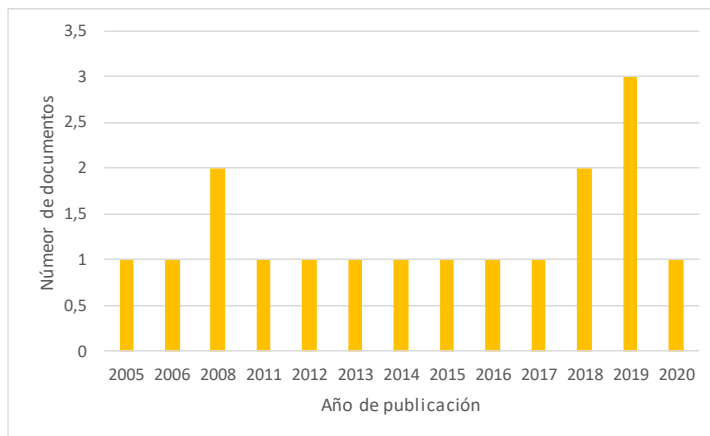
[A] Health Canada. (2010). *for Domestic Reclaimed Water for Use in Toilet and Urinal Flushing*. [B] Unión Europea, Directiva 2006/7/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 15 de febrero de 2006, relativa a la gestión de la calidad de las aguas de baño (2006). [C] Guideline DWA-M 277 - Information on design of systems for the treatment and reuse of greywater and greywater partial flows – (2017). [D] Brasil, Resolução conjunta SVDS/SMS no 09/2014. 2014, 1–7 (2015). [E] US Environmental Protection Agency. (2012). *Guidelines for Water Reuse*. [F] Ministerio de Ambiente y Energía and Ministerio de Salud de Costa Rica, “Reglamento de Vertido y Aguas Residuales N° 33601-MINAE-S. (2007). [G] Guidelines for drinking-water Quality, (2011). Fourth Edition. World Health Organization. [H] Perú, Decreto Supremo N° 015-2015-MINAM. (2015). [I] National Water Quality Management, S. (2009). *Australian Guidelines for Water Recycling: Managing Health and Environmental Risks (Phase 2)- Stormwater Harvesting and Reuse*. [J] Malaysia, Drinking water quality standard (2009).

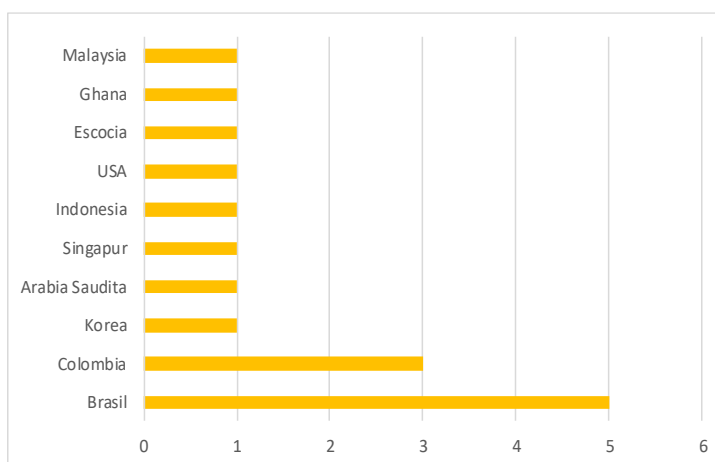
**Apéndice J. Revisión de literatura tecnologías en edificaciones institucionales.**

**Figura J1.** Esquema proceso revisión literatura sobre tecnologías en edificaciones institucionales.



**Figura J2.** Distribución de artículos según año de publicación.



**Figura J3. Distribución de artículos por países.****Apéndice K. Artículos seleccionados por filtración (tecnologías de tratamiento).****Figura K1. Artículos seleccionados por filtración (tecnologías de tratamiento).**

ID	Autores	Título	Año	País	Tecnología
1	Kim R.-H., Lee S., Kim J.-O.	Application of a metal membrane for rainwater utilization: Filtration characteristics and membrane fouling	2005	Corea	Tratamiento por membrana
2	Teixeira C.A., Ghisi E.	Comparative analysis of granular and membrane filters for rainwater treatment	2019	Brasil	Tratamiento por membrana Filtro lento de arena
3	Neto, RFM; Calijuri, ML; Carvalho, ID; Santiago, AD	Rainwater treatment in airports using slow sand filtration followed by chlorination: Efficiency and costs	2012	Brasil	Filtro lento de arena
4	Shafiquzzaman, M; Haider, H; Ghazaw, YM; Alharbi, F; AlSaleem, SS; Almoshaogeh, M	Evaluation of a Low-Cost Ceramic Filter for Sustainable Reuse of Urban Stormwater in Arid Environments	2020	Arabia Saudita	Tratamiento por membrana + Coagulación de aluminio
5	Wu B., Soon G.Q.Y., Chong T.H.	Recycling rainwater by submerged gravity-driven membrane (GDM) reactors: Effect of hydraulic retention time and periodic backwash	2019	Singapur	Tratamiento por membrana
6	Sandoval, ADO; Briao, VB; Fernandes, VMC; Hemkemeier, A; Friedrich, MT.	Stormwater management by microfiltration and ultrafiltration treatment	2019	Brasil	Tratamiento por membrana

7	Melo, A	Evaluación del sistema de captación y aprovechamiento del agua lluvia implementado en el aeropuerto internacional El Dorado de Bogotá	2018	Colombia	Cloración + Filtración
8	Rahmat, S; Ali, Z-MD; Musa, S.	Treatment of Rainwater Quality Using Sand Filter	2008	Malaysia	Filtro lento de arena
9	Yulistyorini, A; Idfi, G; Fahmi, E.	Enhanced rooftop rainwater harvesting quality through filtration using zeolite and activated carbon	2018	Indonesia	Filtro carbón activado y zeolita
10	Murakami, M; Moruzzi, R.	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	2013	Brasil	Filtro lento de arena+ coagulación
11	Galarza, M; Torres, S.	Hacia un sistema humedal-construido/tanque-regulador para el aprovechamiento de aguas lluvias en una cuenca experimental de Colombia	2016	Colombia	Humedal construido
12	Wisbeck, Elisabeth; Sandri, Edgar K; Soares, Andrea L.M; Medeiros, Sandra H.W.	Desinfecção de água de chuva por radiação ultraviolet	2011	Brasil	UV
13	Andrés, J; Borrero, L.	Remoción de Patógenos con Humedales Construidos Para Aprovechamiento de Aguas Lluvias en la Pontificia Universidad Javeriana.	2014	Colombia	Humedal construido
14	Dobrowsky, P H; Lombard, M; Cloete, W J; Saayman, M; Cloete, T E; Carstens, M; Khan, S; Khan, W	Efficiency of microfiltration systems for the removal of bacterial and viral contaminants from surface and rainwater	2015	Sudáfrica	Tratamiento por membrana
15	Deletic, A; Fletcher, T.	Performance of grass filters used for stormwater treatment - A field and modelling study	2006	Escocia	Biofiltración
16	Keraita, B; Konradsen, F.	Potential of simple filters to improve microbial quality of irrigation water used in urban vegetable farming in Ghana	2008	Ghana	Filtro lento de arena
17	Hertel, R.	Wine production benefits from recycled rainwater	2017	USA	Tratamiento por membrana

**Apéndice L. Comparación porcentaje de remoción.****Figura L1.** Comparación porcentaje de remoción.

Área de estudio	Tecnología de tratamiento	Remoción Fisicoquímica (%)		Remoción Microbiológica (%)	
		[A]	[B]	[C]	[D]
<b>Tratamiento por membrana</b>					
<i>Kangnung National Universit, Korea</i>	<i>Material: Metal Ultrafiltración</i>	-	-	78	-
<i>Federal Technological University of Paraná. Brasil</i>	<i>Material: Polietileno Ultrafiltración</i>	11	-	-	-
<i>Qassim University (QU) Campus. Arabia Saudita</i>	<i>Material: Arcilla Micro filtración</i>	97.4	-	-	-
	<i>Material: Poliimida Micro filtración</i>	97.15	96.65	97.4	-
<i>University of Passo Fundo. Brasil</i>	<i>Material: Polietersulfona Ultrafiltración</i>	99.32	98.51	98.1	-
<i>Cleantech Park building. Singapur</i>	<i>Material: Propileno Nano filtración</i>	-	-	99.8	99
<b>Filtro lento de arena</b>					
<i>Federal Technological University of Paraná. Brasil</i>	<i>Lechos: Arena y Grava</i>	13	-	-	-
<i>Universiti Tun Hussein Onn. Malaysia</i>	<i>Lechos: Arena (Fina). Arena (gruesa) y Grava</i>	68.5	-	-	-
<i>Tancredo Neves International Airport. Brasil</i>	<i>Lechos: Arena y Grava</i>	-	-	98.1-99.6	-
<i>Pontificia Universidad Javeriana. Colombia</i>		-	-	85-89	81-99
<b>Humedal construido</b>					
<i>Campus Universitário da Universidade da Região de Joinville (Univille). Brasil</i>	<b>Desinfección UV</b>	-	-	100	99.98
<b>Coagulación/floculación</b>					
<i>Qassim University (QU) Campus. Arabia Saudita</i>	<i>Base: Aluminio</i>	-	-	-	-
<i>Universidade Federal de São Carlos. Brasil</i>	<i>Base: Almidón</i>	70.3	61	-	-
<i>Aeropuerto El Dorado. Bogotá</i>	<b>Cloración</b>	-	-	100	100
<i>State University of Malang campus. Indonesia</i>	<b>Filtro carbón activado</b>	-	-	36	-

[A] Turbiedad (NTU); [B] Color (UPC); [C] Coliformes Totales (NMP/100 mL); [D] *E. coli* (NMP/100 mL).

**Apéndice M. Diseño trenes de tratamiento a escala de laboratorio.****Tanque de sedimentación**

El tratamiento preliminar requiere la remoción de arena muy fina de las muestras para el buen funcionamiento de las posteriores etapas, el tamaño de la partícula crítica fue escogido para el cumplimiento de la Ley de Stokes. Se busca remover hasta partículas finas ya sean limos o cualquier partícula suspendida de este tamaño.

Diámetro de partícula: 0.01 mm

Suponiendo que la partícula es de forma esférica:

Volumen:  $7.854 \times 10^{-11} \text{ m}^3$

Densidad partícula:  $2650 \text{ kg/m}^3$  [1]

Densidad agua:  $998.2 \text{ kg/m}^3$  [1]

La temperatura del agua para el diseño se toma de  $20^\circ$  por lo tanto:

Viscosidad cinemática:  $1.007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  [1]

*Cálculo de la velocidad de asentamiento*

$$U = \frac{g * D^2 * (S_s - 1)}{18 * \nu}$$

$$U = \frac{9.81 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] * (1 \times 10^{-5} [\text{m}])^2 * \left( \frac{2560 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] - 998.2 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]}{998.2 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]} - 1 \right)}{18 * 1.007 \times 10^{-6} \left[ \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right]} = 3.0055 \times 10^{-5} \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

*Ley de Stokes*

$$N_{RE} = \frac{D * U}{\nu}$$

$$N_{RE} = \frac{1 \times 10^{-5} [m] * 3.0055 \times 10^{-5} \left[ \frac{m}{s} \right]}{1.007 \times 10^{-6} \left[ \frac{m^2}{s} \right]} = 2.98 \times 10^{-4} < 0.5$$

El diseño cumple con la ley de Stokes ya que el número de Reynolds es menor a 0.5.

*Tiempo de retención*

Teniendo en cuenta el “tanque” usado para la presente etapa se tomó como altura máxima 0.8 m, esta altura puede variar según la cantidad de agua lluvia que se cuente para el proceso.

$$Tr = \frac{H}{U}$$

$$Tr = \frac{0.3 [m]}{3.0055 \times 10^{-5} \left[ \frac{m}{s} \right]} = 9981.7 [s]$$

$$Tr = 166 [min]$$

$$Tr = 2.77 [h]$$

### Filtración lenta en arena

Según las referencias halladas en la revisión bibliográfica fue estructurada la siguiente Tabla. Muestra el tamaño de las partículas, el espesor de las capas y la carga superficial recomendadas por cada autor, acompañada de la elección de cada parámetro para el diseño del prototipo:

	AWW A [2]	CEPIS [3]	Cleasby [4]	Romero [5]	Arboleda [1]	Diseño
<b>Tamaño partícula (mm)</b>						
<b>Arena</b>	0.15- 0.30	0.45-0.6	0.2-0.4	-	0.15-0.30	0.15-0.30
<b>Grava</b>	3/32"-2 1/2"	-	-	-	1/16"- 1/12"	1/16"- 1/12"
<b>Espesor de la capa (m)</b>						
<b>Arena</b>	0.46- 0.89	0.9-1.10	-	0.6-1.0	0.9-1.10	0.6
<b>Grava</b>	0.46- 0.61	0.3	-	0.3	0.3	0.3
<b>Carga Superficial (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/h)</b>						
	0.5	0.3	0.12	0.083	0.3	-
	-	0.39	0.20	0.2	0.39	-
	-	0.58	-	-	0.58	0.3
<b>Lecho</b>						0.9
<b>Borde</b>						0.3
<b>Total</b>						1.2

Por los bajos caudales que se manejarán (baja intensidad de lluvia) se tomará una carga superficial de menor escala.

$$Carga\ Superficial = 0.3 \frac{m}{h}$$

Se propone un diámetro para el prototipo a escala de laboratorio:

$$D = 20 \text{ cm}$$

$$A = 0.031 \text{ m}^2$$

Por causas constructivas y económicas la sección transversal del filtro será cuadrada, por lo tanto:

$$A = L^2 = 0.031 \text{ m}^2$$

$$L = 0.178 \text{ m}$$

Al ser una aproximación para la exactitud constructiva, la nueva área será:

$$\text{Area Transversal} = 0.032 \text{ m}^2$$

### ***Caudal de ingreso***

Al obtener este caudal se tendrá en cuenta para el diseño de la conducción Tratamiento preliminar-Filtración

$$\mathbf{Q = A * Carga Sup.}$$

$$Q = 0.032 \text{ [m}^2] * 0.3 \left[ \frac{\text{m}}{\text{h}} \right] = 9.5 \times 10^{-3} \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right] = 9.5 \left[ \frac{\text{L}}{\text{h}} \right] = 0.003 \left[ \frac{\text{L}}{\text{s}} \right]$$

En conclusión, la altura total del filtro será de 1.2 m con una sección transversal cuadrada con lados de longitud de 0.178 m, el envase en material de vidrio de espesor de 4 mm sellado en las aristas para la total retención del líquido.

### **Membrana de ultrafiltración**

El grupo de investigación GPH de la UIS cuenta con un dispositivo de filtración por membrana comercial, este fue desarrollado para lograr un tratamiento moderno y sostenible de agua superficial contaminada por filtración por membrana accionada por gravedad o mediante el uso de bombas pequeñas.

La tecnología se basa en un sistema de membranas de ultrafiltración sumergibles. Las membranas de lámina plana se ensamblan en un módulo de filtro conocido como módulo FM. Múltiple módulo se puede combinar para hacer los sistemas de filtración más grandes. El agua purificada se extrae de afuera hacia adentro por medio de una presión muy baja. La presión transmembrana mínima requiere 40 mbar.

La membrana comprende un área  $0.45 \text{ m}^2$ , con una separación entre membranas de 6mm, con MWCO de 150 KDALTON, tamaño de poro nominal aprox. 35 nm y máximo de  $0.1 \mu\text{m}$



**Referencias**

- [1] ARBOLEDA J., "Teoría y práctica de la purificación del agua"., Tomo 2, McGrawhill, 2000
- [2] AWWA., "B100-16 GRANULAR FILTER MATERIAL"., 2016.
- [3] Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS)., Programa para la promoción del uso de tecnologías apropiadas en saneamiento básico: plantas de filtración lenta. Colombia, 2000.
- [4] Cleasby, J.L. y Baumann, "Selection of sand filtration rates. Journal of the American Water Works Association, 1962.
- [5] ROMERO J., "Acuipurificación"., Escuela Colombiana de Ingeniería, 1994.