

Propuesta de tecnologías para el tratamiento de aguas lluvias, como opción para su aprovechamiento en viviendas unifamiliares. caso de estudio: Bucaramanga (Colombia)

María Alejandra Gómez Rozo

Maria Camila Silva Lara

Proyecto de grado para optar al título de Ingeniera Civil

Director:

Edgar Ricardo Oviedo Ocaña

PhD. en Ingeniería, área de énfasis Ingeniería Sanitaria y Ambiental

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2019

Contenido

	Pág.
Introducción	12
1. Marco de Referencia	13
2. Metodología	14
2.1 Identificación de los parámetros críticos de la calidad del agua lluvia.....	14
2.1.1 Búsqueda bibliográfica	14
2.1.2 Filtrado de documentos y criterios de selección	15
2.1.3 Organización de los documentos	16
2.1.4 Revisión y análisis de los datos	16
2.2 Usos en los que se puede implementar el recurso hídrico recolectado	17
2.2.1 Recopilación de la información	17
2.2.2 Análisis de la calidad del agua lluvia.....	18
2.3 Caracterización de ofertas tecnológicas para el aprovechamiento del agua lluvia en viviendas unifamiliares.	18
3. Resultados y Discusiones.....	19
3.1 Identificación de los parámetros críticos de la calidad del agua lluvia.....	19
3.1.1 Resultados de filtrado y selección.....	19
3.1.2 Evolución y estado actual de la información	19
3.1.3 Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del agua lluvia	22

3.1.4 Análisis estadístico de la calidad del agua lluvia.....	23
3.2 Usos en los que se puede implementar el recurso hídrico recolectado.....	33
3.2.1 Usos del agua lluvia.....	33
3.2.2 Análisis de la calidad del agua lluvia.....	35
3.2.2.1 Calidad agua lluvia no potable.....	35
3.2.2.2 Calidad agua lluvia potable.....	36
3.3 Caracterización de ofertas tecnológicas para el aprovechamiento del agua lluvia en viviendas unifamiliares.	39
4. Conclusiones.....	50
Referencias.....	51
Apéndices.....	56

Lista de Figuras

	Pág.
<i>Figura 1.</i> Esquema del proceso de filtrado de la primera búsqueda.....	20
<i>Figura 2.</i> Distribución de artículos seleccionados (n = 35) según año de publicación. (Búsqueda realizada en el mes de octubre del 2018).	20
<i>Figura 3.</i> Distribución de artículos seleccionados por Continentes (n=35 artículos).....	21
<i>Figura 4.</i> Número de datos para parámetros fisicoquímicos.	22
<i>Figura 5.</i> Número de datos para parámetros microbiológicos.	22
<i>Figura 6.</i> Usos del agua lluvia encontrados. Nota: NS/NR: Uso no especificado.	33
<i>Figura 7.</i> Posibles usos del agua lluvia según encuestas. Nota: NS/NR: Uso no especificado...	34
<i>Figura 8.</i> Función de un desviador de primer flujo. Fuente: Innovative Water Solutions LLC (2)	40
<i>Figura 9.</i> Tren de tratamiento.	49

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Comparación de valores de las propiedades fisicoquímicas y microbiológicas del agua lluvia para con tratamiento y sin tratamiento previo aplicado.</i>	23
Tabla 2. <i>Cumplimiento de valores admisibles de los parámetros del agua lluvia para usos potables.</i>	36
Tabla 3. <i>Cumplimiento de valores admisibles de los parámetros del agua lluvia para usos no potables.</i>	38
Tabla 4. <i>Calificación cualitativa de los tratamientos.</i>	48

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A. Referencias 35 Artículos.....	56

Ver Apéndices en el CD y pueden visualizarlos en la base de datos de la Biblioteca UIS

Apéndice B. Revision bibliografica y propiedades

Apéndice C. Calificación de los tratamientos

Resumen

Título: Propuesta de tecnologías para el tratamiento de aguas lluvias, como opción para su aprovechamiento en viviendas unifamiliares. caso de estudio: Bucaramanga (Colombia).*

Autora: María Alejandra Gómez Rozo
Maria Camila Silva Lara **

Palabras Clave: Aguas lluvias, parámetros fisicoquímicos, parámetros microbiológicos, usos, tratamientos..

A lo largo del último siglo, el uso y consumo de agua creció a un ritmo dos veces superior al de la tasa de crecimiento de la población y se espera que la demanda de agua urbana aumente drásticamente en todo el mundo. La recolección de agua lluvia es un beneficioso método para minimizar la escasez de este recurso; sin embargo, puede contaminarse muy fácilmente por diversos factores, por lo que requiere la aplicación de diferentes opciones de tratamiento para producir agua de calidad adecuada para usos potables y no potables. En este estudio se establecen los tratamientos apropiados para implementar en sistemas de recolección de Bucaramanga (Colombia); para tal efecto, se parte de una revisión sistemática de literatura sobre la calidad fisicoquímica y microbiológica del agua lluvia a nivel mundial, determinando el comportamiento de parámetros como: pH, turbiedad, hierro, conductividad eléctrica, nitratos, coliformes totales, coliformes fecales. Seguido a esto, se identificaron los usos que se le ha dado al agua lluvia captada en diferentes países del mundo y también los usos que habitantes de Bucaramanga (Colombia) estarían dispuestos a implementar, según encuestas realizadas; resaltándose lavado de inodoros, riego de jardín y la bebida. Se propusieron opciones tecnológicas como filtro lento de arena, cloración e irradiación solar, que se consideran adecuadas para mitigar los valores críticos de propiedades microbiológicas y fisicoquímicas que no cumplieron las normas establecidas para los usos contemplados..

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería Civil. Director: Edgar Ricardo Oviedo Ocaña

Abstract

Title: Proposal of technologies for the treatment of rainwater, as an option for their use in single-family homes. Case study: Bucaramanga (Colombia)*

Author: María Alejandra Gómez Rozo
Maria Camila Silva Lara **

Keywords: Rainwater, physicochemical parameters, microbiological parameters, uses, treatments.

Over the past century, the use and consumption of water has grown at twice the rate of the population growth rate and the demand for urban water is expected to increase drastically worldwide. Rainwater harvesting is a beneficial method to minimize the scarcity of this resource, however, it can be contaminated very easily by several factors, so it requires the application of different treatment options to produce water of adequate quality for potable and non-potable uses. This study establishes the appropriate treatments to be implemented in collection systems in Bucaramanga (Colombia); for this purpose, a systematic review of the literature on the physicochemical and microbiological quality of rainwater worldwide is carried out, determining the behavior of parameters such as: pH, turbidity, iron, electrical conductivity, nitrates, total coliforms, fecal coliforms, among others. Subsequent, we identified the uses that have been given to the systems of harvesting in different countries of the world and also to those that Bucaramanga's (Colombia) citizens would be willing to implement, based on surveys; highlighting the WC flushing, garden irrigation and drinking. Technological options such as slow sand filter, chlorination and solar irradiation were proposed, which are considered adequate to mitigate the critical values of microbiological and physicochemical properties that did not meet the established normative for the uses contemplated..

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería Civil. Director: Edgar Ricardo Oviedo Ocaña

Introducción

La escasez de agua constituye uno de los principales desafíos del siglo XXI al que se están enfrentando numerosas sociedades del mundo. En Colombia en el año 2000 se identificaron 318 cabeceras municipales que han presentado condición de desabastecimiento, lo cual afecta a una población de 11.530.580 habitantes en 25 departamentos. Aunque no se puede mencionar una escasez hídrica a nivel global, ésta va en aumento debido al crecimiento desenfrenado de la población, al uso inadecuado del recurso, al cambio climático, entre otros factores (IDEAM, 2014)(“ONU,” n.d.).

La necesidad de encontrar una solución a esta problemática ha llevado a la búsqueda de fuentes alternativas para el suministro de agua. La recolección de aguas lluvias, entre otras opciones, desempeña un papel importante en el abastecimiento del recurso hídrico en los hogares (Domènech & Saurí, 2011). Ésta es probablemente la práctica más antigua en el mundo para hacer frente a las necesidades del agua, sirviendo de fuente en los hogares para bebida, cocina, descarga de sanitarios, lavado de ropa y otros usos que apuntan a reducir el consumo de agua potable proveniente de fuentes de abastecimiento [4][5]. Desafortunadamente el agua lluvia recolectada puede contaminarse por diversos factores, afectando su composición fisicoquímica y microbiológica (Helmreich & Horn, 2009). Por lo tanto, es importante seleccionar un tratamiento adecuado para garantizar la efectividad de esta práctica y una calidad óptima del agua.

Teniendo en cuenta lo anterior, este proyecto se enfoca en revisar sistemáticamente la literatura sobre la calidad del agua lluvia, para determinar los parámetros fisicoquímicos y

microbiológicos que no cumplen con estándares de calidad para diversos usos y así, proponer opciones tecnológicas que mejoren dichos parámetros, con el fin de que el agua lluvia recolectada sea segura y cumpla con los requerimientos de los usuarios.

1. Marco de Referencia

La recolección de aguas lluvias consiste en una tecnología que se utiliza para la concentración, recaudación y almacenamiento de la escorrentía superficial durante los períodos de lluvia proveniente de tejados, terrazas, patios, superficies terrestres o cuencas rocosas destinada para diversos usos en el sitio. Hay tres formas principales de recolección de agua lluvia: In situ, cosecha externa y doméstica (Helmreich & Horn, 2009), ésta última tiene como superficie de recolección los techos, los cuales se conectan al tanque generalmente por un sistema de canales y bajantes, almacenando temporalmente el agua para satisfacer la demanda de los usos del lugar. Por lo general, se requiere una red de tuberías separada para conectar el tanque de agua de lluvia a los artefactos y / o grifos del hogar y una o más bombas se adoptan comúnmente (pero no exclusivamente) para asegurar un cabezal de presión apropiado para los diversos usos (Helmreich & Horn, 2009)(Campisano et al., 2017).

Ballén *et al.* (Ballén Suárez, Galarza García, & Ortiz Mosquera, 2006) concluyó que la viabilidad de este sistema en Colombia depende de cinco variables: precipitación, área cubierta de la casa, disponibilidad de agua para abastecer, precio por metro cúbico de agua y la inversión necesaria para la construcción y mantenimiento de los sistemas (Galarza-Molina et al., 2015).

Aunque ésta es una técnica útil para áreas con escasos recursos hídricos, existen algunos problemas que dificultan su integración y su implementación. A menudo, la tecnología utilizada es inadecuada para satisfacer los requisitos de la región o es demasiado costosa y a veces hay una falta de aceptación, motivación e involucramiento entre los usuarios (Helmreich & Horn, 2009).

Existen aspectos que afectan significativamente la calidad del agua, por lo que se genera una clara necesidad de considerar tecnologías con potencial de sostenibilidad en la etapa de diseño que optimicen la recogida, tratamiento y almacenamiento de las aguas pluviales minimizando su contaminación. Además, no todos los usos domésticos requieren una calidad del agua estrictamente potable por lo que el tratamiento adoptado es variante, generando impactos económicos, sociales y ambientales (Hatt, Deletic, & Fletcher, 2006)(Oviedo-Ocaña, Dominguez, Ward, Rivera-Sanchez, & Zaraza-Peña, 2017).

2. Metodología

2.1 Identificación de los parámetros críticos de la calidad del agua lluvia

2.1.1 Búsqueda bibliográfica Para el desarrollo de la primera fase de la metodología se llevó a cabo una revisión de la literatura en la base de datos institucional, utilizando como fuentes los portales Scopus®, Web of Science® y Science Direct®, efectuando tres búsquedas. Inicialmente se realizó una búsqueda únicamente en el portal Scopus® con las palabras clave “Rainwater harvesting” AND Quality. La segunda y tercera búsqueda se realizaron en los tres portales ya

mencionados, utilizando las palabras “Rainwater harvesting” AND Microbiological Quality y “Rainwater harvesting” AND Physicochemical Quality, respectivamente. Se conformó una sola base de datos con los artículos, integrando las tres búsquedas efectuadas y evitando repeticiones de artículos.

2.1.2 Filtrado de documentos y criterios de selección Al finalizar las tres búsquedas se inició un proceso de filtrado de los artículos disponibles, con el objetivo de identificar y seleccionar los documentos adecuados para obtener información de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos presentes en el agua lluvia. El proceso de filtrado consideró cuatro etapas de la siguiente manera:

- **Año de publicación:** Se seleccionaron los artículos publicados desde el año 2004 hasta el año 2018.
- **Título:** Se tuvieron en cuenta aquellos documentos cuyo título contenía alguna palabra clave o la combinación de ellas.
- **Resumen:** Una vez elegidos los artículos según su título, se realizó la lectura de los resúmenes de cada uno de ellos y se filtraron aquellos en los que su resumen tenía relación con la identificación de propiedades fisicoquímicas y microbiológicas en el agua lluvia.
- **Contenido:** En esta etapa se hizo una revisión del contenido de los documentos y se descartaron aquellos que no incluían valores numéricos de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del agua lluvia; igualmente, se excluyeron aquellos artículos que no contenían datos exactos de los parámetros, es decir, sus valores estaban expresados en diagramas de barra y/o caja, o sus datos se basaban en numerosas estadísticas publicadas en estudios anteriores, impidiendo así, obtener información precisa. Cabe resaltar que solo

se tuvieron en cuenta los artículos que consideraban sistemas de recolección de aguas lluvias en sus estudios, asimismo, solo se escogieron aquellos que comprendían valores promedios en los datos de los parámetros.

Pese a que el enfoque de este proyecto son las viviendas unifamiliares, para el desarrollo de esta primera fase se tuvieron en cuenta los artículos cuyos estudios fueron realizados tanto en viviendas unifamiliares como en complejos multifamiliares, campus universitarios, centros educativos, edificios comerciales, entre otros, ya que la calidad del agua lluvia no se ve afectada por el inmueble en donde se instala el sistema de captación.

2.1.3 Organización de los documentos Una vez obtenido el material conveniente para su análisis, se organizó una base de datos en Excel, con información que incluyó: año de publicación, título y autor correspondiente. Además, para facilidad en la organización de los documentos, se enumeraron y asignaron un número de identificación (ID).

2.1.4 Revisión y análisis de los datos Al tener todos los archivos organizados en la base de datos, se procedió a extraer la información de cada uno de ellos para su tabulación: fecha, ciudad y país en el que se llevó a cabo el estudio, sitio de toma de muestras de aguas lluvias (i.e. tanque de almacenamiento o techos), número total de muestras realizadas (n), valores promedio de las propiedades fisicoquímicas y microbiológicas, así como otros estadísticos (mínimos, máximos, desviación estándar y mediana), material del tanque de almacenamiento, área de captación del agua lluvia, material del área de captación, número de tanques, ventilación y la existencia de tratamientos previos a la toma de muestra (e.j. desviador de primer flujo, filtración y desinfección) (ver Anexo B).

Es relevante mencionar que no todos los artículos contenían información de los mismos parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, por lo que el registro de los datos es diferente para cada parámetro. Finalmente, todos los valores fueron convertidos a una sola unidad de medida, por ejemplo, para algunos metales se encontraban valores en mg/L y µg/L, pero por practicidad al momento de realizar el análisis estadístico, todos quedaron en términos de mg/L.

2.2 Usos en los que se puede implementar el recurso hídrico recolectado

Dado que este estudio analiza sistemas de recolección de aguas lluvias en viviendas unifamiliares, en esta segunda fase sólo se tuvieron en cuenta los artículos y las encuestas realizadas en este tipo de viviendas.

2.2.1 Recopilación de la información De los artículos previamente seleccionados en la Fase I, se extrajo información de los usos que se le han dado al agua lluvia recolectada en los sistemas de diferentes partes del mundo; asimismo, se compiló información de los usos en los que las personas estarían dispuestas a implementar el agua lluvia en la ciudad de Bucaramanga (Colombia), mediante la revisión de encuestas previamente realizadas en proyectos de grado y artículos desarrollados en el grupo de investigación “Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental” de la Universidad Industrial de Santander, particularmente los estudios Oviedo *et al.* (Oviedo-Ocaña *et al.*, 2017) y Dominguez *et al.* (Domínguez, Ward, Mendoza, Rincón, & Oviedo Ocaña, 2017). La información se condensó en diagramas de barras, permitiendo determinar los usos con mayor relevancia.

2.2.2 Análisis de la calidad del agua lluvia Se realizó una búsqueda bibliográfica de normas que incluyeran valores admisibles de las propiedades fisicoquímicas y microbiológicas del agua, tanto para usos potables como no potables, con el fin de compararlos con los valores de la calidad del agua lluvia obtenidos en la Fase I. Esto con el objetivo de identificar los parámetros que no cumplen con las normativas establecidas y así determinar los tratamientos que mejoren la calidad del agua en la siguiente Fase. Para el agua lluvia con aplicaciones no potables se utilizó el estándar británico BS 8515:2009 (BSi, 2008) y en el caso del agua lluvia empleada con fines potables se usó la Guía para la calidad del agua potable (OMS, 2006) y la Resolución 2115 del 2007 de Colombia (Ambiente & Territorial, 2007).

2.3 Caracterización de ofertas tecnológicas para el aprovechamiento del agua lluvia en viviendas unifamiliares.

Se extrajeron los tratamientos efectuados o postulados en los artículos escogidos en la Fase I. Posteriormente, se seleccionaron aquellos que son aptos para mejorar la calidad de los parámetros que sobrepasaron los valores admisibles en el numeral 3.2.2. y se realizó una búsqueda exhaustiva sobre estos, con el propósito de exponer sus ventajas y desventajas al momento de implementarlos en un sistema de recolección en viviendas unifamiliares. Se caracterizaron estas tecnologías según su factibilidad, efectividad y asequibilidad al momento de aplicarlas en Bucaramanga (Colombia).

3. Resultados y Discusiones

3.1 Identificación de los parámetros críticos de la calidad del agua lluvia

3.1.1 Resultados de filtrado y selección Las tres búsquedas realizadas arrojaron un total de 764 artículos. Del proceso de filtrado, se obtuvieron 738 documentos empleando el año de publicación. Posteriormente se escogieron 251 empleando su título; además se descartaron 79 archivos debido a que estaban repetidos. Una vez realizada la lectura de los resúmenes, se filtraron 121 y finalmente, se seleccionaron 35 artículos (ver Anexo A) conforme a su contenido, los cuales incluían valores adecuados de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del agua lluvia. En la Figura 1 se puede apreciar con mayor detalle el proceso de filtrado realizado.

3.1.2 Evolución y estado actual 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 calidad microbiológica y fisicoquímica del agua lluvia.

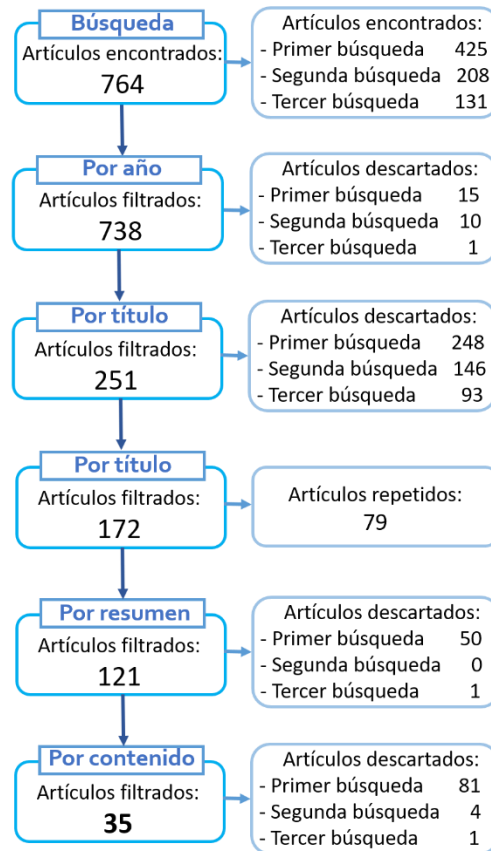


Figura 1. Esquema del proceso de filtrado de la primera búsqueda.



Figura 2. Distribución de artículos seleccionados ($n = 35$) según año de publicación. (Búsqueda realizada en el mes de octubre del 2018).

Respecto a la documentación seleccionada se notó una gran variabilidad en la cantidad de artículos publicados sobre la temática específica a través de los años (Figura 2), observando que los mayores reportes se obtuvieron de artículos de 2012 (5 artículos) y 2017 (8 artículos) y los años con menos reportes obtenidos son 2005 y 2009 (1 artículo cada año).

También se clasificaron los documentos teniendo como criterio los países en los cuales se estaban efectuando y presentando los estudios y resultados de calidad del agua lluvia. En total se encontraron 22 países y cada uno de estos contenía entre 1 a 3 artículos. Además, estos se agruparon según su continente (Figura 3), para obtener una visualización práctica y efectiva de los lugares en los que hay mayor reiteración de proyectos realizados, siendo Asia el continente con una mayor inclinación en el estudio del tema, con el 35% (13 artículos) del total de publicaciones.

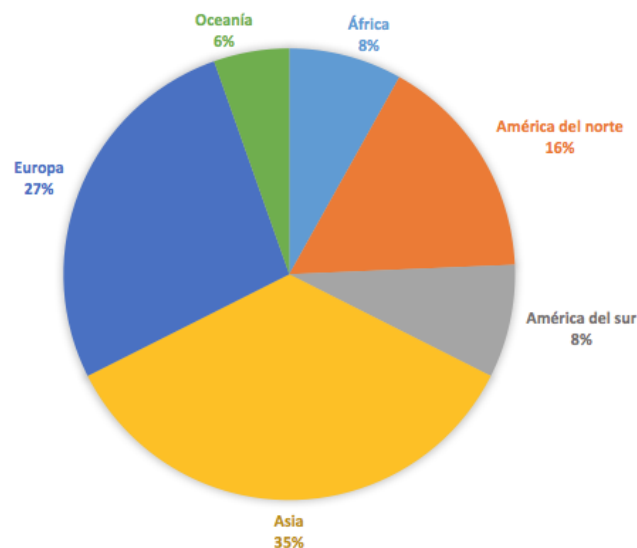


Figura 3. Distribución de artículos seleccionados por Continentes (n=35 artículos).

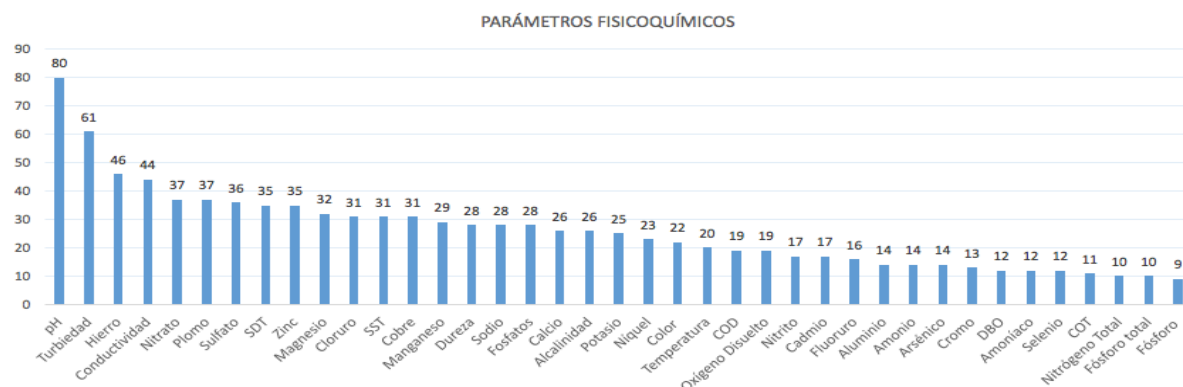


Figura 4. Número de datos para parámetros fisicoquímicos.

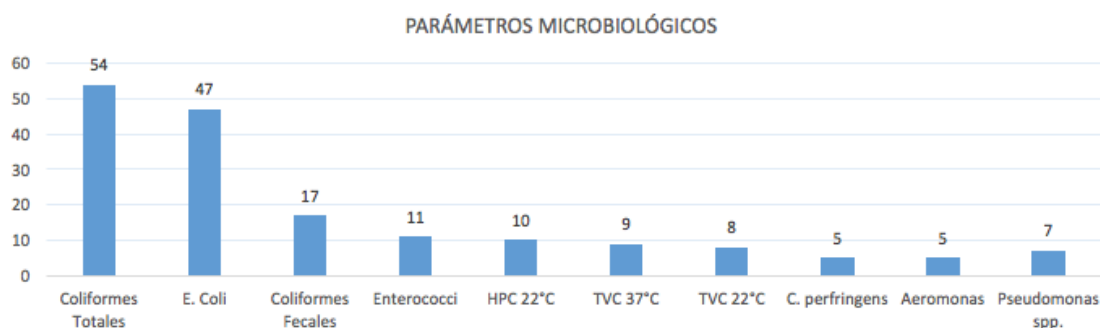


Figura 5. Número de datos para parámetros microbiológicos.

3.1.3 Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del agua lluvia Los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del agua lluvia son los factores determinantes en cuanto a la eficiencia que puede llegar a tener el agua, según su uso y aplicación. Por lo tanto, es importante hacer una revisión de los valores críticos que presentan sus componentes y establecer sus posibles razones para buscar alternativas que mitiguen estas situaciones.

En la Figura 4 y 5 se pueden observar todas las propiedades encontradas en el agua lluvia y el número de muestras recogidas en la revisión de literatura realizada. De esta manera, se pudieron elegir aquellas que son más significativas, relevantes y mayormente empleadas en los estudios,

para posteriormente, realizar una descripción detallada de cómo cada una influye en la calidad del agua lluvia.

3.1.4 Análisis estadístico de la calidad del agua lluvia Con la información recopilada, se realizó un análisis estadístico de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del agua lluvia, logrando examinar la calidad que ha presentado el recurso hídrico en los diferentes sistemas de recolección.

Entre los 35 artículos se encontraron un total de 98 registros de datos necesarios para el desarrollo de esta investigación. En todos los proyectos, el muestreo se realizó en el tanque de almacenamiento y la zona de captación fue el techo, a excepción de 4 datos, en los que la toma de muestras se hizo en el techo, pero para facilidad en la ejecución de este trabajo se tuvieron en cuenta como si el muestreo hubiese sido realizado igualmente en el tanque.

Para obtener resultados más precisos se generó la Tabla 1, que presenta el análisis estadístico de estudios de agua lluvia con tratamiento preliminar (i.e. filtración previa y/o el desviador de primer flujo) y la calidad del agua sin tratamiento.

Tabla 1.

Comparación de valores de las propiedades fisicoquímicas y microbiológicas del agua lluvia para con tratamiento y sin tratamiento previo aplicado.

Propiedades	Unid.	Con tratamiento					Sin tratamiento				
		Media	Mín	Máx	N	C.v.	Media	Mín	Máx	N	C.v.
FÍSICAS Y QUÍMICAS											
pH	pH Units	7.01	5.30	8.71	39	0.183	7.09	4.40	8.93	41	0.139

Propiedades	Unid.	Con tratamiento					Sin tratamiento				
		Media	Mín	Máx	N	C.v.	Media	Mín	Máx	N	C.v.
Sólidos Disueltos Totales (SDT)	mg/L	51.30	7.60	130	24	0.713	71.26	37.60	92.70	11	0.291
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	9.09	0.60	45	20	1.547	25.58	1.30	210	11	2.411
Carbono Orgánico Disuelto (COD)	mg/L	1.30	1.00	2	4	0.266	6.91	0.30	47.90	15	1.797
Carbono Orgánico Total (COT)	mg/L	2.50	2.30	2.90	3	0.139	4.03	1.17	8.50	8	0.601
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	0.55	0.50	0.60	4	0.105	0.68	0.60	0.80	8	0.131
Oxígeno Disuelto (OD)	mg/L	3.86	1.25	6.78	16	0.584	3.44	1.31	5.50	3	0.610
Conductividad Eléctrica (CE)	μS/cm	92.57	37	265	19	0.603	57.34	0.01	170	25	1.011
Turbiedad	UNT	1.46	0	5.70	31	0.778	4.82	0.04	31.05	30	1.540
Alcalinidad	mgCaC O ₃ /L	26.28	3.90	210	16	1.900	31.51	8.20	75.20	10	0.701
Color	Pt - Co	12.46	10.50	14.10	5	0.147	18.47	4.34	34	17	0.606
Temperatura	°C	17.61	14.90	18.40	12	0.055	19.87	14.70	25.70	8	0.205
Dureza	mgCaC O ₃ /L	46.34	14.20	245	17	1.135	31.60	9	65.70	11	0.582
Cloruro	mg/L	12.81	0.14	230	27	3.396	3.55	0.55	7.50	4	0.824
Nitrato	mg/L	2.01	0.02	22.99	27	2.153	2.61	0.28	6.80	10	0.834
Nitrito	mg/L	0.08	0	0.40	13	1.318	0.08	0.01	0.25	4	1.362
Sulfato	mg/L	8.55	0	88.96	25	2.041	10.16	0	34	11	1.205
Amoniaco	mg/L	2.01	0.12	11.11	7	2.007	0.39	0.07	0.70	5	0.740
Sodio	mg/L	3.91	1.10	6.91	12	0.435	3.89	0.24	15.41	16	0.988
Calcio	mg/L	10.55	4.40	18.98	18	0.357	5.29	0.86	10.35	8	0.800

Propiedades	Unid.	Con tratamiento					Sin tratamiento				
		Media	Mín	Máx	N	C.v.	Media	Mín	Máx	N	C.v.
Hierro	mg/L	0.05	0.01	0.22	21	0.954	0.04	0	0.14	25	1.066
Manganeso	mg/L	0.01	0	0.01	6	0.467	0.01	0	0.12	23	1.604
Selenio	mg/L	0.001	0.001	0.001	2	0	0.02	0	0.18	10	2.770
Aluminio	mg/L	0.05	0.03	0.10	6	0.525	0.10	0.01	0.23	8	0.808
Amonio	mg/L	1.68	0.58	3.18	9	0.515	0.43	0.09	1.24	5	1.121
Fosfatos	mg/L	0.30	0	0.70	17	0.685	0.22	0	0.55	11	0.776
Magnesio	mg/L	1.21	0.24	3.08	15	0.654	0.74	0.04	2.43	17	0.820
Potasio	mg/L	2.76	1.20	7.98	9	0.749	1.34	0.10	6.10	16	1.251
Fluoruro	mg/L	0.19	0.06	0.71	14	0.900	0.15	0.07	0.22	2	0.731
Fosforo	mg/L	-	-	-	0	-	0.03	0	0.08	9	1.176
Fosforo Total	mg/L	0.81	0.02	1.37	9	0.614	0.64	0.64	0.64	1	-
Nitrógeno Total	mg/L	1.46	0.78	1.80	4	0.318	1.48	0.80	2	6	0.286
Cobre	mg/L	0.01	0	0.05	9	1.005	0.02	0	0.09	22	1.364
Cromo	mg/L	0.18	0	0.35	2	1.406	0.01	0	0.03	11	1.963
Níquel	mg/L	0	0	0	5	0.223	0.01	0	0.03	18	1.732
Arsénico	mg/L	0	0	0	3	1.120	0.01	0	0.04	11	2.065
Zinc	mg/L	0.22	0.02	1.24	12	1.651	0.34	0.01	2.20	23	0.291
Cadmio	mg/L	0	0	0	4	0.614	0.01	0	0.04	13	1.907
Plomo	mg/L	0.01	0	0.02	15	1.015	0.01	0	0.05	22	1.629

Microbiológicas

Coliformes Totales	MPN/100 mL	2546.35	15	9747	6	1.599	206.11	0	638.79	13	1.151
	CFU/100 mL	4081.55	2	17100	22	1.469	13533.88	70	137000	12	2.884
E. coli	MPN/100 mL	101.11	0	394	7	1.576	44	1	115.51	8	1.060
	CFU/100 mL	181.82	0	940	17	1.394	453.51	0	1640	15	1.512

Propiedades	Unid.	Con tratamiento					Sin tratamiento				
		Media	Mín	Máx	N	C.v.	Media	Mín	Máx	N	C.v.
Coliformes Fecales	CFU/100 mL	38.95	1	270	11	2.090	505.32	4.90	1509	6	1.162

Se observan las unidades usadas en cada parámetro, media, valor mínimo, máximo, número de datos (n) y coeficiente de variación.

Cabe destacar que en las propiedades microbiológicas no se pudo realizar una conversión de unidades, por lo que los datos fueron divididos según las unidades de medida utilizadas, ya sea MPN/100ml o CFU/100 ml.

Adicionalmente, se realizó un análisis descriptivo teniendo en cuenta 14 parámetros fisicoquímicos y 2 microbiológicos, exponiendo en cada uno de estos su variación respecto a la presencia o ausencia de un tratamiento previo y su posible procedencia:

- **pH:** fue el parámetro más relevante en cuanto al número de datos registrados en el análisis estadístico de la Tabla 1. Presentó valores similares tanto en los estudios sin ningún tratamiento del agua lluvia (**7.09**) como en los estudios con tratamiento previo (**7.01**), obteniendo un pH con valores próximos a la neutralidad en ambos casos. El pH del agua lluvia cruda normalmente varía de 4.5 a 6.5, pero puede alterarse naturalmente después de que la lluvia haya lavado la atmósfera (Morales-pinzón, García-serna, & Flórez-calderón, 2015) (Payus, Meng, Resources, Science, & Resources, 2015). Algunos estudios (Payus et al., 2015) han demostrado que los productos químicos que se emiten a la tierra en forma de aerosoles, así como las actividades industriales, son los principales contribuyentes a que el agua se vuelva alcalina. Además, el pH puede aumentar durante el almacenamiento del agua lluvia en los tanques, debido a la lixiviación de los componentes de sus

materiales, ocurriendo sobre todo en tanques de concreto (Despins, Farahbakhsh, & Leidl, 2009) (Morales-pinzón et al., 2015).

- **Turbiedad:** se obtuvieron valores medios de **4.82 UNT** para el agua lluvia no tratada y **1.46 UNT** para el agua lluvia tratada. Se pudo apreciar diferencia entre ellos, debido principalmente a la filtración y/o la primera desviación de descarga realizada; proporcionando un agua de calidad potable, según la Resolución 2115 del 2007 de Colombia, en la que el agua para consumo humano no debe sobrepasar los 2 UNT (Ambiente & Territorial, 2007). Los factores que contribuyen con la turbiedad están relacionados con las partículas suspendidas en la atmósfera y las propiedades de los materiales de la zona de captación, esta última puede proporcionar una mayor área de superficie para la adsorción de desechos atmosféricos entre eventos de lluvia (Despins et al., 2009) (Agoboh & Bakobie, 2015). Además, la época del año en la que fueron tomadas las muestras puede afectar la turbiedad, aumentando durante los episodios de lluvia, ya que las pequeñas partículas necesitan tiempo para asentarse (Kim, Dao, Kim, & Nguyen, 2017) (Alves, Köchling, Luz, & Santos, 2014).
- **Hierro:** la presencia de **hierro** en el agua es probablemente un resultado de la lixiviación de la superficie del techo (Hogain, McCarton, McIntyre, Pender, & Reid, 2012), así como también, por la corrosión de las tuberías de acero o hierro de la distribución del agua (OMS, 2006). Las concentraciones de hierro encontradas fueron mínimas tanto para el sistema al cual se le aplicó tratamiento previo (**0.05 mg/L**) como para el no tuvo ninguno designado (**0.04 mg/L**).
- **Conductividad Eléctrica:** los niveles de conductividad eléctrica podrían estar relacionados con la descomposición y mineralización de la materia orgánica en el agua

lluvia durante su almacenamiento (Agoboh & Bakobie, 2015). Varios materiales que se acumulan en el techo, aumentan la conductividad y resaltan la utilidad del dispositivo de primera descarga para mejorar la calidad del agua lluvia recolectada (OMS, 2006). La conductividad eléctrica refleja la capacidad del agua para conducir corriente eléctrica, y está directamente relacionada con los SDT (OMS, 2006) y presencia de sales. Esto significa, que al introducir un tratamiento previo la conductividad tendría que disminuir su valor, sin embargo, en este caso se encontró que la media fue **92.57 $\mu\text{S}/\text{cm}$** reduciendo su valor a **57.34 $\mu\text{S}/\text{cm}$** cuando no hubo tratamiento, esto se puede atribuir a que el análisis de datos es una recopilación de diferentes artículos, en diferentes lugares y condiciones. Aunque esta reducción no se cumple, ambos valores de media encontrados son bajos, ya que, la Resolución 2115 del 2007 de Colombia, sugiere que el valor máximo aceptable para consumo humano, puede ser hasta 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Ambiente & Territorial, 2007).

- **Nitratos:** el **nitrato** se produce naturalmente a partir del nitrógeno contenido en el suelo y el agua, también puede derivarse de las emisiones industriales, de tráfico y de calefacción central, como resultado de la combustión de biomasa y combustibles fósiles (OMS, 2006)(Payus et al., 2015)(Gikas & Tsihrintzis, 2012). Asimismo, la presencia y/o crecimiento de líquenes, desechos animales y deposición húmeda o seca en los tejados, aumenta la cantidad de nitrato en el agua lluvia (Young, Bak, & Han, 2012). En este caso los valores de nitrato encontrados fueron similares, siendo **2.01 mg/L** para el agua lluvia con tratamiento previo y **2.61 mg/L** para el agua sin tratamiento.
- **Plomo:** la concentración de **plomo** en ambos casos (agua lluvia no tratada y agua lluvia tratada) fue de **0.01 mg/L**. Para algunos autores la presencia de metales pesados como el plomo en muestras de agua de lluvia, indica que la calidad del aire es deficiente y la

presencia de áreas industriales, caminos o carreteras cerca de los sistemas de captación de agua influyen en la detección de estos metales (Morales-pinzón et al., 2015) (Payus et al., 2015), sin embargo, la presencia de plomo también se le atribuye al material del techo, aumentando sobre todo en techos de acero galvanizado (Young et al., 2012).

- **SDT:** los **Sólidos Disueltos Totales (SDT)** comprenden las sales inorgánicas (principalmente de calcio, magnesio, potasio y sodio, bicarbonatos, cloruros y sulfatos) y pequeñas cantidades de materia orgánica que están disueltas en el agua (Ap & Edici, n.d.). El material utilizado para construir los tanques de almacenamiento puede interferir con el SDT en el agua lluvia, disminuyendo en tanques hechos de cemento y concreto. Además, el aumento de la precipitación reduce la concentración de algunos contaminantes a través de la dilución cuando se llenan los tanques de almacenamiento, mitigando la cantidad de SDT presente en el agua (Alves et al., 2014). Como se observa en este estudio, los tratamientos preliminares también pueden ayudar a disminuir las concentraciones de SDT, obteniendo valores de **51.30 mg/L** en el agua lluvia tratada y **71.26 mg/L** en el agua lluvia sin ningún tratamiento.
- **Sulfato:** se logró observar una ligera disminución de **sulfato** en el agua lluvia tratada (**8.55 mg/L**) con respecto al agua no tratada (**10.16 mg/L**). Los sulfatos se liberan al agua lluvia mediante residuos industriales y emisiones de tráfico. Las concentraciones de sulfato también se le atribuyen al uso de combustibles fósiles en automóviles y casas, y a las actividades de construcción (polvo de yeso) en áreas aledañas a los sistemas de captación. El proceso natural como la oxidación de azufre elemental, minerales de sulfuro o azufre orgánico aumenta los niveles de sulfato en el agua (OMS, 2006)(Payus et al., 2015)(Ap & Edici, n.d.).

- **Zinc:** los niveles de **Zinc** detectados en el agua lluvia dependen en gran medida de la deposición atmosférica y del material del techo o tanque de almacenamiento que tenga el sistema de captación, tiende a aumentar especialmente cuando se presentan techos de hierro o acero galvanizado. El Zinc encontrado en las muestras de agua lluvia se le atribuye también a la quema de carbón, combustibles fósiles y fundición de metales no ferrosos en zonas cercanas. Por otro lado, se ha demostrado que los lodos en los tanques de almacenamiento contienen altas concentraciones de metales pesados, por lo que la eliminación regular de lodos y la limpieza del techo ayudan a prevenir la acumulación de metales dentro del tanque (OMS, 2006)(Despins et al., 2009)(Payus et al., 2015)(Young et al., 2012). En este caso, la concentración media encontrada de Zinc presenta una tendencia a mejorar en el agua lluvia con tratamiento preliminar (**0.22 mg/L**), mientras que el agua lluvia sin tratamiento presenta una concentración de **0.34 mg/L**.
- **Magnesio:** este estudio demuestra que la filtración previa y/o desviación de primer flujo mejoran significativamente la concentración de **Magnesio** en los sistemas de recolección de aguas lluvias, obteniendo resultados en el agua lluvia tratada y el agua lluvia sin tratar de **1.21** y **0.74 mg/L**, respectivamente. Entre otros factores, la erosión de rocas de montaña y los materiales de construcción de techos influyen considerablemente en la obtención de Magnesio en el agua lluvia, por lo que se espera una alta concentración en áreas rurales. Algunos estudios afirman que otra principal fuente de este elemento es la deposición atmosférica (OMS, 2006)(Qin, Tang, Wang, & Fu, 2015).
- **Cloruros:** el **cloruro** en el agua puede incrementarse considerablemente mediante procesos de tratamiento en los que se usa cloro o cloruro; debido a esto, se observa que cuando se aplicó un tratamiento previo el valor del cloruro fue **12.81 mg/L**, mayor que

cuando no se empleó uno de estos, dando como resultado una media de **3.55 mg/L**. Las concentraciones de cloruro excesivas aumentan la velocidad de corrosión y la concentración de los metales en el agua, llegando a provocar un sabor perceptible en esta (Ap & Edici, n.d.).

- **SST:** la concentración de **Sólidos Suspendidos Totales (SST)** varió de **9.09 mg/L** (con tratamiento previo) a **25.58 mg/L** (sin tratamiento previo). Los sólidos suspendidos totales se originan a partir de materiales acumulados en el techo (e.g. polvo del aire, escombros, plantas), y se asocian a la turbidez y el color (Carmi & Ram, 2017); por lo tanto, se puede observar que el resultado fue menor para el sistema que poseía un tratamiento previo, ya que la mayoría de estos se eliminaron a través del primer desviador de descarga (Gikas & Tsihrintzis, 2017).
- **Cobre:** el **cobre** presentó valores similares de media cuando no se proporcionaba un tratamiento previo y cuando si se suministraba uno, siendo estos **0.02 mg/L** y **0.01 mg/L**, respectivamente. La existencia de cobre en el agua lluvia puede atribuirse a la corrosión proveniente de tuberías y canaletas, así como también, el material con el que se construye la zona de captación. Techos de acero o metal galvanizado son más propensos a presentar niveles de cobre, que aquellos fabricados de tejas de arcilla o madera, ya que estos son materiales densamente porosos y sus contaminantes pueden quedar atrapados en los poros presentando medidas más bajas al evaluar la calidad del agua lluvia (Young et al., 2012).
- **Color:** el **color** es fuertemente influenciado por la presencia de hierro y otros metales, ya sea como impurezas naturales o como productos de corrosión (Agoboh & Bakobie, 2015). Un tratamiento previo como se ha aclarado anteriormente, logra disminuir estos residuos, eliminando o filtrando los contaminantes en la primera descarga. En estas condiciones, se

obtuvo un valor de color de **12.46 Pt-Co**, en cambio, cuando no se aplicó ningún tratamiento el valor fue superior (**18.47 Pt-Co**).

- **Coliformes Totales:** la existencia de **coliformes totales** en el agua lluvia es producto de materiales fecales, principalmente de pájaros, roedores y lagartos, que se depositan en la zona de captación (OMS, 2006). Las bacterias pertenecientes al grupo de los coliformes totales (excluida *E. coli*) están presentes tanto en aguas residuales como en aguas naturales. Algunas de estas bacterias se excretan en las heces de personas y animales, pero muchos coliformes son heterótrofos y capaces de multiplicarse en suelos y medios acuáticos. Los coliformes totales pueden también sobrevivir y proliferar en sistemas de distribución de agua, sobre todo en presencia de biopelículas (Ap & Edici, n.d.). Debe haber ausencia de este parámetro, la cual se alcanza al aplicar un tratamiento o un dispositivo de primera descarga para eliminar estos contaminantes. Aunque no se obtuvo el valor recomendado, se logró una amplia variación entre **13533.88 CFU/100 mL** disminuyendo cuando se aplicó un tratamiento previo a **4081.55 CFU/100 mL**.
- **Coliformes Fecales:** los **coliformes fecales** son un subgrupo de los coliformes totales conocidos como coliformes termotolerantes, siendo el género predominante *Escherichia coli*, el cual está presente en concentraciones muy grandes de las heces humanas y animales, y raramente se encuentra en ausencia de contaminación fecal (Ap & Edici, n.d.). Se vincula la calidad microbiológica del agua de lluvia almacenada a la contaminación del área de captación (techo), escorrentía, deposiciones por aves y mamíferos pequeños, descomposición de los restos orgánicos acumulados y la deposición de microorganismos transportados por el aire (Agoboh & Bakobie, 2015). Se recomienda la inexistencia de este parámetro en el agua recolectada, por qué puede ser perjudicial para la salud humana;

sin embargo, aun teniendo un tratamiento previo aplicado, no hubo carencia de este parámetro, dando como media (**38.95 CFU/100 mL**), pero este si fue menor cuando no se poseía uno (**505.32 CFU/100 mL**). Esto muestra la necesidad de tratamientos complementarios para otros usos del agua lluvia.

3.2 Usos en los que se puede implementar el recurso hídrico recolectado

3.2.1 Usos del agua lluvia De los 98 registros de datos seleccionados en la Fase I, se filtraron aquellos que contenían información de los usos en los que se ha implementado el agua lluvia en viviendas unifamiliares de diferentes partes del mundo, se seleccionaron 33 registros en total. Los resultados se presentaron en la Figura 6, en donde se notó que los usos con más reincidencia fueron inodoro, bebida y uso en la cocina para preparación de alimentos.

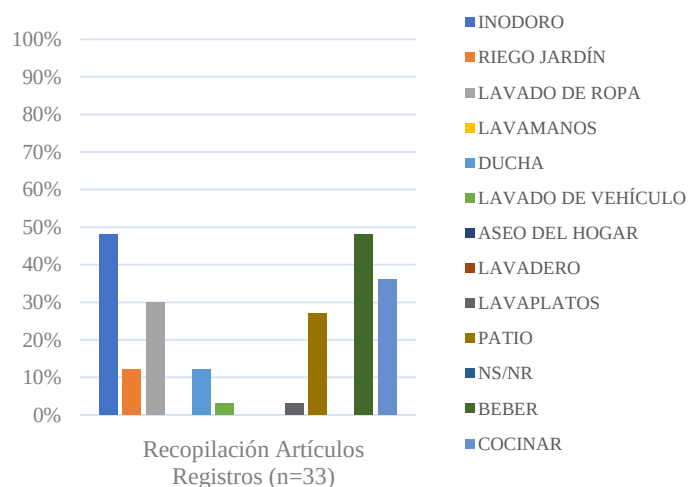


Figura 6. Usos del agua lluvia encontrados. Nota: NS/NR: Uso no especificado.

Por otra parte, se hizo una revisión de los resultados de dos encuestas efectuadas en viviendas unifamiliares en el área metropolitana de Bucaramanga (Colombia). La primera realizada por Domínguez *et al.* tiene como área de estudio hogares ubicados en un complejo residencial de viviendas sociales, clasificados como estrato 1; por el contrario, Oviedo *et al.* (Oviedo-Ocaña *et al.*, 2017) ubica el estudio en una vivienda de estrato 6 (Siendo 6 el estrato socioeconómico mas alto y 1 el mas bajo). Como se contempla en la Figura 7, los usos que prevalecieron en las dos encuestas fueron similares, aunque en la encuesta realizada por Oviedo *et al.* (Oviedo-Ocaña *et al.*, 2017) se presentaron una mayor cantidad de usos.

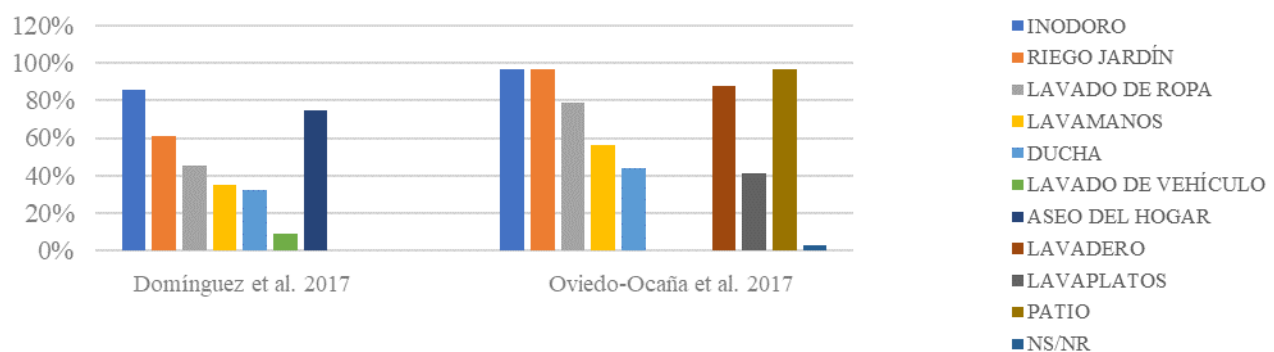


Figura 7. Posibles usos del agua lluvia según encuestas. Nota: NS/NR: Uso no especificado.

Los usos domésticos más relevantes en los cuales la gente de Bucaramanga (Colombia) estaría dispuesta a destinar el agua lluvia fueron: descarga de inodoros, riego de jardines y lavado de ropa, siendo estos de carácter no potable. Al momento de revisar y compararlos con los que se han aplicado alrededor del mundo, se encontró que aunque se ha empleado el agua lluvia en usos no potables, como los anteriormente nombrados, también se suministra para potables como lo son beber y cocinar.

3.2.2 Análisis de la calidad del agua lluvia Para indicar los valores admisibles que deben tener los parámetros del agua lluvia, se buscaron normas y estándares utilizados para reglamentar estos componentes. Se empleó el estándar británico BS 8515:2009 (BSi, 2008), ya que este código de práctica protege al público al garantizar la consistencia de la calidad de los sistemas de recolección del agua lluvia para aplicaciones de agua no potable (“British Standard 8515 : 2009 Explained BS 8515 : 2009 Rainwater Harvesting Systems - Code of What does the British Standard cover ? What design aspects need to be considered in order to comply ?,” 2009), como el riego de jardines, lavandería e inodoro, pero no cubre los sistemas de suministro de agua potable para beber, preparar alimentos y cocinar. Por lo tanto, para este caso se manejó la Guía para la calidad del agua potable (OMS, 2006) y la Resolución 2115 del 2007 (Ambiente & Territorial, 2007). Los valores de la media registrados en la Tabla 1, para agua lluvia con tratamiento previo y sin tratamiento, se compararon con los valores suministrados por cada una de estas normas, con el fin de determinar que parámetros no cumplen con los valores admisibles. En las Tablas 2 y 3, se muestran resaltados en verde los parámetros que cumplen con las normativas y en rojo los que incumplen con estas.

3.2.2.1 Calidad agua lluvia no potable La calidad del agua se midió con los valores de referencia dados en la Tabla 2 para los parámetros relacionados con el riesgo para la salud y la operación del sistema, estos proporcionan un índice de la eficacia del agua que se espera de un sistema bien diseñado y mantenido para implementarse en el riego de jardines y el lavado de inodoros (BSi, 2008). Se encontró que los coliformes totales no cumplen con la medida establecida, ya que la media total con tratamiento sobrepasa los 1000 NMP/100 m.

3.2.2.2 Calidad agua lluvia potable Las enfermedades relacionadas con la contaminación del agua de consumo tienen repercusión en la salud de las personas; es por esto que cuando el agua lluvia se dispone para beber o cocinar, se deben implementar medidas drásticas a los parámetros que la componen, de tal manera que se suministre un recurso satisfactorio en términos de calidad. La finalidad de la Guía es garantizar la inocuidad del abastecimiento de agua por medio del control de los componentes presentes, así mismo, la Resolución 2115 busca señalar las características fisicoquímicas y microbiológicas con sus valores máximos aceptables para el consumo humano del agua. En la Tabla 3, se encuentran estipulados los valores que deben cumplir estos elementos (OMS, 2006)(Ambiente & Territorial, 2007).

De igual manera, para usos potables los parámetros microbiológicos incumplieron en las medidas impuestas, ya que independientemente de si se empleó o no un tratamiento previo, siempre se evidenciaron muestras de coliformes totales, E. coli y coliformes fecales, haciendo omisión de la guía y de otros estándares para agua potable, la cual determina que estos parámetros no deben estar presentes en el recurso a suministrar por su implicación en la salud humana. Para parámetros fisicoquímicos, la media sin tratamiento para la turbiedad y el selenio, sobrepasaron los valores máximos aceptables.

Tabla 2.

Cumplimiento de valores admisibles de los parámetros del agua lluvia para usos potables.

Propiedades	Unidad	Media Tratamiento	Who	Res	Media sin tratamiento	Who	Res	Who 2006	Res 2115
pH	pH Units	7.01			7.09			6.5 - 9.5	6.5-9

Propiedades	Unidad	Media Tratamiento	Who	Res	Media sin tratamiento	Who	Res	Who 2006	Res 2115
Sólidos									-
Disueltos									
Totales	mg/L	51.30			71.26			<1200	
Turbiedad	NTU	1.46			4.82			-	<2
	mgCaCO								-
Dureza	3/L	46.34			31.60			200	
Cloruro	mg/L	12.81			3.55			<250	<250
Nitrato	mg/L	2.01			2.61			<50	<10
Nitrito	mg/L	0.08			0.08			<3	<0.1
Sulfato	mg/L	8.55			10.16			<250	<250
Sodio	mg/L	3.91			3.89			<200	-
Hierro	mg/L	0.05			0.04			<2	<0.3
Manganeso	mg/L	0.01			0.01			0.4	0.1
Selenio	mg/L	0.001			0.02			0.01	0.01
Aluminio	mg/L	0.05			0.10			0.2	0.2
Fluoruro	mg/L	0.19			0.15			1.5	1
Cobre	mg/L	0.01			0.02			2	1
Cromo	mg/L	0.18			0.01			0.05	0.05
Níquel	mg/L	0			0.01			0.07	0.02
Arsénico	mg/L	0			0.01			0.01	0.01
Zinc	mg/L	0.22			0.34			<3	<3
Cadmio	mg/L	0			0.01			0.03	0.03
Plomo	mg/L	0.01			0.01			0.01	0.01
	NMP/100								0
Coliformes	mL	2546.35			206.11			0	
Totales	CFU/100								0
	mL	4081.55			13533.88			0	

Propiedades	Unidad	Media Tratamiento	Who	Res	Media sin tratamiento	Who	Res	Who 2006	Res 2115
									0
E. coli	NMP/100								
	mL	101.11			44			0	
	CFU/100								0
	mL	181.82			453.51			0	
Coliformes	CFU/100								0
Fecales	mL	38.95			505.32			0	

Nota: Color Verde: Valor cumple con la norma, Color Rojo: Valor no cumple con la norma, Color Amarillo: No se puede determinar si el valor cumple con la norma. WHO: Guía para la calidad del agua potable (World Health Organization). RES: Resolución 2115 del 2007 de Colombia.

Tabla 3.

Cumplimiento de valores admisibles de los parámetros del agua lluvia para usos no potables.

Propiedades	Unidad	Media tratamiento	Media sin tratamiento	BS 8515:2009
Oxígeno Disuelto	mg/L	3.86	3.44	>1 mg/L O ₂
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	9.09	25.58	Visualmente claro y libre de residuos flotantes
Color	Pt - Co	12.46	18.47	No objetable
Turbiedad	NTU	1.46	4.82	<10 NTU
pH	pH Units	7.01	7.09	6 - 8
Coliformes Totales	NMP/100 mL	2546.35	206.11	NMP 1000/100 mL

Propiedades	Unidad	Media tratamiento	Media sin tratamiento	BS 8515:2009
Escherichia Coli	NMP/100 mL	101.11	44	250

Nota: Color Verde: Valor cumple con la norma, Color Rojo: Valor no cumple con la norma, Color Amarillo: No se puede determinar si el valor cumple con la norma. WHO: Guía para la calidad del agua potable (World Health Organization). RES: Resolución 2115 del 2007 de Colombia.

El selenio es un elemento presente en la naturaleza, así como, un componente de pigmentos en plásticos, pinturas, cauchos entre otros. Tiene efectos tanto beneficiosos como perjudiciales; es necesario en bajas dosis para mantener buena salud, sin embargo, la exposición a altos niveles puede producir efectos adversos sobre la salud (e.g. Selenosis, pérdida del cabello, vómitos) (ATSDR, n.d.).

3.3 Caracterización de ofertas tecnológicas para el aprovechamiento del agua lluvia en viviendas unifamiliares.

Se revisaron los artículos previamente seleccionados en la Fase I y se extrajeron los tratamientos utilizados en los sistemas de recolección de aguas lluvias para mejorar la calidad de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos que no cumplieron con las normas en la Fase II. Las tecnologías identificadas se exponen a continuación con el fin de determinar las opciones más factibles a implementar en la ciudad de Bucaramanga (Colombia):

- **Desviador de primer flujo:** la eliminación de la primera descarga juega un papel importante en el agua cosechada. El primer flujo de agua lluvia captada es una de las

principales causas de la degradación de la calidad del agua lluvia recolectada, ya que contiene una alta concentración de contaminantes de la atmósfera y de partículas que se han depositado sobre la superficie del techo (Kim et al., 2017)(López Rincón & Vergara Bautista, 2011), por lo que el objetivo de este método es desviar los primeros 0,8 a 3,5 mm de lluvia del tanque de almacenamiento (Despins et al., 2009); como se puede observar en la Figura 8, la primera descarga de agua contaminada se desvia hacia la cámara, cuando esta se llena, el agua fluye hacia el tanque. 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). Los colectores de primeras lluvias operan de manera automática y son fáciles de instalar, además, otro beneficio de estos dispositivos es que reducen la necesidad de mantenimiento del tanque. 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 (López Rincón & Vergara Bautista, 2011).

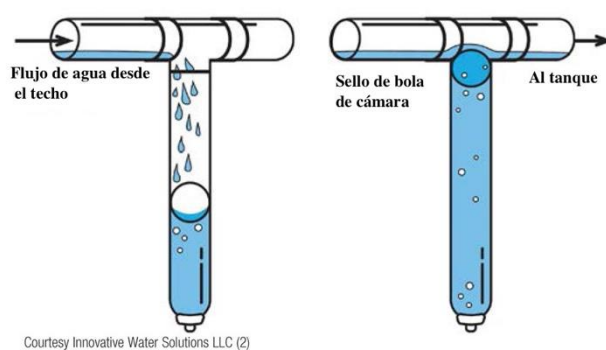


Figura 8. Función de un desviador de primer flujo. Fuente: Innovative Water Solutions LLC (2)

- **Cloración:** la cloración del agua es un método común, económico, de fácil aplicación y con accesibilidad en casi todos los países del mundo (De Kwaadsteniet, Dobrowsky, Van Deventer, Khan, & Cloete, 2013)(Solsona, Regional, & Cepis-ops, 2002). Su finalidad principal es la desinfección microbiana. No obstante, el cloro actúa también como oxidante y puede ayudar a eliminar algunas sustancias químicas; por ejemplo, puede descomponer los plaguicidas fácilmente oxidables, puede oxidar especies disueltas, como el manganeso (II), y formar productos insolubles que pueden eliminarse mediante una filtración posterior, además, puede oxidar especies disueltas a formas más fáciles de eliminar (por ejemplo, el arsenito a arseniato). La cloración puede realizarse mediante gas cloro licuado, solución de hipoclorito sódico o gránulos de hipoclorito cálcico, y mediante generadores de cloro in situ (OMS, 2006). Sin embargo, un inconveniente que presenta el cloro es su capacidad de reaccionar con materia orgánica natural presente en el lodo que se ha depositado en el fondo del tanque de almacenamiento, formando subproductos peligrosos, por lo que se recomienda clorar el agua después de que se haya retirado del tanque. No se puede determinar una dosis específica, ya que cada caso es diferente (OMS, 2006)(De Kwaadsteniet et al., 2013).
- **Filtros lentos de arena:** son habitualmente depósitos que contienen capas de arena graduada hasta una profundidad de 0,5 a 1,5 m, con la fracción más gruesa en la parte inferior y el nivel más fino en la parte superior (con partículas de tamaño efectivo de 0,15 a 0,3 mm). Una capa delgada de biopelícula en la superficie del filtro es responsable de su eficiencia en la filtración y, por lo tanto, funciona como un tratamiento biológico y también como un filtro físico. En estos filtros, la turbidez y los microorganismos se eliminan principalmente en los primeros centímetros de la arena y el agua tratada se recoge

en sumideros o tuberías situados en la parte baja del filtro. Periódicamente, se retiran y sustituyen los primeros centímetros de arena que contienen los sólidos acumulados (OMS, 2006)(De Kwaadsteniet et al., 2013). La arena también se puede recubrir con óxido de manganeso e hidróxido de hierro para funcionalizar aún más el filtro. Se ha demostrado que la arena recubierta con óxido de manganeso elimina los metales pesados del agua mientras que la arena recubierta con hidróxido de hierro elimina los microorganismos y la turbidez (De Kwaadsteniet et al., 2013). Los filtros lentos de arena sólo son adecuados para aguas de turbidez baja o aguas sometidas a filtración previa, ya que el agua con niveles altos de esta puede tapar rápidamente la arena fina de estos filtros. El agua es aplicada a los filtros sin ningún pre-tratamiento cuando el agua tiene niveles de turbiedad menores a 10 NTU (OMS, 2006)(C. Agua, n.d.). La simplicidad de diseño y operación, así como los requerimientos mínimos de compuestos químicos y energía hacen que el filtro lento de arena sea una técnica apropiada para la remoción de materia suspendida orgánica e inorgánica (C. Agua, n.d.).

- **Tanque de almacenamiento de agua caliente:** estudios han demostrado que el almacenamiento de aguas lluvias en tanques a altas temperaturas permite la inactivación de microorganismos. Se ha sugerido que el rango de temperatura de 55 a 65 ° C es crítico para la inactivación térmica de especies bacterianas debido a la presencia de bacterias resistentes al calor. Por lo tanto, se propuso una temperatura óptima de 60 ° C en sistemas de agua caliente para la eliminación efectiva de bacterias (De Kwaadsteniet et al., 2013). Un estudio de 27 sistemas de agua de lluvia en Figtree Place, Australia encontró que todas las bacterias coliformes se eliminaron después del almacenamiento en el tanque de agua caliente en las 23 muestras recolectadas. Esta eficiencia de eliminación se logró con agua

lluvia de muy mala calidad. Otro estudio mostró una inactivación similar para *Escherichia coli*, observando una reducción de casi 5 log en las concentraciones cuando el agua se mantuvo a 60°C durante un período de 5 minutos en un entorno de laboratorio (Despins et al., 2009). No obstante, muchos hogares en los países en desarrollo no tienen sistemas de agua caliente sanitaria y, por lo tanto, no es una tecnología adecuada para las comunidades rurales, además, los altos costos de energía y la disponibilidad de combustibles son otras de las desventajas de este método de desinfección (De Kwaadsteniet et al., 2013).

- **Ozonización:** el ozono es un excelente desinfectante y posee múltiples usos en el tratamiento del agua, incluida la oxidación de sustancias orgánicas y la reducción o eliminación de compuestos químicos, su precio de costo es más elevado que el del cloro o sus derivados, pero su eficacia es superior. Este gas reacciona con las sustancias orgánicas naturales y aumenta su biodegradabilidad, medida en términos de carbono orgánico asimilable. Se requiere electricidad para producirlo e inyectarlo en el agua, lo cual se hace generalmente a intervalos, además, no permanece mucho tiempo dentro del agua, por lo cual se requiere de aplicación continua en caso de querer almacenar el agua durante un largo tiempo. El ozono puede ser producido por tres métodos: fotoquímico, electrólisis del ácido sulfúrico y corona de descarga; este último consiste en hacer pasar una corriente de aire u oxígeno, libre de humedad a través de una descarga eléctrica producida al aplicar un alto voltaje entre dos electrodos con un dieléctrico para distribuir la carga, pero tiene la desventaja de que solo el 10% de la energía suministrada es usada y el resto se pierde como luz, calor y sonido. Las dosis necesarias varían en función del tipo de agua, pero suelen ser de 2 a 5 mg/l, sin embargo, para aguas sin tratar se necesitan

dosis más altas debido a la demanda de ozono de las sustancias orgánicas naturales. Para evitar la proliferación no deseable de bacterias durante la distribución, se complementa normalmente con un tratamiento posterior, como la filtración o tratamiento con carbón activado granular, para eliminar las sustancias orgánicas biodegradables, seguido de la aplicación de una concentración residual de cloro, ya que el ozono no produce un efecto desinfectante residual (OMS, 2006)(Rojas Salazar, 2016)(Sandec, n.d.)(C. N. del Agua, 2007).

- **Irradiación solar:** la Desinfección Solar del Agua (SODIS) es una solución simple, de bajo costo y ambientalmente sostenible para el tratamiento de agua para consumo humano a nivel doméstico, en lugares en los que la población consume agua cruda y microbiológicamente contaminada (Sandec, n.d.). La simplicidad de la técnica y el hecho de que es económica hace que SODIS sea un método ideal para tratar el agua de lluvia recolectada en comunidades rurales aisladas de los países en desarrollo, sin embargo, no está exenta de limitaciones, ya que los principales problemas son la eficiencia de eliminación y la posibilidad de recontaminación (Adler & Campos, 2011), e incluso en condiciones climáticas adversas, no es efectivo para reducir ninguno de los indicadores microbianos a niveles inferiores del nivel de agua potable (De Kwaadsteniet et al., 2013). SODIS es ideal para desinfectar pequeñas cantidades de agua con baja turbidez, menor a 30 NTU (Sandec, n.d.). Este método consiste en llenar el agua contaminada en botellas de plástico transparente, la profundidad de estas no debe exceder los 10 cm, las cuales se exponen a la luz solar durante seis horas. La exposición al sol destruye los patógenos, su eficacia para matar protozoarios depende de la temperatura alcanzada por el agua durante la exposición al sol, la turbidez del agua y las condiciones climáticas, cuando la nubosidad

es mayor de 50%, es necesario exponer las botellas de plástico durante 2 días consecutivos para obtener agua segura para el consumo humano (Sandec, n.d.). Sin embargo, si la temperatura del agua supera los 50°C, una hora de exposición es suficiente para obtener agua segura. Este método mejora la calidad microbiológica del agua para consumo humano, no cambia el sabor del agua, es de aplicación simple ya que se puede aplicar a nivel de hogar bajo su propio control y responsabilidad, además, posee ventajas financieras, pues los únicos recursos necesarios son la luz solar y botellas de plástico, por lo que, no requiere de una infraestructura costosa (Sandec, n.d.).

- **Filtro de carbón activado:** el carbón activado granular (CAG) también se puede emplear en el tratamiento del agua lluvia. Este tiene una gran superficie, debido a sus características de carga superficial y de adsorción (Torres-parra, García-ubaque, García-ubaque, & Pacheco-garcía, 2017), permite la eliminación de contaminantes microbianos y químicos (De Kwaadsteniet et al., 2013). El filtro CAG sirve para reducir la turbidez, el plomo y el COD, además, elimina la mayoría de las sustancias orgánicas del agua lluvia sin tratar (Kus, Kandasamy, Vigneswaran, Shon, & Moody, 2013), color, olor y otros contaminantes importantes (Adler, Hudson-Edwards, & Campos, 2013). Asimismo, puede eliminar ciertos tipos de metales como plomo, cadmio o mercurio, siempre que los metales pesados se encuentren presentes en pequeñas cantidades (AGUASISTEC, n.d.-b). Una de las mayores ventajas de utilizar carbón activado es su facilidad de obtención (Arana Correa, 2016), además la disponibilidad de adquisición de estos materiales a nivel local y su fácil construcción, permite que este sistema de tratamiento sea implementado a zonas rurales utilizando herramientas sencillas (Torres-parra et al., 2017). Los filtros CAG son sistemas de purificación de agua comunes en casas y edificios; a medida que el agua fluye

a través de este, los químicos se adsorben o se adhieren a la superficie y dentro de los millones de microporos (poros menores a 2 nanómetros) de los gránulos del carbón activado (AGUASISTEC, n.d.-b). La eliminación de coliformes totales y fecales en el sistema demostró la maduración del lecho y la capacidad de adsorción de los medios granulares utilizados, a partir de 0,50 m de profundidad, la actividad bacteriológica disminuye o se anula (Torres-parra et al., 2017).

- **Desinfección UV:** el esterilizador UV es un equipo avanzado de desinfección de agua. Los rayos ultravioleta UV alteran el ADN de los microorganismos (virus, bacterias, protozoos, etc.) presentes en el agua, eliminándolos, o inactivándolos genéticamente, para impedir su reproducción. La eficiencia del UV en la eliminación de virus y bacterias es del 99.9% (AGUASISTEC, n.d.-a). Estudios confirman que coliformes y E. coli se redujeron o no fueron detectados cuando el agua lluvia se trató con luz ultravioleta (UV) (Despins et al., 2009)(Kim et al., 2017)(De Kwaadsteniet et al., 2013)(Lee, Kim, Kim, & Han, 2020). El equipo esterilizador ultravioleta está constituido por un tubo de acero inoxidable sanitario con interior totalmente pulido de espejo. Dentro del tubo de acero inoxidable se encuentra otro tubo de cuarzo y dentro de este último la lámpara de radiación ultra violeta. El agua circula entre el tubo de acero inoxidable y el tubo de cuarzo y es a través de este último que el esterilizador irradia los rayos UV dejando el agua esterilizada y lista para el consumo (AGUASISTEC, n.d.-a). Este método no deja ningún efecto residual que pueda afectar a los seres humanos y tiene un periodo de contacto más corto que otros desinfectantes; sin embargo, la baja dosificación puede no desactivar efectivamente algunos microorganismos y algunas veces estos pueden reparar o invertir los efectos destructivos de la radiación UV mediante un “mecanismo de reparación”.

Ademas, esta desinfección no es tan económica como la desinfección con cloro y la turbidez y los sólidos suspendidos totales (SST) en el agua hacen que sea ineficaz (Causada, 1999).

- **Filtración de membrana:** la alternativa a la filtración mediante lechos porosos es la utilización de filtros formados por aglomerados de fibras sintéticas de policarbonato o celulosa. En función del material utilizado y su disposición, el diámetro medio del poro del filtro varía, siendo este el parámetro que determina el tamaño mínimo de las partículas que quedarán retenidas (Envitech, n.d.).

La filtración de membrana elimina los sólidos restantes y reduce las concentraciones de turbidez, COD y plomo. Además, el filtro puede detectar y reducir el número de coliformes, aunque se reconoce que se requiere un tratamiento de desinfección adicional (con una dosis muy pequeña) para garantizar la eliminación completa al mismo tiempo que se dirige a la eliminación del virus (Kus et al., 2013), estudios muestran que se logró una eficiencia de remoción de 78% y 98% con membranas de metal de 5 mm y 1 mm, respectivamente (Despins et al., 2009). La filtración ofrece una elevada eficiencia de separación donde el factor clave es el corte de la membrana, no tiene un consumo de energía elevado y se puede combinar con otros procesos, sin embargo, no es una técnica que elimine el contaminante, sino que lo concentra, además hay que tener en cuenta el coste de las membranas y su durabilidad (Envitech, n.d.).

Tabla 4.

Calificación cualitativa de los tratamientos.

		Reducción de la contaminación fisicoquímica	Reducción de la contaminación microbiológica	Costos de inversión	Costos de operación y mantenimiento	Impacto ambiental Positivo	Calificación
Tratamiento primario Desinfección	Filtros lentos de arena	3	2	2	2	3	12
	Filtración de membrana	2	2	1	1	3	9
	Cloración	2	3	3	3	2	13
	Tanque de almacenamiento de agua caliente	1	2	1	1	2	7
	Ozonización	3	3	2	2	3	13
	Irradiación solar	1	2	3	3	3	12
	Desinfección UV	1	3	2	2	3	11

Se construyó la Tabla 4 con el fin de caracterizar cualitativamente cada una de las opciones tecnológicas propuestas a la luz de cinco criterios (ver Anexo C), calificando de 1 a 3 cada uno de ellos (siendo 3 la calificación más alta y 1 la mas baja), totalizando con la suma de estos. Por consiguiente, el tren de tratamiento más óptimo que se propone para implementar en la ciudad de Bucaramanga (Colombia) es, inicialmente un desviador de primer flujo, ya que como se pudo evidenciar en la Fase I, al introducir este mecanismo se observa una mejora de la concentración de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos; seguido a esto se sugiere instalar un filtro lento de arena como tratamiento primario y cloración o un ozonizador como método de desinfección (ver Figura 9). Además, dado que el 65% de la población de Bucaramanga se

concentra en los estratos socioeconómicos medios (estratos 3, 4 y 5) (Acosta Posada, Cortés Acosta, & Díaz Rangel, 2014), se considera que existe una buena capacidad de inversión para adquirir el tren de tratamiento propuesto.

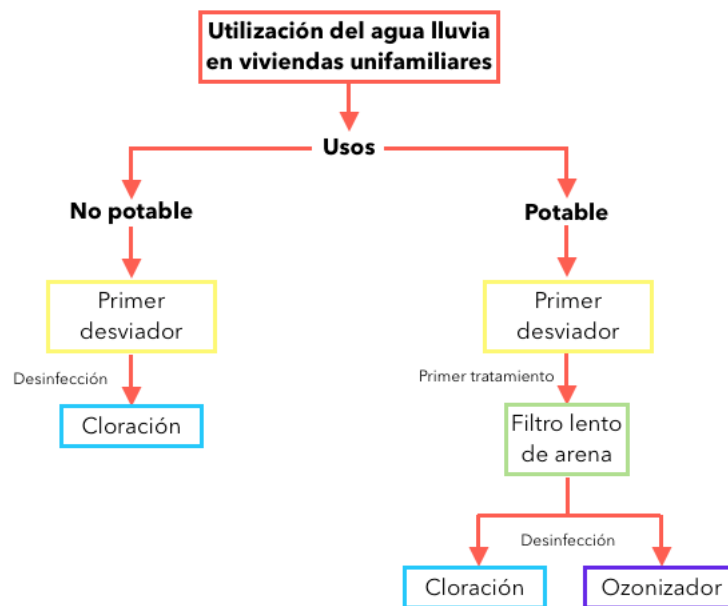


Figura 9. Tren de tratamiento.

Por otro lado, los estudios Oviedo *et al.* (Oviedo-Ocaña *et al.*, 2017) y Mendoza *et al.* (Gabriel & Santos, n.d.) proponen las siguientes tecnologías de tratamiento para aplicar en el área de Bucaramanga: malla antiplagas para la protección de canales y bajantes, filtro de hojas autolimpiante, filtro de aguas lluvias autolimpiante y desviador de primer flujo. Sin embargo, no se encontraron estudios que expongan opciones de tratamiento que se implementen o se hayan implementado en el área de estudio.

4. Conclusiones

- La revisión de literatura mostró que los parámetros más empleados para analizar la calidad del agua lluvia son: pH, turbiedad, hierro, conductividad eléctrica, nitratos, plomo, sulfatos, sólidos disueltos totales (SDT), zinc, magnesio, cloruros, sólidos suspendidos totales (SST), cobre, coliformes totales y coliformes fecales.
- Los parámetros fisicoquímicos más críticos fueron los coliformes, coliformes fecales, E. coli, selenio y turbiedad.
- Los usos mayormente empleados del agua lluvia alrededor del mundo son descarga de inodoro, beber, cocinar y lavado de ropa concordando con lo identificado en Bucarmanga en donde sus habitantes están dispuestos a implementar el agua lluvia principalmente en descarga de inodoro, riego de jardín y lavado de ropa, según encuestas realizadas para estratos 1 y 6.
- El tren de tratamiento propuesto para los usos del agua lluvia incluye inicialmente un desviador de primer flujo, seguido de un filtro lento de arena y finalizando con cloración o irradiación solar para desinfectar.

Referencias

- Acosta Posada, C. E., Cortés Acosta, D. C., & Díaz Rangel, E. D. (2014). Aproximación a los hábitos de consumo de contenidos mediáticos por parte de los niños y niñas en Colombia., 1–37.
- Adler, I., & Campos, L. C. (2011). Converting rain into drinking water : quality issues and technological advances, 659–667. <https://doi.org/10.2166/ws.2011.117>
- Adler, I., Hudson-Edwards, K. A., & Campos, L. C. (2013). Evaluation of a silver-ion based purification system for rainwater harvesting at a small-scale community level, 545–552. <https://doi.org/10.2166/aqua.2013.049>
- Agoboh, S. J. C. Y. P., & Bakobie, A. B. D. N. (2015). Evaluation of Stored Rainwater Quality in Basic Schools in the Tamale Metropolis , Ghana. *Water Quality, Exposure and Health*, 7(4), 583–590. <https://doi.org/10.1007/s12403-015-0174-6>
- Agua, C. (n.d.). Filtración Lenta con Arena.
- Agua, C. N. del. (2007). *MANUAL DE AGUA POTABLE, ALCANTARILLADO Y SANEAMIENTO DESINFECCIÓN*.
- AGUASISTEC. (n.d.-a). Esterilizador Ultravioleta UV. Retrieved from <http://www.aguasistec.com/esterilizador-ultravioleta-uv.php>
- AGUASISTEC. (n.d.-b). Filtro de Carbón Activado. Retrieved from <http://www.aguasistec.com/filtro-de-carbon-activado.php>
- Alves, F., Köchling, T., Luz, J., & Santos, S. M. (2014). Water quality and microbial diversity in cisterns from semiarid areas in Brazil, 513–526. <https://doi.org/10.2166/wh.2014.139>

Ambiente, M. D. E., & Territorial, V. Y. D. (2007). LOS MINISTROS DE LA PROTECCIÓN SOCIAL Y DE AMBIENTE , VIVIENDA RESUELVE : CAPÍTULO I.

Ap, P., & Edici, L. A. T. (n.d.). Guías para la calidad del agua potable.

Arana Correa, J. E. (2016). EVALUACIÓN DE LA APLICACIÓN DE CARBÓN ACTIVADO GRANULAR EN LA FILTRACIÓN DEL AGUA CLARIFICADA DEL RÍO CAUCA.

ATSDR, A. para sustancias tóxicas y el registro de enfermedades. (n.d.). *ToxFAQs™ - Selenio (Selenium)*.

Ballén Suárez, J. A., Galarza García, M. Á., & Ortiz Mosquera, R. O. (2006). SISTEMAS DE APROVECHAMIENTO DE AGUA LLUVIA PARA VIVIENDA URBANA.

British Standard 8515 : 2009 Explained BS 8515 : 2009 Rainwater Harvesting Systems - Code of What does the British Standard cover ? What design aspects need to be considered in order to comply ? (2009).

BSi. (2008). BS 8515: Code of practice for the installation of rainwater harvesting systems.

Campisano, A., Butler, D., Ward, S., Burns, M. J., Friedler, E., DeBusk, K., ... Han, M. (2017). Urban rainwater harvesting systems: Research, implementation and future perspectives. *Water Research*, 115, 195–209. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.02.056>

Carmi, D., & Ram, R. (2017). Método de Estimación de Sólidos Suspendidos Totales como Indicador de la Calidad del Agua Mediante Imágenes Satelitales.

Causada, E. (1999). Folleto informativo de tecnología de aguas residuales Desinfección con luz ultravioleta.

De Kwaadsteniet, M., Dobrowsky, P. H., Van Deventer, A., Khan, W., & Cloete, T. E. (2013). Domestic rainwater harvesting: Microbial and chemical water quality and point-of-use treatment systems. *Water, Air, and Soil Pollution*, 224(7). <https://doi.org/10.1007/s11270-013-1629-7>

- Despins, C., Farahbakhsh, K., & Leidl, C. (2009). Assessment of rainwater quality from rainwater harvesting systems in Ontario , Canada, 117–134. <https://doi.org/10.2166/aqua.2009.013>
- Domènech, L., & Saurí, D. (2011). A comparative appraisal of the use of rainwater harvesting in single and multi-family buildings of the Metropolitan Area of Barcelona (Spain): social experience, drinking water savings and economic costs. *Journal of Cleaner Production*, 19(6–7), 598–608. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.11.010>
- Domínguez, I., Ward, S., Mendoza, J. G., Rincón, C. I., & Oviedo Ocaña, E. R. (2017). End-User Cost-Benefit Prioritization for Selecting Rainwater Harvesting and Greywater Reuse in Social Housing. <https://doi.org/10.3390/w9070516>
- Envitech, C. (n.d.). Filtración mediante membranas para el tratamiento de las aguas residuales. Retrieved from <https://www.aguasresiduales.info/revista/blog/filtracion-mediante-membranas-para-el-tratamiento-de-las-aguas-residuales>
- Gabriel, J., & Santos, M. (n.d.). ECONÓMICA DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE RECOLECCIÓN , TRATAMIENTO Y APROVECHAMIENTO DE AGUAS LLUVIAS Y AGUAS SOCIAL ASSESSMENT OF THE SOCIAL , TECHNICAL AND ECONOMIC VIABILITY OF THE IMPLEMENTATION OF A COLLECTION , TREATMENT AND UTILIZATION SYSTEM OF RAIN WATER AND GREY WATER IN A SOCIAL INTEREST HOUSING PROJECT.
- 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>
- Gikas, G. D., & Tsihrintzis, V. A. (2012). Assessment of water quality of first-flush roof runoff and harvested rainwater. *Journal of Hydrology*, 466–467, 115–126. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.08.020>
- Gikas, G. D., & Tsihrintzis, V. A. (2017). Effect of first-flush device , roofing material , and antecedent dry days on water quality of harvested rainwater. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9868-6>

- Hatt, B. E., Deletic, A., & Fletcher, T. D. (2006). Integrated treatment and recycling of stormwater: A review of Australian practice. *Journal of Environmental Management*, 79(1), 102–113. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2005.06.003>
- Helmreich, B., & Horn, H. (2009). Opportunities in rainwater harvesting. *Desalination*, 248(1–3), 118–124. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.05.046>
- Hogain, S. O., McCarton, L., McIntyre, N., Pender, J., & Reid, A. (2012). Physicochemical and microbiological quality of harvested rainwater from an agricultural installation in Ireland, 26, 1–6. <https://doi.org/10.1111/j.1747-6593.2011.00254.x>
- IDEAM. (2014). Presentación estudio nacional del agua, 52.
- Kim, Y., Dao, A. D., Kim, M., & Nguyen, V.-A. (2017). Design and management of rainwater harvesting systems to control water quality for potable purposes in Cu Khe , Vietnam, 452–460. <https://doi.org/10.2166/ws.2016.154>
- Kus, B., Kandasamy, J., Vigneswaran, S., Shon, H. K., & Moody, G. (2013). Household rainwater harvesting system – pilot scale gravity driven membrane-based filtration system, 790–797. <https://doi.org/10.2166/ws.2013.067>
- Lee, M., Kim, M., Kim, Y., & Han, M. (2020). Consideration of rainwater quality parameters for drinking purposes : A case study in rural Vietnam. *Journal of Environmental Management*, 200(2017), 400–406. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.05.072>
- López Rincón, J., & Vergara Bautista, N. (2011). ELABORACIÓN DE UNA GUÍA AMBIENTAL PARA LA REUTILIZACIÓN DE AGUAS GRISES Y APROVECHAMIENTO DE LAS AGUAS LLUVIAS EN EDIFICACIONES.
- Morales-pinzón, T., García-serna, M. I., & Flórez-calderón, M. T. (2015). Quality of rainwater harvesting in urban systems: case study in Colombia, 10(3), 424–431. <https://doi.org/10.2166/wpt.2015.043>
- OMS. (2006). Guías para la calidad del agua potable.

ONU. (n.d.). Retrieved from <http://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/scarcity.shtml>.

Oviedo-Ocaña, E. R., Dominguez, I., Ward, S., Rivera-Sanchez, M. L., & Zaraza-Peña, J. M. (2017). Financial feasibility of end-user designed rainwater harvesting and greywater reuse systems for high water use households. *Environmental Science and Pollution Research*, 1–17. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8710-5>

Payus, C., Meng, K. J., Resources, N., Science, E., & Resources, N. (2015). CONSUMPTION OF RAINWATER HARVESTING IN TERMS OF, 9(2), 1515–1522.

Qin, H.-P., Tang, Q.-L., Wang, L.-Y., & Fu, G. (2015). The impact of atmospheric wet deposition on roof runoff quality in an urbanized area, 880–892. <https://doi.org/10.2166/nh.2015.209>

Rojas Salazar, M. (2016). DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA DE CAPTACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE AGUAS LLUVIAS (SCALL) COMO ALTERNATIVA DE AHORRO Y USO SOSTENIBLE DE AGUA POTABLE A NIVEL RESIDENCIAL EN LA CIUDAD BOGOTA.

Sandec, E. (n.d.). *Desinfección Solar del Agua Guía de aplicación Desinfección Solar del Agua Guía de aplicación*.

Solsona, F., Regional, A., & Cepis-ops, A. (2002). DESINFECCIÓN DEL AGUA.

Torres-parra, C. A., García-ubaque, C. A., García-ubaque, J. C., & Pacheco-garcía, M. C. G. R. (2017). Agua segura para comunidades rurales a partir de un sistema alternativo de filtración, 19(4), 453–459.

Young, J., Bak, G., & Han, M. (2012). Quality of roof-harvested rainwater e Comparison of different roof materials. *Environmental Pollution*, 162, 422–429. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.12.005>

Apéndices

Apéndice A. Referencias 35 Artículos

A continuación, se referencian los 35 artículos escogidos e implementados a lo largo del desarrollo del proyecto.

Adler, I., & Campos, L. C. (2011). Converting rain into drinking water : quality issues and technological advances, 659–667. <https://doi.org/10.2166/ws.2011.117>

Adler, I., Hudson-Edwards, K. A., & Campos, L. C. (2013). Evaluation of a silver-ion based purification system for rainwater harvesting at a small-scale community level, 545–552. <https://doi.org/10.2166/aqua.2013.049>

Agoboh, S. J. C. Y. P., & Bakobie, A. B. D. N. (2015). Evaluation of Stored Rainwater Quality in Basic Schools in the Tamale Metropolis , Ghana. *Water Quality, Exposure and Health*, 7(4), 583–590. <https://doi.org/10.1007/s12403-015-0174-6>

Alves, F., Köchling, T., Luz, J., & Santos, S. M. (2014). Water quality and microbial diversity in cisterns from semiarid areas in Brazil, 513–526. <https://doi.org/10.2166/wh.2014.139>

Aniin, M. T., Kirti, T., & Amin, M. N. M. Y. (2013). Effects of Catchment , First-Flush , Storage Conditions , and Time on Microbial Quality in Rainwater Harvesting Systems, (December). <https://doi.org/10.2175/106143013X13706200598433>

Arku, F., Omari, S., Adu-okoree, B., & Abduramane, A. (2016). Development in Practice Harvested rainwater : quality , adequacy , and proximity in Ghanaian rural communities, 4524(January). <https://doi.org/10.1080/09614524.2015.1081676>

- College, S. K. G., & Beed, D. (2018). COMPARITIVE STUDY ON PHYSICO-CHEMICAL AND BACTERIOLOGICAL ANALYSIS OF HARVESTED RAINWATER AND NON HARVESTED GROUNDWATER Suparna Deshmukh, *11*(1), 331–338.
- Debusk, K. M., & Iii, W. F. H. (2014). Impact of rainwater harvesting systems on nutrient and sediment concentrations in roof runoff, 220–229. <https://doi.org/10.2166/ws.2013.191>
- Despins, C., Farahbakhsh, K., & Leidl, C. (2009). Assessment of rainwater quality from rainwater harvesting systems in Ontario , Canada, 117–134. <https://doi.org/10.2166/aqua.2009.013>
- Gikas, G. D., & Tsihrintzis, V. A. (2012). Assessment of water quality of first-flush roof runoff and harvested rainwater. *Journal of Hydrology*, 466–467, 115–126. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.08.020>
- Gikas, G. D., & Tsihrintzis, V. A. (2017). Effect of first-flush device , roofing material , and antecedent dry days on water quality of harvested rainwater. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9868-6>
- Haifa, M. C., & Friedler, E. (2017). Quality of Roof-Harvested Rainwater as a Function of Environmental and Air Pollution Factors in a Coastal, 1–12. <https://doi.org/10.3390/w9110896>
- Hogain, S. O., McCarton, L., McIntyre, N., Pender, J., & Reid, A. (2011). Physicochemical and microbiological quality of water from a pilot domestic rainwater harvesting facility in Ireland, 25(January 2006), 489–494. <https://doi.org/10.1111/j.1747-6593.2010.00244.x>
- Hogain, S. O., McCarton, L., McIntyre, N., Pender, J., & Reid, A. (2012). Physicochemical and microbiological quality of harvested rainwater from an agricultural installation in Ireland, 26, 1–6. <https://doi.org/10.1111/j.1747-6593.2011.00254.x>
- 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, 415–428. <https://doi.org/10.2166/wh.2011.114>
- Kim, R.-H., Lee, S., Lee, J.-H., & Kim, Y.-M. (2005). A rainwater harvesting technology by roof coating using TiO_2 . *Materials Science Forum* (Vol. 486–487).

- Kim, Y., Dao, A. D., Kim, M., & Nguyen, V.-A. (2017). Design and management of rainwater harvesting systems to control water quality for potable purposes in Cu Khe , Vietnam, 452–460. <https://doi.org/10.2166/ws.2016.154>
- Kus, B., Kandasamy, J., Vigneswaran, S., Shon, H. K., & Moody, G. (2013). Household rainwater harvesting system – pilot scale gravity driven membrane-based fi ltration system, 790–797. <https://doi.org/10.2166/ws.2013.067>
- Lee, M., Kim, M., Kim, Y., & Han, M. (2020). Consideration of rainwater quality parameters for drinking purposes : A case study in rural Vietnam. *Journal of Environmental Management*, 200(2017), 400–406. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.05.072>
- Miorando, T., Brião, V. B., & Girardelli, L. (2017). Potabilização de água da chuva por ultra f iltração Ultra f iltration of rainwater to produce drinking water, 481–490. <https://doi.org/10.1590/S1413>
- Morales-pinzón, T., García-serna, M. I., & Flórez-calderón, M. T. (2015). Quality of rainwater harvesting in urban systems: case study in Colombia, 10(3), 424–431. <https://doi.org/10.2166/wpt.2015.043>
- Morrow, A. C., Dunstan, R. H., & Coombes, P. J. (2010). Science of the Total Environment Elemental composition at different points of the rainwater harvesting system. *Science of the Total Environment*, 408(20), 4542–4548. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.07.002>
- Neibaur, E. E., & Anderson, E. P. (2016). Uncorrected Proof Uncorrected Proof, 1–10. <https://doi.org/10.2166/ws.2016.066>
- Payus, C., Meng, K. J., Resources, N., Science, E., & Resources, N. (2015). CONSUMPTION OF RAINWATER HARVESTING IN TERMS OF, 9(2), 1515–1522.
- Qin, H.-P., Tang, Q.-L., Wang, L.-Y., & Fu, G. (2015). The impact of atmospheric wet deposition on roof runoff quality in an urbanized area, 880–892. <https://doi.org/10.2166/nh.2015.209>

- Schets, F. M., Italiaander, R., Berg, H. H. J. L. Van Den, & Husman, A. M. D. R. (2010). Rainwater harvesting: quality assessment and utilization in The Netherlands, 224–235. <https://doi.org/10.2166/wh.2009.037>
- Stump, B., McBroom, M., & Darville, R. (2012). Demographics , practices and water quality from domestic potable rainwater harvesting systems, 261–272. <https://doi.org/10.2166/aqua.2012.007>
- Thenga, H., & Chaplot, V. (2018). Comparison of the chemical quality of rainwater harvested from roof and surface run-off systems, 44(2), 223–231.
- Vialle, C., Sablayrolles, C., Lovera, M., & Huau, M. (2012). Water Quality Monitoring and Hydraulic Evaluation of a Household Roof Runoff Harvesting System in France, 2233–2241. <https://doi.org/10.1007/s11269-012-0012-6>
- Vialle, C., Sablayrolles, C., Lovera, M., Jacob, S., Huau, M., & Montrejaud-vignoles, M. (2011). Monitoring of water quality from roof runoff: Interpretation using multivariate analysis. *Water Research*, 45(12), 3765–3775. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.04.029>
- Ward, S. (2017). Alleviating health risks associated with rainwater harvesting, 12(2013).
- Yip, J., Leong, C., Nan, M., Eong, P., & Hermawan, A. (2017a). Longitudinal assessment of rainwater quality under tropical climatic conditions in enabling effective rainwater harvesting and reuse schemes. *Journal of Cleaner Production*, 143, 64–75. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.149>
- Yip, J., Leong, C., Nan, M., Eong, P., & Hermawan, A. (2017b). Longitudinal assessment of rainwater quality under tropical climatic conditions in enabling effective rainwater harvesting and reuse schemes. *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.149>
- Young, J., Bak, G., & Han, M. (2012). Quality of roof-harvested rainwater e Comparison of different roofing materials. *Environmental Pollution*, 162, 422–429. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.12.005>

Young, J., Yang, J., Han, M., & Choi, J. (2010). Science of the Total Environment Comparison of the microbiological and chemical characterization of harvested rainwater and reservoir water as alternative water resources. *Science of the Total Environment, The*, 408(4), 896–905. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.11.001>

